

# Bestimmung des Prozessfensters bei der induktiven Erwärmung von Formplatinen für den Warmformprozess

DIPLOMARBEIT

von

Gernot Wilfinger



Technische Universität Graz

Institut für Werkzeugtechnik & Spanlose Produktion

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Kolleck

**Betreuer:**

Univ.-Prof.Dr.-Ing. Ralf Kolleck

Dipl.-Ing. Robert Veit

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 23. Dezember 2010

(Unterschrift)

## Danksagung

Die vorliegende Diplomarbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit am Institut für Werkzeugtechnik & Spanlose Produktion. Ich bedanke mich hiermit bei all jenen, die zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben.

Ich danke Herrn Dipl.-Ing. Robert Veit für die Unterstützung und Betreuung dieser Diplomarbeit.

Besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Kolleck, der mir die Möglichkeit gegeben hat, diese Diplomarbeit am Institut für Werkzeugtechnik & Spanlose Produktion zu verfassen.

Besonders bedanke ich mich bei meinen Eltern, ohne deren Unterstützung es mir nicht möglich gewesen wäre, das Studium aus Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau in Angriff zu nehmen und es erfolgreich zu beenden.

Ich bedanke mich bei meiner Schwester für deren Zuspruch und Hilfe während des Studiums und für die Korrektur der vorliegenden Arbeit.

## Kurzfassung

In der Automobilindustrie werden vermehrt warmumgeformte Bauteile eingesetzt. Mit dieser Technologie werden komplexe und höchstfeste Bauteile hergestellt. Damit wird die Sicherheit der Passagiere auch bei einer Reduktion des Fahrzeuggewichtes erhöht.

Die Nachfrage nach Erwärmungsanlagen für die Warmumformung steigt. Aus diesem Grund wird die Technologie der induktiven Erwärmung um einen neuen Anwendungsbereich erweitert. Die Erwärmung von Formplatinen stellt spezielle Herausforderungen an die Induktionsanlage sowie an das Transportsystem.

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Bestimmung des Prozessfensters bei der Erwärmung von Formplatinen mittels Induktion.

In einem ersten Schritt wird das unterschiedliche Erwärmungsverhalten der verschiedenen Induktoren untersucht. Dazu werden die Formplatinen von Raumtemperatur aus auf die geforderten Temperaturen erwärmt. Mit den gewonnenen Erkenntnissen werden in einem weiteren Schritt Formplatinen mit einer Kombination aus mehreren Induktoren erwärmt.

Das Ziel aller Versuche liegt in der Erreichung einer homogenen Temperaturverteilung auf der Formplatte am Ende des Erwärmungsprozesses.

Die Temperaturverteilung auf der Platine wurde mittels Thermokabel, Pyrometer und Wärmebildkamera gemessen. Die unterschiedlich hohen Temperaturen und auch die Wirkung des magnetischen Wechselfeldes stellten spezielle Anforderungen an die Temperaturmesssysteme.

Um den Transport der Formplatte bei den unterschiedlichen Versuchsreihen sicherzustellen war es notwendig zwei unterschiedliche Transportsysteme zu verwenden.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse der Versuche sind in dieser Arbeit enthalten, wie auch ein Ausblick über eine mögliche Weiterentwicklung der Induktionsanlage zur Serienreife.



## Abstract

The use of hot-formed parts has recently been increasing in the automotive industry. Using this technology, it is possible to produce very complex and high-strength parts. A favorable feature of such processes lies in the increase of passenger safety and a simultaneous weight reduction of the vehicles.

Demand for heating systems for such hot-forming processes has been constantly rising. This is one of the reasons why the technology of inductive heating has expanded to yet another new application area. The heating of contoured blanks has proven to be a special challenge for both the inductive heating unit and the transport system for components.

This diploma thesis focuses on the determination of the process window for the heating of a contoured blank with an induction unit. In a first step, different heating properties of the various inductors are investigated. For this purpose the contoured blanks are heated from room temperature to their required temperatures. The contoured blanks are then heated using these insights with a combination of different inductors.

The objective of all these tests is to achieve a constant temperature distribution over the entire surface of the shaped blank by the end of the heating process.

The uniform temperature distribution on the blank was measured by a thermocouple, pyrometer and a thermal imaging camera.

The different temperatures and the effects of the alternating magnetic field posed an additional special requirement to the temperature measurement system.

To ensure a reliable transfer of the blanks, two different transport systems had to be used in the experiments.

The results and observations of the conducted tests are included in this thesis, followed additionally by a preview of the design and development of an induction unit fully to serial production.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Ausgangssituation .....</b>	<b>5</b>
2.1	Einteilung der Stähle .....	5
2.2	Entwicklung Presshärten.....	5
2.3	Anwendung.....	5
2.3.1	Direktes Presshärten .....	7
2.3.2	Indirektes Presshärten.....	8
2.4	Verbreitung und Ausblick.....	8
<b>3</b>	<b>Stand der Technik.....</b>	<b>10</b>
3.1	Grundlagen Wärmeübertragung .....	10
3.1.1	Konvektion.....	10
3.1.2	Wärmeleitung .....	11
3.1.3	Wärmestrahlung .....	11
3.2	Konventionelle Ofenanlagen.....	12
3.2.1	Erwärmungstechnologie.....	12
3.2.2	Rollenherdöfen.....	13
3.2.3	Hubbalkenöfen .....	13
3.3	Alternative Erwärmungskonzepte .....	13
3.3.1	Konduktive Erwärmung.....	13
3.3.2	Erwärmung mittels Infrarotstrahler .....	14
<b>4</b>	<b>Induktionserwärmung .....</b>	<b>15</b>
4.1	Verwendung von induktiven Erwärmungsanlagen .....	15
4.2	Physikalische Grundlagen .....	16
4.2.1	Prinzip der induktiven Erwärmung.....	16
4.2.2	Induktionsgesetz .....	18
4.2.3	Elektrischer Widerstand .....	19
4.2.4	Skin Effekt.....	20
4.2.5	Stromeindringmaß .....	21
4.2.6	Permeabilität.....	23
4.3	Wärmeerzeugung .....	25
4.3.1	Hystereseverluste.....	26
4.3.2	Wirbelstromverluste .....	26

---

4.4	Auslegungskriterien induktiver Erwärmanungsanlagen .....	26
4.4.1	Eindringmaß .....	26
4.4.2	Induktorwirkungsgrad .....	28
4.4.3	Induktorwiderstand .....	28
4.5	Induktoren .....	30
4.5.1	Längsfeldinduktor .....	30
4.5.2	Querfeldinduktor .....	30
4.5.3	Flächeninduktor .....	31
<b>5</b>	<b>Zielsetzung .....</b>	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>Beschreibung Versuchsanlage .....</b>	<b>33</b>
6.1	Umrichter .....	33
6.2	Induktoren .....	34
6.2.1	Längsfeldinduktor .....	34
6.2.2	Flächeninduktor .....	34
6.2.3	Querfeldinduktor .....	35
6.3	Transporteinrichtung .....	36
6.3.1	Transport mittels Kette .....	36
6.3.2	Transport mittels Hubbalken .....	37
<b>7</b>	<b>Methoden und Lösungswege .....</b>	<b>38</b>
7.1	Platinengeometrie .....	38
7.2	Grundlagen der Temperaturmessung .....	38
7.2.1	Temperaturmessung Thermokabel .....	39
7.2.2	Temperaturmessung Thermografiekamera .....	39
7.2.3	Temperaturmessung Pyrometer .....	40
7.3	Beschreibung der Einflussgrößen .....	41
7.4	Definition der Zielgrößen .....	42
7.5	Versuchsvorbereitung .....	42
<b>8</b>	<b>Versuchsdurchführung .....</b>	<b>45</b>
8.1	Charakterisierung Längsfeldinduktion .....	45
8.1.1	Auswahl der Vorschubgeschwindigkeit .....	45
8.1.2	Vorbereitung der Formplatine für die Versuche .....	45
8.1.3	Anlagentechnische Vorbereitung .....	46
8.1.4	Versuchsablauf .....	47

---

8.1.5	Erklärung Versuchsauswertung.....	47
8.1.5.1	Zieltemperatur 500°C .....	49
8.1.5.2	Zieltemperatur 600°C .....	51
8.1.5.3	Zieltemperatur Curie.....	53
8.2	Charakterisierung Flächeninduktion .....	55
8.2.1	Auswahl der Vorschubgeschwindigkeit.....	55
8.2.2	Einstellung der Frequenz .....	55
8.2.3	Anlagentechnische Vorbereitung .....	56
8.2.4	Versuchsablauf Abstandseinfluss .....	57
8.2.5	Abstandseinfluss 3 Kondensatoren .....	58
8.2.6	Abstandseinfluss 6 Kondensatoren .....	59
8.2.7	Auswertung Abstandseinfluss.....	60
8.3	Charakterisierung Quersfeldinduktion .....	61
8.3.1	Anlagentechnische Vorbereitung .....	61
8.3.2	Versuchsablauf.....	61
8.4	Kombination Längsfeldinduktion und Flächeninduktion .....	63
8.4.1	Anlagentechnische Vorbereitung .....	63
8.4.2	Versuchsablauf.....	64
8.4.3	Neuer Ansatz .....	73
8.5	Kombination Längsfeldinduktion und Quersfeldinduktion .....	77
8.5.1	Versuchsablauf.....	77
<b>9</b>	<b>Ergebnisdiskussion – Gegenüberstellung .....</b>	<b>81</b>
9.1	Messtechnik.....	81
9.1.1	Thermokabel.....	81
9.1.2	Wärmebildkamera.....	81
9.1.3	Pyrometer .....	81
9.2	Induktion .....	82
9.2.1	Längsfeldinduktor .....	82
9.2.2	Flächeninduktor .....	82
9.2.3	Quersfeldinduktor.....	82
9.2.4	Kombination Längsfeld- und Flächeninduktor .....	82
9.2.5	Kombination Längsfeld- und Quersfeldinduktor .....	83
9.3	Vorschubgeschwindigkeit.....	83
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>84</b>

Anhang.....	86
Abbildungsverzeichnis.....	103
Tabellenverzeichnis .....	105
Literaturverzeichnis .....	106

## Formelzeichen

A	$cm^2$	Fläche
B	$N/Am = Vs/m^2 = T$	magnetische Flussdichte
d	$m$	Blechstärke
f	$Hz$	Frequenz
H	$A/cm$	magnetische Feldstärke
I	$A$	Stromstärke
J	$A/mm^2$	Stromdichte
l	$m$	Länge
$p_h$	$W/kg$	Hystereseverlustleistung
$p_w$	$W/kg$	Wirbelstromverlustleistung
P	$W$	Leistung
$P'''$	$W/cm^2$	Volumenleistungsdichte
Q	$Nm =Ws = J$	Wärmemenge
R	$V/A = \Omega$	elektrischer Widerstand
t	$s$	Zeit
T	$K$	Temperatur
$U_{ind}$	$V$	Induzierte Spannung
W	$Nm =Ws = J$	Energie
$w_2$		Windungszahl der Sekundärspule
$\alpha$	$W/m^2K$	Wärmeübergangszahl
$\alpha_x$	$K^{-1}$	Temperaturkoeffizient bei Bezugstemperatur x
$\gamma$	$S/m$	elektrische Leitfähigkeit
$\delta$	$mm$	Stromeindringmaß

---

$\rho$	$\Omega mm^2/m$	spezifischer elektrischer Widerstand
$\lambda$	$W/mK$	Wärmeleitfähigkeit
$\mu$		Permeabilität
$\mu_0$	$\mu_0 = 1,257 * 10^{-6} \text{ Vs/Am}$	magnetische Feldkonstante
$\mu_r$		Permeabilitätszahl
$\pi$		Kreiszahl
$\sigma$	$W/m^2K^4$	Strahlungskonstante
$\Phi$	$Vs$	magnetischer Fluss

# 1 Einleitung

Die Automobilindustrie ist gefordert, die steigenden Sicherheitsanforderungen der Kunden, sowie alle gesetzlichen Vorschriften zu erfüllen. Von einem modernen Automobil wird erwartet, dass es dem steigenden Umweltbewusstsein der Bevölkerung Rechnung trägt, indem es weniger Kraftstoff verbraucht und weniger umweltschädigende Emissionen erzeugt. Um diese Ziele zu erreichen wird neben einer Effizienzsteigerung des Antriebs und des Fahrwerkes großer Wert auf eine Reduktion des Karosseriegewichtes gelegt. In der Karosserie liegt ein großes Gewichtseinsparungspotential, da dieses rund ein Viertel des Gesamtfahrzeuggewichtes ausmacht.

*Anforderungen Automobil*

Um den Konflikt zwischen einer erhöhten Insassensicherheit und einem reduzierten Karosseriegewicht zu lösen, werden vermehrt pressgehärtete Bauteile eingesetzt. Damit ist es möglich, höchstfeste und komplexeste Bauteile umzuformen, welche die geforderten Festigkeiten auch bei einer Blechdickenreduzierung erreichen.

*Konflikt Sicherheit Gewicht*

Zu bedenken ist, dass die Herstellung warmumgeformter Bauteile sehr energie- und kostenintensiv ist. In der Praxis erfolgt die Erwärmung mittels Strahlrohren in Hubbalken- oder Rollenherdöfen. Diese Öfen benötigen aufgrund der langen Erwärmungstrecke viel Platz, verursachen große Investitionskosten, bedürfen einer ständigen Wartung und verbrauchen sogar in den nicht produktiven Zeiten Energie.

*Herstellung energie- und kostenintensiv*

In dieser Diplomarbeit wird die Eignung, einer neuen Erwärmungstechnologie für die Warmumformung von Formplatinen untersucht.

*Neue Erwärmungstechnologie für Platinen*

Da der Trend klar in Richtung eines verstärkten Einsatzes von warmumgeformten Bauteilen geht, muss die Energiebilanz dieses Warmumformprozesses kritisch hinterfragt werden, nur wenn der Energieeinsatz in der Herstellung geringer ist als die Energieeinsparung während des Betriebes des Fahrzeuges, rechnet sich der Aufwand energetisch.

*Warmumgeformte Bauteile werden vermehrt eingesetzt*

Dies soll an einem kurzen Beispiel gezeigt werden, um ein Gefühl dafür zu bekommen, wie viel Kraftstoff durch den Einsatz von gewichtsreduzierten warmumgeformten Bauteilen eingespart werden kann .

*Beispiel zur Treibstoffeinsparung bei einer Gewichtsreduktion*



	% Treibstoffeinsparung / % Gewichtsreduktion	
	Personenkraftwagen – EPA kombinierter Fahrzyklus	
	Herkömmlicher Motor	Verkleinerter Motor
<b>Diesel</b>	0,33%	0,65%
<b>Benzin</b>	0,39%	0,63%

Tabelle 1 Verhältnis Treibstoffeinsparung zu Gewichtsreduktion [1]

Die in Tabelle 1 angeführten Werte stammen aus einem Forschungsbericht, bei dem der Einfluss der Gewichtsreduktion auf den Kraftstoffverbrauch, bei unterschiedlichen Fahrzeugkonzepten untersucht wurde. Hiermit können nun Rückschlüsse auf die zu erwartenden Treibstoffeinsparung durch den Einsatz von pressgehärteten Bauteilen gezogen werden. Als Beispiel wird eine aktuelle VW Passat Limousine mit der Bezeichnung B6 verwendet. Durch den Einsatz von pressgehärteten Bauteilen konnte die Karosserie im Vergleich zum Vorgängermodell um 25kg leichter aufgebaut werden.[2]

*Werte von VW Passat Limousine B6*

Das aktuelle Modell hat ein Leergewicht von 1418kg mit einem 75kW starken 4 Zylinder Benzin Ottomotor. Daraus ergibt sich eine Gewichtsreduktion von 1,73% zum Vorgängermodell. Da aufgrund der Einsparung von 25kg nicht anzunehmen ist, dass ein kleinerer Motor Verwendung findet, wird nach Tabelle 1 mit einem Wert von 0,39% für einen herkömmlichen Benzinmotor gerechnet. Somit ergibt sich eine Treibstoffeinsparung in der Größe von 0,6747%, was bei einem angegebenen Treibstoffverbrauch von 7,6 Liter auf 100km einer Ersparnis von 0,05127 Liter entspricht.[3]

*Berechnung Treibstoffeinsparung*

Rechnet man das auf eine angenommene Lebenslaufleistung von 300.000km hoch, so ergibt sich eine Ersparnis von rund 154 Liter Kraftstoff. Dies soll anzeigen, dass sich der Aufwand und der Energieeinsatz in der Herstellung von warmumgeformten Bauteilen nur rechnen, wenn es zu einer tatsächlichen Energieeinsparung während des Betriebs des Fahrzeuges kommt. Aus diesen Überlegungen ist ersichtlich, dass bereits in der Produktion so wenig Energie und diese so effizient wie möglich eingesetzt werden soll.

*Kraftstoffeinsparung von 154 Liter auf 300000km*

## 2 Ausgangssituation

### 2.1 Einteilung der Stähle

Stähle werden im Allgemeinen nach ihrer Zugfestigkeit in folgende Klassen nach Tabelle 2 eingeteilt.

*Einteilung Stähle*

Einteilung	Zugfestigkeit [MPa]
Höherfeste Stähle	von 270 bis 550
Hochfeste Stähle	von 550 bis 700
Höchstfeste Stähle	über 700

Tabelle 2 Einteilung der Stähle [4] S. 438

### 2.2 Entwicklung Presshärten

Als Erfinder des Presshärteverfahrens für automotive Bauteile wird der schwedische Stahlhersteller SABB im Jahre 1975 angeführt [5].

*Geschichtlicher Hintergrund Presshärten*

Bereits Anfang der 70er Jahre wurde in Schweden, an der Technischen Universität Luleå, bezüglich der Einsatzmöglichkeiten von gehärteten, warmumgeformten Borstählen geforscht. Der Hintergrund war damals jedoch, dass man verschleißfeste Bauteile für landwirtschaftliche Geräte benötigte. Ende der 80er Jahre, wurde erstmals der Einsatz von pressgehärteten Bauteilen in Automobilen erwägt, da in den USA erhöhte Seiten-crash-Anforderungen gesetzlich vorgeschrieben wurden.[2]

Im Jahr 2004 hat es weltweit bereits 50 Warmformlinien gegeben, im Jahr 2009 waren es bereits 110 Stück [6][7]. Der verstärkte Einsatz von warmumgeformten Bauteilen zeigt sich auch im folgenden Beispiel. Im Jahr 2003 wurden in der Karosserie eines VW Golf nur 1% höchstfeste Stähle verbaut, im aktuellen VW Passat CC werden bereits über 81 Prozent höher- und höchstfeste Stahlgüten verwendet, 16 Prozent entfallen davon auf pressgehärtete Bauteile.[8]

*Verstärkter Einsatz warmumgeformter Bauteile*

### 2.3 Anwendung

Die als Presshärten bezeichnete Fertigungstechnologie wird eingesetzt um höchstfeste Bauteile mit bis zu 1700MPa Zugfestigkeit und einer komplexen Geometrie herzustellen [4]. Verwendet wird dafür der aushärtbare Vergütungsstahl mit der Bezeichnung 22MnB5 und der Werkstoffnummer 1.5528. Die Besonderheit dieses Werkstoffes ist der geringe Zusatz von 0,005 Prozent Bor, erst dieser macht die Härtung trotz eines geringen Kohlenstoffgehaltes möglich. Auf dem Markt ist dieser Werkstoff, nach Tabelle

*Höchstfeste Bauteile mit komplexer Geometrie*

3, unter folgenden Handelsnamen mit unterschiedlichen Beschichtungen bekannt.

Hersteller	Handelsnamen	Beschichtung
Voestalpine	Ultraform	Zn
Arcelor	Usibor 1500P	AlSi
Benteler	BTR 165	AlSi
ThyssenKruppSteel	MBW 1500	AlSi
ThyssenKruppSteel	MBK 1500	unbeschichtet

Tabelle 3 Hersteller und Handelsnamen von 22MnB5 [9]

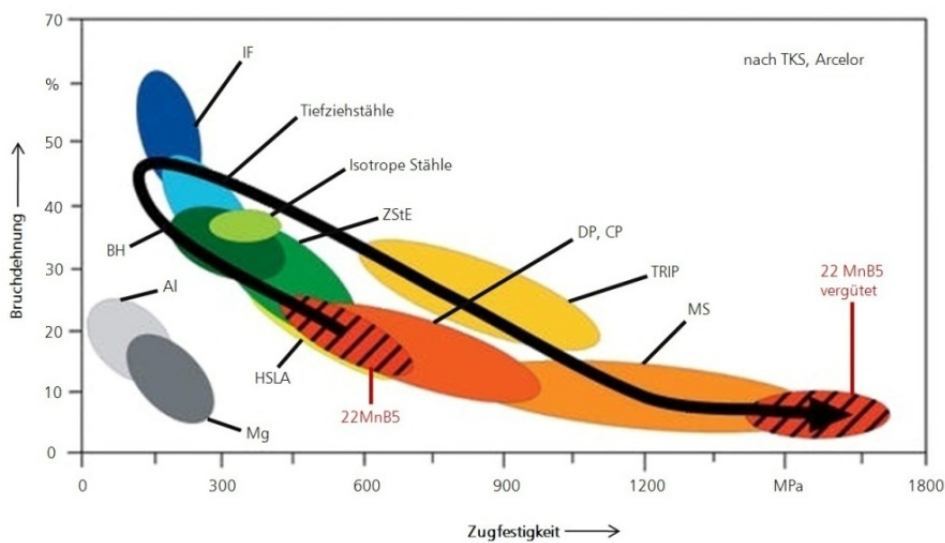


Abbildung 1 Umwandlung der Eigenschaften von 22MnB5 (1)

Wie auf Abbildung 1 ersichtlich ist, hat der Werkstoff im warmgewalzten Ausgangszustand eine Zugfestigkeit von etwa 600MPa. Dabei liegt ein ferritisch-perlitisches Gefüge vor. Der Werkstoff wird zuerst über die Austenitisierungstemperatur erwärmt. Diese auch mit AC3 bezeichnete Temperatur liegt bei rund 820°C, jedoch wird in der Regel auf eine Temperatur von 950°C erwärmt, da aufgrund des Handlings der Platine von der Erwärmungseinrichtung in das Werkzeug rund 20°C pro Sekunde bei einer 1,5mm starken Platine an der Luft verloren gehen [9]. Nach dem Einlegen in das Werkzeug wird die Platine umgeformt und im geschlossenen und gekühlten Werkzeug gehalten und gehärtet. Die Martensitbildung ist abgeschlossen, wenn auf der ganzen Platine die Martensitfinishtemperatur erreicht wird, diese liegt bei rund 190°C [9]. Aus Abbildung 2 ist ersichtlich, dass eine Mindestabkühlrate von 27°K/s erreicht werden muss, um eine vollständige Martensitbildung zu gewährleisten.

*Veränderung der Werkstoffeigenschaften im Presshärtprozess*

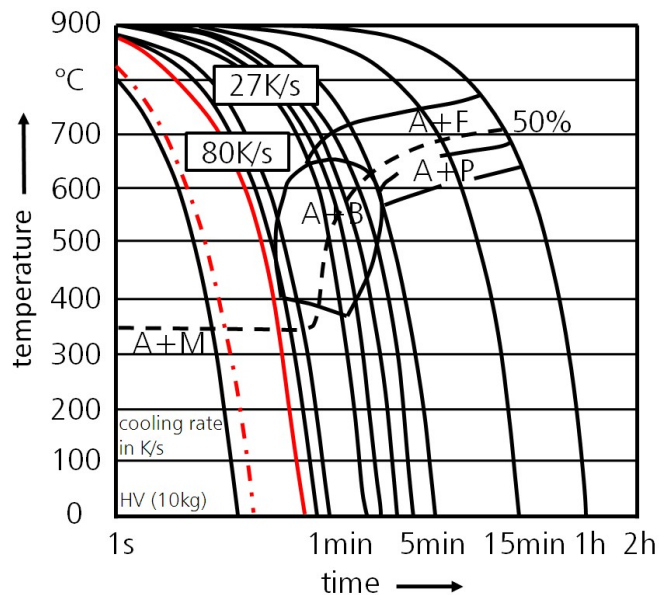


Abbildung 2 ZTU-Schaubild von 22MnB5 [10] S.145

Für die Herstellung von pressgehärteten Bauteilen werden zwei unterschiedliche Verfahren verwendet.

### 2.3.1 Direktes Presshärten

Direktes Presshärten ist dadurch gekennzeichnet, dass die Platine zuerst auf Austenitisierungstemperatur erwärmt wird. Die erwärmte Platine wird daraufhin so schnell wie möglich vom Ofen zur Presse befördert und dort im gekühlten Werkzeug umgeformt und gehärtet. Dieser Ablauf wird schematisch in Abbildung 3 gezeigt.[11]

*Ablauf direktes Presshärten*

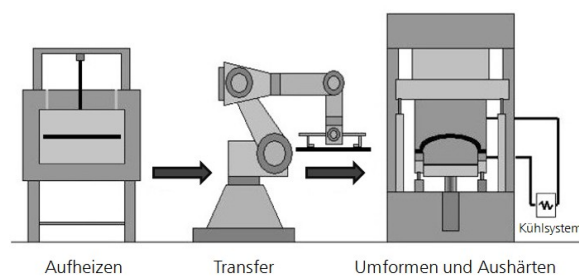


Abbildung 3 Direktes Presshärten [11] S. 6

### 2.3.2 Indirektes Presshärten

Als Indirektes Presshärten wird das Verfahren nach Abbildung 4 bezeichnet. Hierbei wird eine noch kalte Platine in einem ersten Schritt fast vollständig umgeformt. Danach wird sie über die Austenitisierungstemperatur erwärmt und in einem letzten Bearbeitungsschritt fertiggezogen oder kalibriert und im gekühlten Werkzeug ausgehärtet.[11]

*Ablauf indirektes Presshärten*

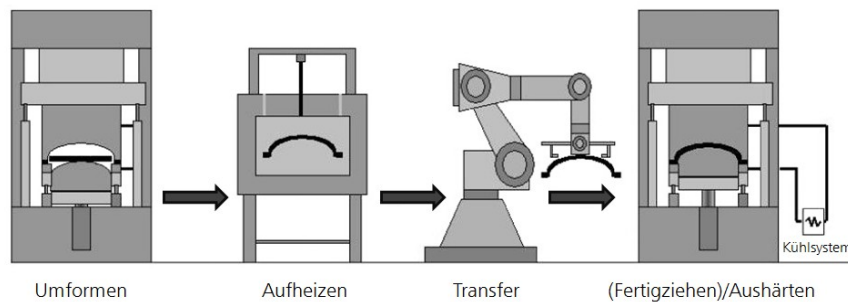


Abbildung 4 Indirektes Presshärten [11] S. 7

### 2.4 Verbreitung und Ausblick

Formgehärtete Bauteile werden wie in Abbildung 5 ersichtlich, schon bei einer großen Anzahl von sicherheitsrelevanten Bauteilen eingesetzt. Hierzu zählen: A-Säulenverstärkungen, Stoßfänger, B-Säulen, Tunnel, Querträger und auch Dachträger.

*Anwendungsbeispiele*



Abbildung 5 Karosserie Passat Variant [12] S. 31

Einige Automobilhersteller sind der Meinung, dass es in Zukunft möglich ist, das Gesamtfahrzeuggewicht um über 40% im Vergleich zu heutigen Fahrzeugen zu reduzieren. Dabei spielt der Einsatz von pressgehärteten Bauteilen eine ausschlaggebende Rolle. Es wird davon ausgegangen, dass

*Ausblick über die Verwendung pressgehärteter Bauteile in der Zukunft*

---

der Anteil pressgehärteter Bauteile in Fahrzeugen von aktuell ca. 5-10 Prozent auf bis zu 35-40 Prozent ansteigen wird.[13]

Ein Nachteil der pressgehärteten Bauteile liegt in ihrer geringen Bruchdehnung. In vielen sicherheitsrelevanten Bauteilen wird eine Kombination aus einer hohen Festigkeit und einer hohen Energieaufnahme in gewissen Bereichen gefordert. Als Beispiel sei eine B-Säule angeführt, die im unteren Bereich im Falle eines Unfalles Energie durch Verformung aufnehmen soll. Im oberen Bereich muss eine hohe Festigkeit gewährleistet sein, damit hier keine Verformung stattfindet, da diese zu schweren Verletzungen am Oberkörper des Insassen führen würde.

*Geringe Bruchdehnung  
pressgehärteter Bauteile*

Diese Kombination wird von ThyssenKrupp als Hotform Blanks bezeichnet. Bei diesen zugeschnittenen und verschweißten Platinen gibt es zwei Ausführungsmöglichkeiten. Auf der einen Seite wird das gleiche Material in unterschiedlichen Blechstärken in einem Bauteil kombiniert, auf der anderen Seite werden verschiedene Werkstoffe in einem Bauteil zusammengefügt. Dazu wird neben einem Mangan Bor Stahl eine andere Stahlgüte verwendet, die sich weniger gut aushärten lässt, dadurch eine geringere Festigkeit aufweist, jedoch entschieden mehr Energie aufnehmen kann. Die Kombination von unterschiedlichen Werkstoffen wurde erstmals von Audi in einer B-Säule in einer Serienfertigung angewendet. Damit ist es möglich, ein Bauteil zu erhalten, das bei einer konstanten Blechstärke von 1,5mm im unteren Drittel eine Zugfestigkeit von ca. 500MPa und eine Restbruchdehnung von 15% aufweist. Im oberen Bereich der B-Säule werden Zugfestigkeiten bis zu 1500MPa erreicht.[14]

*Hotform Blanks*

Auch aus den neueren Entwicklungen ist klar erkennbar, dass die Warmumformung die Fertigungstechnologie der Zukunft ist, um höchstfeste Bauteile mit kleinstmöglichem Gewicht zu fertigen.

## 3 Stand der Technik

### 3.1 Grundlagen Wärmeübertragung

Bei der induktiven Erwärmung entsteht die Wärme direkt im Körper, sie wird nicht durch Konvektion, Wärmeleitung oder Wärmestrahlung übertragen. Jedoch spielen diese drei Wärmeübertragungsarten bei der induktiven Erwärmung von Formplatinen eine große Rolle in, da die Energie in einer erwärmten dünnen Platine aufgrund von Konvektion, Wärmeleitung und Wärmestrahlung sehr schnell verloren geht.

*Energie wird durch Konvektion, Wärmestrahlung und Wärmeleitung abgeführt*

#### 3.1.1 Konvektion

Als Konvektion wird der Energietransport zwischen zwei Orten verstanden. Voraussetzung für die konvektive Wärmeübertragung ist eine Berührung des wärmeabgebenden und wärmeaufnehmenden Körpers. Des Weiteren muss ein Stoffstrom vorhanden sein, der die thermische Energie mitführt. Daraus ist ersichtlich, dass es keine Wärmeübertragung mittels Konvektion im Vakuum oder bei nicht-permeablen Festkörpern gibt. Da für die konvektive Wärmeübertragung eine Strömung vorhanden sein muss, wird die Konvektion nun nach dem Grund für die Strömung unterteilt. Hierbei wird zwischen einer freien oder natürlichen Konvektion und einer erzwungenen Konvektion unterschieden.

*Konvektive Wärmeübertragung*

Als Beispiel für die freie Konvektion wird der Auf- und Abtrieb eines Fluids angeführt, das durch eine unterschiedliche Temperatur- und Dichteverteilung eine Ausgleichsströmung hervorruft. Die erzwungene Konvektion entsteht durch eine von außen erzeugte Strömung. Als Beispiel hierfür gilt der Einsatz eines Gebläses oder eines Ventilators.

*Freie und erzwungene Konvektion*

Als Maß für die Konvektion gilt die Wärmeübergangszahl  $\alpha$ . Sie ist neben der Geschwindigkeit des umströmenden Mediums auch von der Gestalt, der Lage und der Oberflächenbeschaffenheit des Werkstückes abhängig. Die übertragene Wärme wird nach Formel (1) berechnet.

*Wärmeübergangszahl  $\alpha$*

$$P = \alpha A t (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Ein konvektiver Wärmeübergang tritt bei einer induktiven Erwärmung von Platinen immer auf, da die umgebende Luft annähernd Raumtemperatur aufweist. Bereits aus den Temperaturunterschieden der die heiße Platine umgebenden Luft folgt eine Dichteänderung. Aufgrund dieser Dichteänderung entsteht ein Luftstrom, der Energie durch Konvektion von der Platine abführt.

### 3.1.2 Wärmeleitung

Wärmeleitung beschreibt den Vorgang des Wärmeflusses in einem Feststoff oder einem ruhenden Fluid. Die Wärme fließt dabei immer von einem Bereich mit hoher Temperatur zu einem Bereich mit niedriger Temperatur. Bei diesem Wärmeausgleich geht keine Wärmeenergie verloren, es wird Energie ohne den Transport von Teilchen an einen anderen Ort übertragen.

*Wärmeleitung*

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  gibt die Wärmemenge an, die einen  $1\text{ m}^2$  großen und 1 Meter dicken Werkstoff, bei einem Temperaturunterschied von 1K auf beiden Seiten überwindet. Die Wärmemenge, die durch Wärmeleitung übertragen wird, lässt sich nach folgender Formel (2) berechnen.

*Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$*

$$Q = \frac{\lambda A t (T_2 - T_1)}{l} \quad (2)$$

Im Warmformprozess ist auf die Wärmeleitung und die damit verbundenen Verluste besondere Rücksicht zu nehmen. Wärmeleitungsverluste treten bei der Beförderung der Platine durch die Erwärmungsanlage an den Auflageflächen auf, des Weiteren an den Haltepunkten beim Transport der Platine von der Erwärmungsanlage in das Werkzeug und auch an den Auflageflächen im Werkzeug selbst. Es ist speziell darauf zu achten, dass durch Wärmeleitung die Temperatur auf der Platine nicht zu stark abfällt, da sonst eine vollständige Martensitumwandlung des Materials nicht möglich ist.

*Wärmeleitung im Warmformprozess*

### 3.1.3 Wärmestrahlung

Als Wärmestrahlung bezeichnet man die Emission von elektromagnetischen Wellen eines Körpers. Jedem Körper ist es möglich, Energie durch Strahlung aufzunehmen und abzugeben. Von Wärmestrahlung wird gesprochen, wenn der Wellenlängenbereich zwischen  $0,3\mu\text{m}$  und  $50\mu\text{m}$  liegt.[15] Damit ist auch eine Wärmeübertragung zwischen zwei Orten im Vakuum möglich. Die Wärmestrahlung wird von drei Größen beeinflusst, nämlich dem Transmissions-, dem Reflexions- und dem Absorptionskoeffizient. Der Transmissionskoeffizient gibt den Prozentsatz an, welcher Anteil der Strahlung durchgelassen wird, der Reflexionskoeffizient gibt Auskunft über den Anteil der reflektierten Strahlung und der Absorptionskoeffizient gibt Auskunft über den Anteil der Strahlung der im Körper in Wärme umgesetzt wird.

*Wärmestrahlung*

Generell gilt, dass helle und blanke Oberflächen im Gegensatz zu schwarzen und rauen Oberflächen Wärme schlecht abstrahlen. Ein Körper mit einem großen Absorptionsvermögen hat auch ein großes Emissionsvermögen. Die Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers wird nach dem Stefan-Boltzmannschen-Gesetz nach Formel (3) berechnet. Der schwarze Körper nimmt aufgrund der Umgebungstemperatur Wärmestrahlung auf, dies

*Idealer Strahler*



wird in der Formel mit der Einbeziehung der Umgebungstemperatur berücksichtigt.  $\sigma = 5,67032 * 10^{-8}$

$$P = \sigma A t (T^4 - T_u^4) \quad (3)$$

Jede erwärmte Platine gibt Energie durch Wärmestrahlung ab, dies führt zu einem Absinken der Temperatur. Die emittierte Strahlung wird für eine Temperaturmessung mittels Pyrometer und mittels Wärmebildkamera verwendet.

## 3.2 Konventionelle Ofenanlagen

Als konventionelle Öfen werden die für die Erwärmung von pressgehärteten Bauteilen bereits eingesetzten Anlagen bezeichnet. Der Gesamtwirkungsgrad einer konventionellen Ofenanlage liegt bei rund 55 Prozent. Obwohl der feuerungstechnische Wirkungsgrad bei einer Beheizung mit Strahlrohren mit bis zu 80 Prozent angegeben wird, kommt es aufgrund von Stillstandzeiten, in denen die Anlage nicht komplett abgekühlt werden kann, zu einer Verminderung des Gesamtwirkungsgrades. Als Beispiel sei hier ein Rollenherdofen angeführt. Dieser wird für Wartungszwecke nicht unter 700°C abgekühlt, da sonst die Keramikrollen im Ofen aufgrund von Verunreinigungen an der Oberfläche, bei einer Abkühlung auf Raumtemperatur, brechen würden.[7]

*Konventionelle Ofenanlagen*

Die Anlagen werden auf der einen Seite nach der Erwärmungstechnologie und auf der anderen Seite nach der Transportart der Platine eingeteilt.

### 3.2.1 Erwärmungstechnologie

Ältere Öfen wurden mit offener Flamme beheizt um den Einsatz von teuren Strahlrohrbrennern zu umgehen. Heutzutage werden in den Erwärmungsanlagen für das Presshärten ausschließlich Strahlrohre verwendet. Durch deren Einsatz ist es möglich, die Wasserstoffversprödung der erwärmten Bauteile durch die offene Flamme zu verhindern.

*Beheizung der Öfen*

Durch chemische Reaktionen wird atomarer Wasserstoff gebildet, dieser diffundiert in den Werkstoff ein und setzt sich an Fehlstellen, wie Versetzungen oder Mikrolunkern, ab. Dort rekombiniert der atomare Wasserstoff zu molekularem Wasserstoff. Durch diesen Vorgang entstehen starke Spannungen, die zu einer Versprödung des Werkstoffes und bei zusätzlichen Zugspannungen zu einer Rissbildung vor allem bei hochfesten Stählen führen.[16]

*Wasserstoffversprödung*

Durch den Einsatz von Strahlrohren kann die Erwärmung unter Schutzgas stattfinden, um die Zunderbildung an der Oberfläche der Bauteile zu vermeiden. In Bereichen mit niedrigem Energiebedarf werden offene Elektroheizungen verwendet.[17]

*Erwärmung unter Schutzgas*

### 3.2.2 Rollenherdöfen

Für die Erwärmung beim Presshärteprozess werden hauptsächlich Rollenherdöfen eingesetzt. Hierbei wird das zu erwärmende Gut entweder direkt oder in einem Warenträger auf den Rollen durch den Ofen befördert. Moderne Rollenherdöfen werden mit mehreren Rollenbahnen übereinander ausgeführt, um die Baulänge des Ofens kurz zu halten. Rollenherdöfen sind die zurzeit einzigen Öfen, die vollkommen schutzgastauglich sind.[18]

*Rollenherdöfen*

### 3.2.3 Hubbalkenöfen

Hubbalkenöfen sind gekennzeichnet durch eine aufwändige und teure Transportmechanik. Aus diesem Grund ist es auch nicht möglich, mehrere Ebenen übereinander auszuführen, was einen großen Platzbedarf solcher Anlagen zur Folge hat. Weitere Nachteile sind die schlechte Schutzgasdichtigkeit, die schwer zu realisierenden veränderlichen Transportgeschwindigkeiten und die schwierige Wartung.[17]

*Hubbalkenöfen*

## 3.3 Alternative Erwärmungskonzepte

### 3.3.1 Konduktive Erwärmung

Bei der konduktiven Erwärmung handelt es sich um eine direkte Widerstandserwärmung. Das zu erwärmende Gut ist ein Teil des Stromkreises, daher lassen sich nur elektrisch leitfähige Materialien erwärmen. Probleme entstehen bei der Übertragung des Stromes, da es an den Kontaktflächen zu einer Einschnürung des stromführenden Querschnittes kommt und damit verbunden zu einer unterschiedlichen Temperaturentwicklung im Werkstück. Aus Abbildung 6 ist erkennbar, dass diese Einschnürung durch eine angepasste Geometrie der Kontaktflächen verhindert werden kann. Des Weiteren wird die Stromübertragung durch den verwendeten Kontaktwerkstoff, die Oberflächenbeschaffenheit und dem Anpressdruck beeinflusst.[19]

*Konduktive Erwärmung nur für elektrisch leitfähige Materialien*

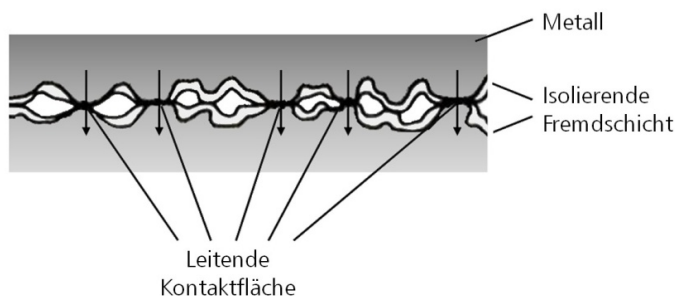


Abbildung 6 Realer Kontakt bei konduktiver Erwärmung [15] S. 317

Aus den oben genannten Gründen ist erkennbar, dass sich eine Formplatte zwar konduktiv erwärmen lässt, jedoch kann keine homogene Temperaturverteilung auf der Platine erreicht werden. Somit ist diese Erwärmungstechnologie für den Warmformprozess nicht verwendbar.

*Problem der homogenen Temperaturverteilung*

### 3.3.2 Erwärmung mittels Infrarotstrahler

Bei der Erwärmung mit einem Infrarotstrahler wird die Energie mittels elektromagnetischer Strahlung übertragen. Die verwendete Wellenlänge liegt in einem Bereich zwischen  $0,75\mu\text{m}$  und  $100\mu\text{m}$ . Für die Erwärmung von Werkstücken werden Strahler mit einer Wellenlänge von über  $3\mu\text{m}$  verwendet, wobei hiermit Oberflächentemperaturen auf keramischen Infrarotstrahlern von  $1000\text{K}$  erreicht werden. Die übertragbare Leistung von Infrarotstrahlern hängt stark von der Strahlungscharakteristik und dem Absorptionsvermögen der beteiligten Werkstoffe ab. Als Beispiel sei in Abbildung 7 ein keramischer Infrarotstrahler angeführt. Beim Infrarotstrahler wird die Heizwendel in eine keramische Masse eingebettet, dadurch lassen sich die Strahler in unterschiedlichsten Formen herstellen. Ein weiterer Vorteil der keramischen Strahler liegt in der Integration der Thermoelemente im Strahler zur Temperaturregelung. Die maximal übertragbare Flächenleistungsdichte lässt sich mit kurzwelligem Strahlern im Wellenlängenbereich von  $1\mu\text{m}$  erreichen, hiermit können bis zu  $300\text{kW}/\text{m}^2$  übertragen werden. Bei langwelligem Infrarotstrahlern liegt die maximal übertragbare Flächenleistungsdichte bei  $60\text{kW}/\text{m}^2$ , hiermit stellt sich eine homogenere Temperatur auf dem Werkstück ein.[15]

*Erwärmung mittels Infrarotstrahler*

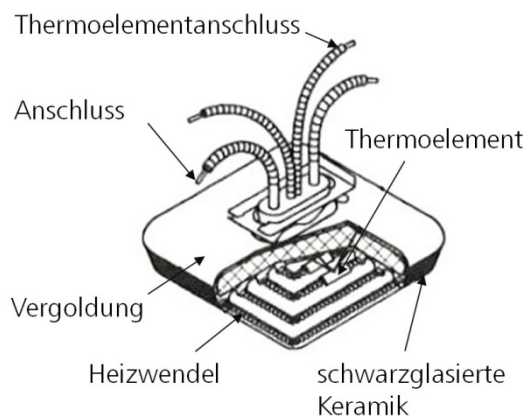


Abbildung 7 Keramischer Infrarotstrahler [15] S. 486

Die Erwärmung mittels Infrarotstrahler hat ihr Hauptanwendungsgebiet in der Trocknung von lackierten Oberflächen. Auch durch den Einsatz von kurzwelligem Strahlern mit einer Leistungsdichte bis zu  $300\text{kW}/\text{m}^2$  ist es nicht möglich große Bauteile in kurzer Zeit auf die geforderten Temperaturen für die Warmumformung zu erwärmen.

*Anwendung*

## 4 Induktionserwärmung

Bei der Induktionserwärmung wird die Energie aufgrund des magnetischen Wechselfeldes übertragen. Die Erwärmung erfolgt direkt im Werkstück, die Wärme muss nicht durch Konvektion, Strahlung oder Wärmeleitung übertragen werden. In Tabelle 4 sind die übertragbaren Leistungen für unterschiedliche Erwärmungsarten dargestellt. Mittels Induktion können Leistungen bis zu 300000 kW/m<sup>2</sup> übertragen werden, daraus resultieren extrem kurze Aufheizzeiten.

*Energieübertragung*

Erwärmungsart	Leistungsübertragung [kW/m <sup>2</sup> ]
Konvektion	5
Strahlung	80
Wärmeleitung	200
Flamme	10.000
Induktionserwärmung	300.000

Tabelle 4 Übertragbare Leistung [20] S. 12

### 4.1 Verwendung von induktiven Erwärmungsanlagen

Der große Vorteil von induktiven Erwärmungsanlagen liegt in der fast unendlichen Energiedichte, den kurzen Erwärmungszeiten, dem guten Wirkungsgrad, der guten Prozesskontrolle, dem geringen Platzbedarf und der guten Variabilität der Anwendungen.[20]

*Vorteile der induktiven Erwärmung*

Die Induktionserwärmung wird nach ihren Anwendungen in folgende Punkte unterteilt:

- induktive Erwärmung von Festkörpern
- induktive Erwärmung zum Schmelzen

Zur induktiven Erwärmung von Festkörpern zählen das Härten, Anlassen, Glühen, Vorwärmen zum Schweißen, induktives Erwärmen zum Fügen und Trennen, Löten, Schweißen, Fügen und Lösen geschrumpfter Pressverbindungen, Erwärmen zum Warmumformen, Schmieden, Strangpressen, Walzen, induktive Kesselbeheizung, Erwärmen zum Sintern, Erwärmen zum Beschichten, Erwärmen von Klebeverbindungen, Erwärmen zum Richten und die Erwärmung zum Stanzen.

*Anwendungsbeispiele*

Zur induktiven Erwärmung zum Schmelzen zählen die Erwärmung im Induktions-Tiegelofen und die Erwärmung im Induktions-Rinnenofen.

Die Induktionsanlagen können ebenfalls nach der eingesetzten Frequenz nach Tabelle 5 unterteilt werden.

*Einteilung nach Frequenz*

Niederfrequenz	bis 60 Hz
Mittelfrequenz	über 60 Hz bis 10 kHz
Hochfrequenz	über 10 kHz

Tabelle 5 Einteilung der Frequenzbereiche [22] S. 20

## 4.2 Physikalische Grundlagen

### 4.2.1 Prinzip der induktiven Erwärmung

Mit folgenden physikalischen Grundsätzen wird die Induktion erklärt.

Ein mit Wechselstrom durchflossener elektrischer Leiter bildet ein magnetisches Wechselfeld aus, das mit der Wechselstromfrequenz schwingt. Abbildung 8 zeigt die Ausbildung des magnetischen Wechselfeldes anhand eines elektrischen Leiters, der zu einer Spule geformt ist.

*Entstehung des magnetischen Wechselfeldes*

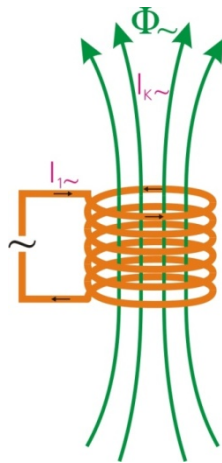


Abbildung 8 Magnetisches Wechselfeld einer Spule [22] S. 8

Wird ein zweiter Leiter in das magnetische Wechselfeld gebracht, so wird nach Abbildung 9 in diesem eine Spannung induziert, die wiederum einen Wechselstrom erzeugt, der immer in entgegengesetzter Richtung zum ersten Leiter fließt, dies wird als Lenz'sche Regel bezeichnet.

*Spannung induziert*

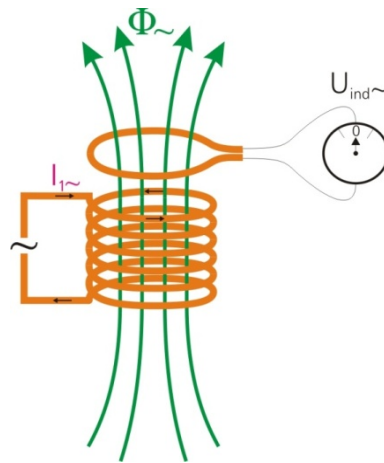


Abbildung 9 Leiter im magnetischen Wechselfeld [22] S. 8

Sind ein entsprechendes Querschnittsverhältnis der beiden Leiter und ein genügend großer Strom vorhanden, so ist es möglich, den zweiten Leiter bis zum Schmelzen zu erwärmen.

Bei der Erwärmung muss zwischen ferromagnetischen und nicht ferromagnetischen Werkstoffen unterschieden werden.

Die Erwärmung bei nichtferromagnetischen Stoffen lässt sich nach dem Joule'schen Gesetz nach Gleichung (4) beschreiben. Wird ein Metall mit dem elektrischen Widerstand  $R$  von einem Strom  $I$  durchflossen, so entsteht die elektrische Leistung  $P$ . Diese Leistung wird in Heizleistung umgesetzt.

*Erwärmung nichtferromagnetischer Stoffe*

$$P = R * I^2 \quad (4)$$

Fließt der Strom eine gewisse Zeit „ $t$ “ durch den Leiter, so wird in diesem die elektrische Energie nach Gleichung (5) erzeugt.

*Elektrische Energie*

$$W = R * I^2 * t \quad (5)$$

Aus Gleichung (5) wird nun die elektrische Energie  $W$  mit der Wärmemenge  $Q$  gleichgesetzt, das führt zu Gleichung (6).

*Wärmemenge*

$$Q = R * I^2 * t \quad (6)$$

Bei der Induktionserwärmung nimmt ein elektrisch leitendes Werkstück den Platz des zweiten Leiters ein. Der Induktor wird immer dem zu erwärmenden Werkstück angepasst. Dies lässt sich vor allem sehr gut, wie auf Abbildung 10 gezeigt wird, für die Erwärmung eines zylindrischen Werkstückes umsetzen.

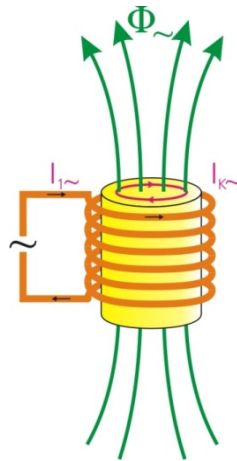


Abbildung 10 Induktive Erwärmung eines Metallzylinders [22] S. 10

Eine Induktorspule mit  $n$  Windungen würde den Sekundärstrom im Werkstück proportional zur Windungszahl ansteigen lassen, jedoch wird das aufgrund des magnetischen Streuflusses verhindert.

*Streufluss*

Oftmals ist es angebracht, anstatt der Gleichung (4) mit der Volumenleistungsdichte oder Wärmequellendichte nach Gleichung (7) zu rechnen. Dies ergibt sich aus der Erkenntnis, dass der elektrische Widerstand über die gesamte Querschnittsfläche des Leiters bei der Erwärmung nur schwer ermittelt werden kann. Außerdem ist der induzierte Strom nicht gleichmäßig über den Leiterquerschnitt verteilt.

*Volumenleistungsdichte*

$$P''' = \rho * J^2 \quad (7)$$

Die umgesetzte Leistung wird nach Gleichung (7) mittels der induzierten Stromdichte berechnet. Die Volumenleistungsdichte gibt die Verlustleistung der Wirbelströme an.

#### 4.2.2 Induktionsgesetz

$$U_{ind} = -w_2 * \frac{d\phi}{dt} \quad (8)$$

Aus der Gleichung (8) ist ersichtlich, dass die induzierte Spannung gleich dem Produkt aus der Windungszahl und der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses ist.

*Induktionsgesetz*

$$B = \mu_0 * H \quad (9)$$

Die Gleichung (9) ist nur für Berechnungen im leeren Raum gültig. Hierbei ist die magnetische Flussdichte gleich dem Produkt der magnetischen Feldkonstante und der magnetischen Feldstärke. Treten magnetische Felder innerhalb des Körpers auf, so ist die Formel (10) zu verwenden. Hierbei

*Magnetische Flussdichte*

wird, wie in Gleichung (11) ersichtlich, die Permeabilität  $\mu$  als Produkt der magnetischen Feldkonstante  $\mu_0$  und der Permeabilitätszahl  $\mu_r$  gebildet. Die Permeabilitätszahl berücksichtigt die speziellen magnetischen Materialeigenschaften.[23]

$$B = \mu * H \quad (10)$$

$$\mu = \mu_0 * \mu_r \quad (11)$$

$$\phi = B * A \quad (12)$$

Wird die magnetische Flussdichte nach Gleichung (9) in die Gleichung (12) eingesetzt, so kann die induzierte Spannung zu Gleichung (13) erweitert werden. *Induzierte Spannung*

$$U_{ind} = -w_2 * \mu_0 * A * \frac{dH}{dt} \quad (13)$$

### 4.2.3 Elektrischer Widerstand

Der elektrische Widerstand  $R$  und der spezifische elektrische Widerstand  $\rho$  nehmen mit steigender Temperatur zu. Der Zusammenhang zwischen dem elektrischen und dem spezifischen elektrischen Widerstand ist in Gleichung (14) ersichtlich.[24] *Elektrischer Widerstand*

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (14)$$

Diese Temperaturabhängigkeit beruht auf einer stärkeren Behinderung der Beweglichkeit der Ladungsträger, da die auf ihren Plätzen sitzenden Atome und Ionen bei höheren Temperaturen stärker schwingen. Der Temperatureinfluss auf den elektrischen Widerstand kann nach Gleichung (15) für Metalle als Gerade, aber nur in einem Temperaturbereich zwischen 200 und 400K linear angenähert werden. Hierbei ist  $\alpha$  der Temperaturkoeffizient, der aus Tabellen für den jeweiligen Werkstoff entnommen wird.[24] *Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes*

$$R_{\vartheta} = R_{\vartheta_0} [1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0)] \quad (15)$$



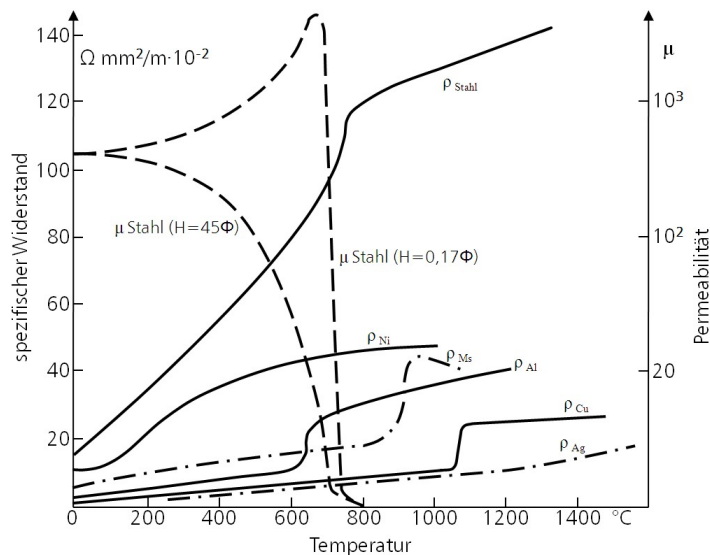


Abbildung 11 Spezifischer Widerstand und Permeabilität verschiedener Werkstoffe in Abhängigkeit von der Temperatur [20] S. 15

#### 4.2.4 Skin Effekt

Als Skin Effekt wird eine Stromdichteabnahme in einem von Wechselstrom durchflossenen elektrischen Leiter in radialer Richtung von außen nach innen bezeichnet. Tritt ein starker Skin-Effekt in einem Leiter auf, so lässt sich die Stromdichteverteilung näherungsweise mit einer Exponentialfunktion, wie in Abbildung 12 ersichtlich ist, beschreiben. Nach Gleichung (7) steigt die Volumenleistungsdichte proportional der Stromdichte zum Quadrat. Daraus ist erkennbar, dass auch ein Großteil der Wärme in einem Leiter nur im Randbereich erzeugt wird.[22]

*Stromdichteabnahme in radialer Richtung*

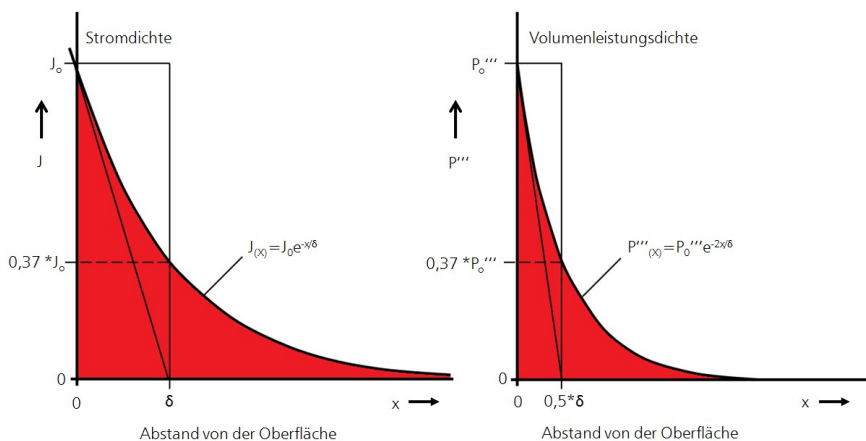


Abbildung 12 Stromdichte und Volumenleistungsdichte in Abhängigkeit des Abstandes von der Oberfläche. [22] S. 13

## 4.2.5 Stromeindringmaß

Induzierte Wechselströme höherer Frequenz fließen größtenteils nur an der Oberfläche. Somit wird auch die Wärme zu einem großen Anteil nur an der Oberfläche erzeugt. Dies lässt sich an einer zylindrischen Induktorspule mit einem darin befindlichen Metallzylinder zeigen. Die Induktorspule erzeugt zylindrische elektromagnetische Wellen, die auf die Oberfläche des Metallzylinders treffen und in diesen eindringen. Die Eindringtiefe dieser Wellen wird durch die Frequenz bestimmt. Eine hohe Frequenz bewirkt eine kleine Eindringtiefe. Eine niedrige Frequenz bewirkt eine große Eindringtiefe. Auf diesen kreisförmig eintretenden elektrischen Feldlinien fließen die Wirbelströme. Bei einer hohen Frequenz beeinflussen sich diese allseitig einfallenden elektromagnetischen Wellenzüge nicht.

*Stromeindringmaß*

Im Falle einer niedrigen Frequenz und einer damit verbundenen großen Eindringtiefe, kommt es zu einer starken Beeinflussung, dies zeigt sich in Abbildung 13, bei der die Widerstandsfunktion als Funktion von  $d/\delta$  angegeben ist. Die auf den Feldlinien in entgegengesetzter Richtung fließenden Wirbelströme vermindern den resultierenden Strom und damit auch die entstehende Wärmemenge. Auch das magnetische Feld wird somit in radialer Richtung nach innen abgebaut. Umgekehrt verhält es sich bei der Induktorspule. Dort wird das magnetische Feld vom Innenrand des Induktorsleiters nach außen abgebaut.[22]

*Starke Beeinflussung bei niedrigen Frequenzen*

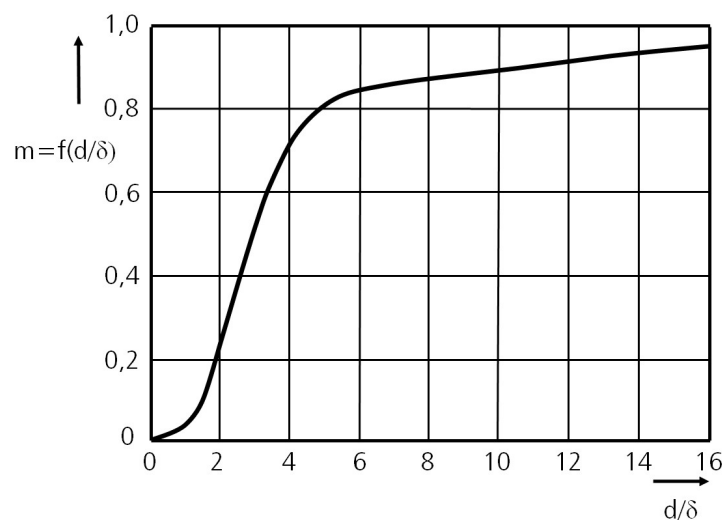


Abbildung 13 Widerstandsfunktion als Funktion von  $d/\delta$  [22] S. 17

Als Stromeindringmaß  $\delta$  oftmals auch Eindringtiefe genannt, wird ein Bereich im Werkstück bezeichnet, in dem die Stromdichte auf 37 Prozent im Vergleich zum Außenrand abgesunken ist, wie in Abbildung 14 ersichtlich ist. Im Bereich der Eindringtiefe werden 86 Prozent der induzierten Energie in Wärme umgesetzt, die restlichen 14 Prozent erwärmen tieferliegende Bereiche.[20]

*Stromeindringmaß  $\delta$*

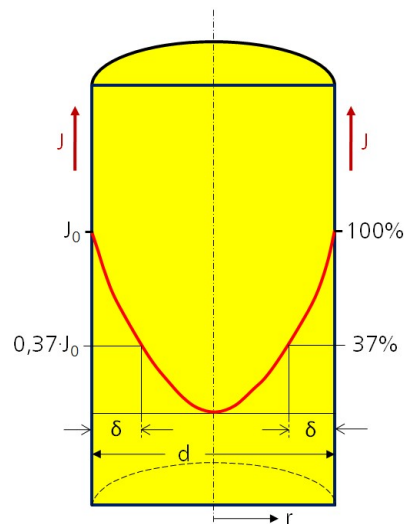


Abbildung 14 Stromeindringmaß in Metallzylinder [15] S: 314

Aus dem Induktionsgesetz lässt sich schnell erklären wieso im Leiterinneren die Stromdichte den Wert Null hat. Die induzierte Spannung ist proportional der Kreisfläche. Geht der Radius gegen Null, so nähern sich die induzierte Spannung und die Stromdichte ebenfalls dem Wert Null an. Das Stromeindringmaß wird nach Gleichung (11) berechnet.

*Berechnung Stromeindringmaß*

$$\delta = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{\rho \cdot 10^7}{\mu \cdot f}} \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad (11)$$

Zu bedenken ist, dass sich die Permeabilität und der spezifische elektrische Widerstand mit der Temperatur ändern, aus diesem Grund ändert sich auch das Eindringmaß mit der Temperatur. Als Beispiel lässt sich mit den Werten aus Abbildung 11 errechnen, dass Stahl ein um das 40fache höhere Stromeindringmaß bei 1000°C als bei Raumtemperatur aufweist, unter der Voraussetzung einer gleichbleibenden Frequenz.

*Änderung des Eindringmaßes von der Temperatur*

Das Stromeindringmaß wird nach Gleichung (11) auch von der Frequenz beeinflusst. Für einige Werkstoffe ist die Abhängigkeit des Eindringmaßes von der Frequenz in Abbildung 15 dargestellt.

*Änderung des Stromeindringmaßes mit der Frequenz*

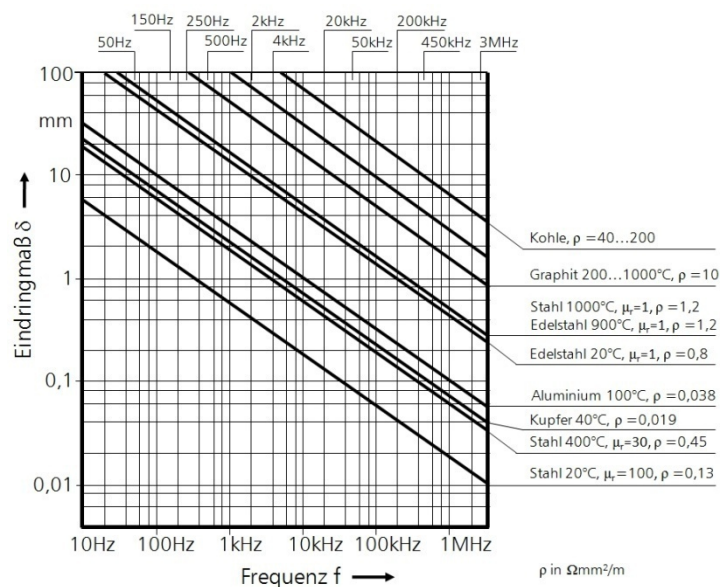


Abbildung 15 Eindringmaß in Abhängigkeit von der Frequenz [22] S. 14

#### 4.2.6 Permeabilität

Stoffe deren Permeabilität nicht von der magnetischen Feldstärke abhängen, also  $B$  und  $H$  proportional sind, werden als magnetisch linear bezeichnet. Dazu zählen die diamagnetischen und paramagnetischen Stoffe, die eine vom Wert 1 nur gering abweichende Permeabilitätszahl aufweisen. Gegenteilig dazu verhalten sich ferromagnetischen Stoffe, die eine starke magnetische Wirkung zeigen.[23]

*Permeabilität dia- und paramagnetischer Stoffe*

Jeder ferromagnetische Stoff besitzt pro Atom ein resultierendes magnetisches Moment. Dieses Moment wird durch die Rotation der Elektronen um den Atomkern und durch Eigenrotation verursacht. Bereiche in denen die Momente in die gleiche Richtung zeigen, haben wieder ein resultierendes Moment zur Folge und werden nach ihrem Erfinder als Weißsche Bezirke bezeichnet.

*Permeabilität ferromagnetischer Stoffe*

Befindet sich der Stoff nicht im Einflussbereich eines Magnetfeldes, so sind die resultierenden Momente der unterschiedlichen Bezirke statistisch verteilt. Wirkt auf den ferromagnetischen Stoff ein größer werdendes magnetisches Feld, so vergrößern sich in einem ersten Schritt die Weißschen Bezirke, deren Moment bereits in Richtung des Magnetfeldes zeigt. In einem zweiten Schritt richten sich die übrigen Momente immer stärker am Magnetfeld aus. Bei kleinen Feldstärken ist dieser in Abbildung 16 dargestellte Vorgang reversibel, bei großen Feldstärken werden alle Momente parallel zum Magnetfeld ausgerichtet und es tritt ein Sättigungsverhalten auf. Bei höheren Temperaturen nimmt die Ordnung in ferromagnetischen Stoffen ab, bis eine Temperatur überschritten wird, bei denen die Weißschen Bezirke zerstört werden. Diese Temperatur, auch als Curie-Temperatur bezeichnet, hat zur Folge, dass sich ein paramagnetisches Verhalten einstellt.[24]

*Weißsche Bezirke*

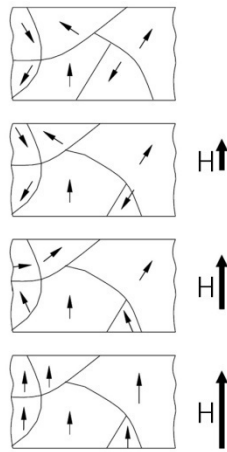


Abbildung 16 Weißsche Bezirke [24] S. 284

Ferromagnetische Stoffe besitzen eine dem Stoff zugehörige Magnetisierungskurve, die experimentell ermittelt wird. Ist die Magnetisierungskurve geschlossen, so wird sie auch als Hystereseschleife bezeichnet. Wird die Feldstärke vom Sättigungszustand aus verringert, so verläuft die Kurve nicht auf der Neumagnetisierungskurve. Es bildet sich aufgrund der irreversiblen Vorgänge ein anderer Kurvenverlauf aus, das ist in Abbildung 17 ersichtlich. Nimmt die magnetische Feldstärke den Wert Null an, so ist noch immer eine magnetische Flussdichte  $B_R$  vorhanden, auch Remanenzflussdichte genannt. Damit die magnetische Flussdichte den Wert Null annimmt, wird die magnetische Feldstärke  $H_C$  benötigt, diese wird auch als Koerzitivfeldstärke bezeichnet.[24]

Magnetisierungskurve

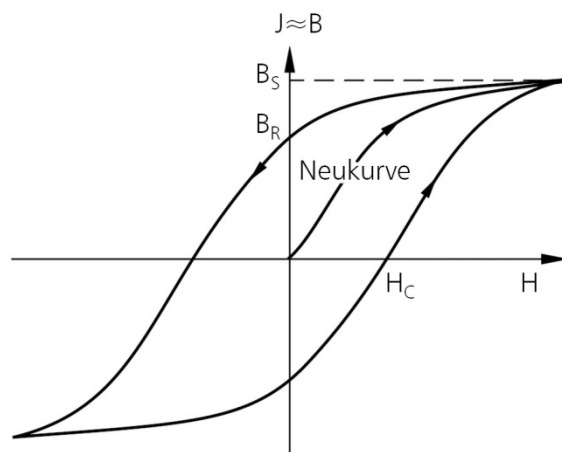


Abbildung 17 Magnetisierungskurve [24] S. 284

Die Permeabilitätszahl gibt das Verhältnis zwischen der Flussdichte im magnetischen Feld und der Flussdichte im Vakuum an. Berechnet wird die Permeabilitätszahl mit Gleichung (12), indem bei einer gegebenen Feldstärke der Wert für die Flussdichte aus der Magnetisierungskurve entnommen wird.[24]

Permeabilitätszahl  $\mu_r$

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B_1}{\Delta H_1} \quad (12)$$

Die Permeabilitätszahl hängt von der Materialart, der Temperatur, dem Druck und auch vom Betrag der magnetischen Feldstärke ab. Bei steigender Leistungsdichte und magnetischer Feldstärke sinkt die Permeabilitätszahl.[22]

*Abhängigkeit Permeabilitätszahl*

### 4.3 Wärmeerzeugung

In einem induktiv erwärmten Bauteil wird die Wärme aufgrund von Hysterese- und Wirbelstromverlusten erzeugt. Aus Abbildung 18 ist ersichtlich, dass die Hystereseverluste linear mit der Frequenz und die Wirbelstromverluste quadratisch mit der Frequenz steigen. Ab dem Curie-Punkt verlieren ferromagnetische Stoffe ihren Ferromagnetismus und können nur mehr aufgrund von Wirbelstromverlusten auf eine höhere Temperatur erwärmt werden.[20]

*Hysterese- und Wirbelstromverluste*

Aus den Hysterese- und Wirbelstromverlusten wird nach Gleichung (13) der Gesamtverlust  $p$  gebildet.

$$p = p_h + p_w \quad (13)$$

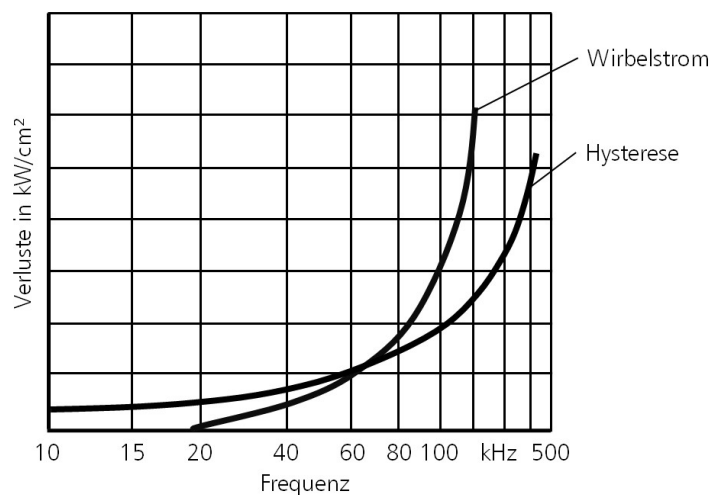


Abbildung 18: Hysterese- und Wirbelstromverluste als Funktion der Frequenz. [20] S. 12

### 4.3.1 Hystereseverluste

Hystereseverluste treten nur bei ferromagnetischen Werkstoffen unter der Curie-Temperatur auf. Die Fläche der Hystereseschleife kann durch das Integral der Funktion B und H berechnet werden, wie auf Abbildung 17 ersichtlich ist. Diese Schleife gibt die Verluste an, die bei einem Wechsel des Magnetfeldes entstehen. Somit sind die Verluste der Frequenz proportional, was auch aus der Gleichung (14) ersichtlich ist. Damit ist es möglich die Hysterese-Verlustleistung auf die Masse bezogen, zu berechnen. Mit A sind die Verluste der Hystereseschleife bezeichnet.[24]

*Berechnung Hysterese –  
Verlustleistung  $p_h$*

$$p_h = \frac{Af}{\rho} \quad (14)$$

### 4.3.2 Wirbelstromverluste

Die Entstehung der Wirbelströme ist bereits in Kapitel 4.2.5 beschrieben. Die Wirbelstromverluste können nach Gleichung (15) berechnet werden. Dies jedoch nur unter der Voraussetzung einer sinusförmigen Flussdichte, deren Scheitelwert  $\hat{B}$  in die Gleichung einzusetzen ist.

*Berechnung Wirbelstrom –  
Verlustleistung  $p_w$*

$$p_w = 1,64 \frac{\gamma}{\rho} (\hat{B}fd)^2 \quad (15)$$

## 4.4 Auslegungskriterien induktiver Erwärmungsanlagen

Für einen optimalen Erwärmungsprozess müssen die folgenden Punkte bei der Auslegung einer Induktionsanlage beachtet werden.

*Auslegungskriterien optimale  
Erwärmung*

- Ein dem Werkstück entsprechendes Eindringmaß ist zu wählen.
- Der Induktor ist dem Werkstück optimal anzupassen.
- Der Widerstand des Induktors ist so gering wie möglich zu halten.

### 4.4.1 Eindringmaß

Das Eindringmaß wird über die verwendete Frequenz eingestellt. Für die Auslegung einer Induktionserwärmungsanlage kann mit den Werten aus Abbildung 19 schnell die Mindestfrequenz gefunden werden. Jedoch gilt es hier zu bedenken, dass diese Werte nur für Anwendungen mit einem Längsfeldinduktor gültig sind. Oftmals ist es aufgrund von einer bereits bestehenden Anlage nicht möglich, die optimale Frequenz zu erzeugen. Hier wird darauf aufmerksam gemacht, dass es bei einer Unterschreitung der Mindestfrequenz zu einer deutlichen Verschlechterung des Wirkungsgrades kommt. Bei einer Überschreitung der Mindestfrequenz verbessert sich der Wirkungsgrad nur leicht.[20]

*Wahl des Eindringmaßes*

Werkstückform (Stahl)	$f_{\min}$ Hz	$d$ in mm bei			
		50 Hz	2500 Hz	8000 Hz	400 kHz
Oberflächenhärten					
1. Rechteck	$25000/d^2$ (cm)	230	32	18	2,5
2. Kreis	$150000/d^2$ (cm)	560	80	44	6,5
Durcherhitzung					
1. Rechteck	$5600/d^2$ (cm)	105	15	8,5	1,2
2. Kreis	$22500/d^2$ (cm)	210	30	17	2,5

Abbildung 19 Mindestfrequenz in Abhängigkeit des Werkstückdurchmessers oder der Werkstückdicke [20] S. 17

Für die durchgängige Erwärmung eines runden Bauteils ist das Eindringmaß nach Abbildung 20 so zu wählen, dass das Verhältnis  $d/\delta$  im Bereich von 3 bis 4 liegt. Dies ist auch nach der Widerstandsfunktion aus Abbildung 13 ersichtlich, m steht hierbei für die aufgenommene Energie, die eine Funktion des Verhältnisses  $d/\delta$  ist.

Verhältnis Durchmesser zu Eindringmaß

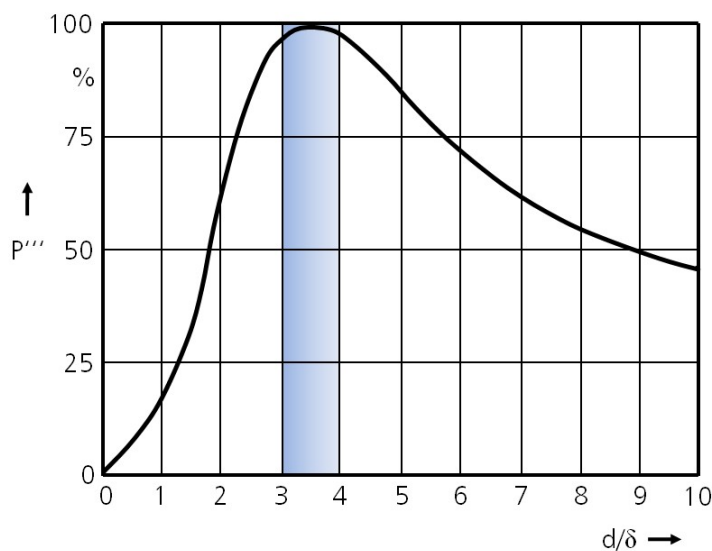


Abbildung 20 Induzierte Volumenleistungsdichte über das Verhältnis  $d/\delta$  [22] S. 18

In Abbildung 20 ist die Frequenz konstant und der Werkstückdurchmesser wird variiert. Ab einem Verhältnis  $d/\delta > 4$  sinkt die Volumenleistungsdichte bei gleichem Induktorstrom. Unter dem Verhältnis  $d/\delta < 3$  fällt die induzierte Leistung mit sinkendem Durchmesser auf null ab. Für dünne Platten wird das optimale Verhältnis von Werkstückdicke zu Eindringtiefe mit 2,3 angegeben. Damit sind eine gleichmäßige Erwärmung im Werkstück und ein günstiger Wirkungsgrad bei der Energieübertragung von Induktor auf das zu erwärmende Gut erreichbar.[22]

Optimales Verhältnis zwischen 3 und 4



#### 4.4.2 Induktorwirkungsgrad

Mit der Wahl eines geringen Abstandes zwischen Induktor und Werkstück ist ein guter Wirkungsgrad erreichbar. In Abbildung 21 ist der Induktorwirkungsgrad für ein ebenes Werkstück angegeben. Dabei hat der Induktorleiter eine Höhe und Breite von 4mm und eine Länge von 80mm. Für die Erwärmung auf 1000°C wird der Werkstoff Stahl verwendet, die Frequenz beträgt 400Mhz.

*Abstand Induktor Werkstück*

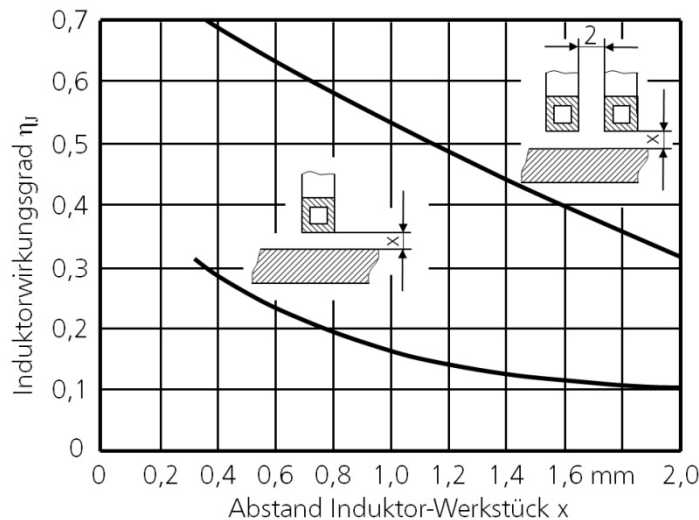


Abbildung 21 Induktorwirkungsgrad für ein ebenes Werkstück [20] S. 59

#### 4.4.3 Induktorwiderstand

Der Induktor wird entweder direkt an die Zuleitungen oder über einen Anpassungstransformator an den Umrichter angeschlossen. Ein geringer Widerstand des Induktorleiters wird mit einem passenden Werkstoff und einer guten Kühlung des Induktors realisiert.

*Induktor*

Die Wandstärke des Induktors wird so gewählt, dass sie ungefähr dem 1,5 fachen Eindringmaß im Werkstück entspricht. Eine Vergrößerung der Wandstärke trägt nicht zu einer Verringerung des Wirkwiderstandes bei. Der Skin-Effekt begrenzt dabei den Wirkungsgrad.[22]

*Induktorwandstärke*

In Abbildung 22 wird der Querschnitt eines Induktorleiters gezeigt. Der Induktor wird zur Kühlung in der Mitte von Wasser durchflossen und der Induktorleiter ist von Blechpaketen umgeben. Deren Aufgabe ist die Führung der magnetischen Feldlinien.

*Aufbau des Induktorleiters*

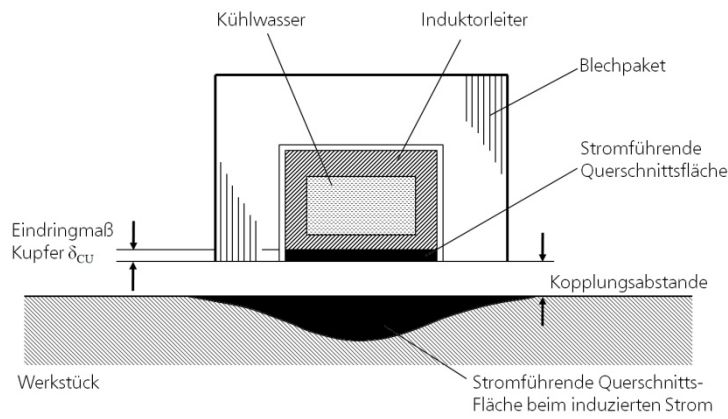


Abbildung 22 Schematischer Aufbau des Induktorleiters [22] S. 27

Für die unterschiedlichen Aufgaben ist jeweils der für die Anwendung passende Induktor mit dem besten Wirkungsgrad auszuwählen. Die Wirkungsgrade der unterschiedlichen Ausführungen sind in Tabelle 6 angeführt.[20]

*Auswahl Induktor*

Ausführung	Wirkungsgrad $\eta$
Innenfeldinduktor	0,5 bis 0,9
Außenfeldinduktor	0,3 bis 0,5
Flächeninduktor	0,3 bis 0,6
Einseitiger Flächeninduktor	0,15 bis 0,3
Doppelter Flächeninduktor	0,4 bis 0,8

Tabelle 6 Wirkungsgrad der unterschiedlichen Induktoren [20] S. 59

## 4.5 Induktoren

### 4.5.1 Längsfeldinduktor

Mit einem Längsfeldinduktor kann eine Platine auf Curie-Temperatur mit einem hohen Wirkungsgrad erwärmt werden. Dabei umfasst der Induktor das zu erwärmende Werkstück. Der induzierte Strom fließt, wie in Abbildung 23 ersichtlich, an der Oberfläche der Platine. Mit einem Längsfeldinduktor ist eine Erwärmung der Platine auch über Curie-Temperatur möglich, jedoch muss dafür eine hohe Frequenz verwendet werden. Umrichter können maximal eine Frequenz knapp unter 1MHz erzeugen, damit können nur Platinen mit einer Belchstärke über 1mm mit einer optimal gewählten Eindringtiefe erwärmt werden. Diese hohen Frequenzen werden in Laborversuchen erzeugt, jedoch ist der Gesamtwirkungsgrad einer solchen induktiven Erwärmungsanlage schlecht. Bei niedrigen Frequenzen wird die Platine maximal auf Curie-Temperatur erwärmt, es tritt somit eine Selbstregulierung der Temperatur auf.[21]

*Einsatzbereich Längsfeldinduktor*

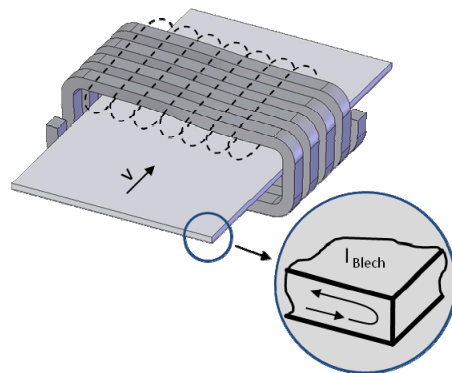


Abbildung 23 Längsfeldinduktor

### 4.5.2 Querfeldinduktor

Querfeldinduktoren werden bei der Erwärmung von Bandmaterial eingesetzt. Dabei wird das Band zwischen einem oben und unten befindlichen Induktorleiter laut Abbildung 24 geführt. Das Magnetfeld durchdringt das Metallband senkrecht zur Oberfläche und es bilden sich die für die Erwärmung notwendigen Wirbelströme aus. Eine homogene Temperaturverteilung auf dem Bandmaterial kann mit einem optimal angepassten Induktor erreicht werden. Hierin liegt bereits das Hauptproblem der Querfelderwärmung. Es tritt eine Kantenüberhitzung bei einem schlecht angepassten Induktor auf. Ebenfalls entstehen starke elektromagnetische Kräfte auf das zu erwärmende Material.[22]

*Einsatzbereiche der Querfeldinduktoren*

Ein Vorteil der Quersfelderwärmung liegt darin, dass eine um das 100fache geringere Frequenz im Vergleich zur Längsfelderwärmung verwendet wird, was einen besseren Wirkungsgrad zur Folge hat. Des Weiteren wird das Bandmaterial nicht von der Spule umfasst und es können auch extrem dünne Nichteisenmetalle ohne Einschränkung erwärmt werden.[21]

Wirkungsgrad Quersfelderinduktor

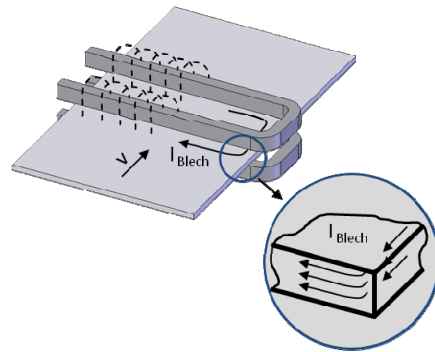


Abbildung 24 Quersfelderinduktor

#### 4.5.3 Flächeninduktor

Für die induktive Erwärmung mittels Flächeninduktor ist das Außenfeld verantwortlich. Das Ausrichten des magnetischen Feldes wird von Blechpaketen auf dem Induktorleiter erledigt. Die Flächenspule ist stets dem zu erwärmendem Gut anzupassen. Ferromagnetische Platinen werden bei einer Erwärmung von Raumtemperatur aus vom Flächeninduktor aufgrund der Feldwirkung angezogen. Mit dem Flächeninduktor können ferromagnetische Werkstoffe bis auf Schmelztemperatur erwärmt werden.

Anpassung Flächeninduktor

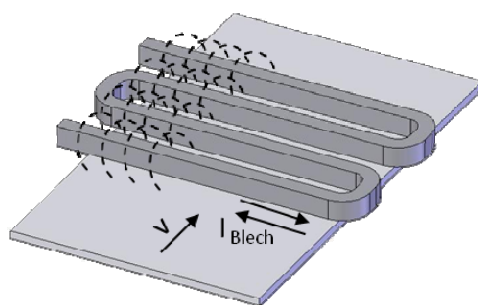


Abbildung 25 Flächeninduktor

## 5 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit liegt in der Bestimmung des optimalen Prozessfensters für die Erwärmung einer Formplatte mittels Induktion. Die Motivation liegt in einer Einbindung dieser Ergebnisse in eine Weiterentwicklung der bestehenden Anlage zur Serienreife.

*Zielsetzung*

Zuerst gilt es die Geometrie einer Formplatte für die Erwärmungsversuche zu bestimmen. Die Geometrie der Platte ist in Anlehnung an bereits verwendeten Formplatten für den Warmformprozess zu wählen.

*Geometrie der Formplatte ist zu bestimmen*

Die mittels Induktion zu erreichenden Zieltemperaturen werden mit 500°C, 600°C, Curie-Temperatur und 950°C festgelegt.

*Zieltemperaturen*

In einem ersten Schritt ist das Erwärmungsverhalten der unterschiedlichen Induktoren zu charakterisieren. Zu klären ist, welche Einstellungen zu wählen sind, um eine möglichst homogene Temperaturverteilung auf der Formplatte zu erreichen.

*Charakterisierung der Induktoren*

In einem weiteren Schritt ist die Erwärmung einer Formplatte mit einer Kombination von unterschiedlichen Induktoren durchzuführen. Ziel dieses kombinierten induktiven Erwärmungsprozesses ist es, eine Formplatte auf 950°C zu erwärmen, die eine möglichst homogene Temperaturverteilung aufweist.

*Kombinierte induktive Erwärmung*

Der Temperaturmessung kommt bei der Bestimmung der Homogenität der Temperatur auf der Formplatte eine besondere Bedeutung zu. Die Temperatur wird mittels Thermokabel, Wärmebildkamera und Pyrometer erfasst.

*Temperaturmessung*

Mit diesen 3 Messverfahren wird es möglich sein, Aussagen über die Temperaturverteilung auf der Formplatte zu treffen. Somit können die optimalen Parameter für die induktive Erwärmung von Formplatten gefunden werden.

*Findung der optimalen Parameter*

## 6 Beschreibung Versuchsanlage

### 6.1 Umrichter

Die für die Versuche verwendete Anlage besteht aus zwei Umrichtern der Firma ITG. Dabei handelt es sich um Transistorumrichter mit den Bezeichnungen ITPA 50k140-100k70 und ITP2 2x 10K80. Der prinzipielle Aufbau der Umrichter ist in Abbildung 26 dargestellt.

*Eingesetzte Umrichter*

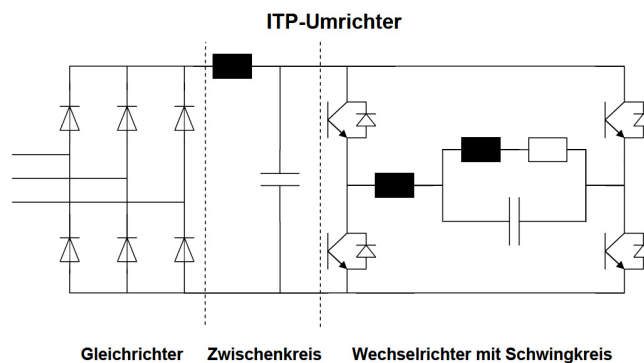


Abbildung 26 Prinzipieller Aufbau eines Umrichters [25] S. 9

Der Gleichrichter hat die Aufgabe mit einer ungesteuerten Drehstrom-Gleichrichterbrücke die eingespeiste Wechselspannung in eine Gleichspannung umzuwandeln. Im Zwischenkreis wird der kontinuierliche Energiefluss vom Gleichrichter zum Wechselrichter sichergestellt. Außerdem verhindert der Zwischenkreis, dass Rückwirkungen vom Wechselrichter auf das Stromnetz übertragen werden. Der Wechselrichter besteht aus vollisolierte IGBT-Leistungstransistoren, welche die Gleichspannung in eine Wechselspannung mittels einer Impulsbreiten-Modulation umwandeln.

*Gleichrichter, Zwischenkreis und Wechselrichter*

Bei den Umrichtern des Typ ITP ist der Schwingkreis als Parallelschwingkreis aufgebaut. Die Arbeitsfrequenz des Umrichters wird durch die Resonanzfrequenz des Schwingkreises bestimmt. Die Frequenz kann durch das Einsetzen von Kondensatoren im kapazitiven Schwingkreis verändert werden.

*Veränderung der Frequenz mittels Kondensatoren*

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung von Anpassungstransformatoren. Damit lässt sich eine optimale Einstellung auf die Last und damit auch der Frequenz erreichen. Die Ausgangsspannung wird über eine Drossel dem Schwingkreis zugeführt.[25]

*Anpassung mittels Transformatoren*

Transistorumrichter können eine Frequenz von 30 bis 500kHz erzeugen und erreichen dabei einen Wirkungsgrad von 75 bis 90 Prozent.[22]

## 6.2 Induktoren

Am Institut für Werkzeugtechnik & Spanlose Produktion sind verschiedene Induktoren in Verwendung. Dazu zählen ein Längsfeldinduktor, ein Quersfeldinduktor, ein Flächeninduktor und ein Zylinderinduktor. Des Weiteren ist noch als Sonderform der induktiven Erwärmung ein induktiver Muffelofen in Verwendung.

*Vorhandene Induktoren*

### 6.2.1 Längsfeldinduktor

Der Längsfeldinduktor besteht aus acht Windungen, der Aufbau wird in Abbildung 27 gezeigt. Der Induktorleiter hat eine Breite von 30 mm und eine Höhe von 10 mm. Der Induktor hat innen eine freie Höhe von 50 mm und eine freie Breite von 380 mm. Die acht Windungen sind auf einer Länge von 260 mm aufgeteilt. Der Längsfeldinduktor hat mit der Isolierung eine Durchlasshöhe von 38 mm und eine Durchlassbreite von 360 mm.

*Aufbau Längsfeldinduktor*

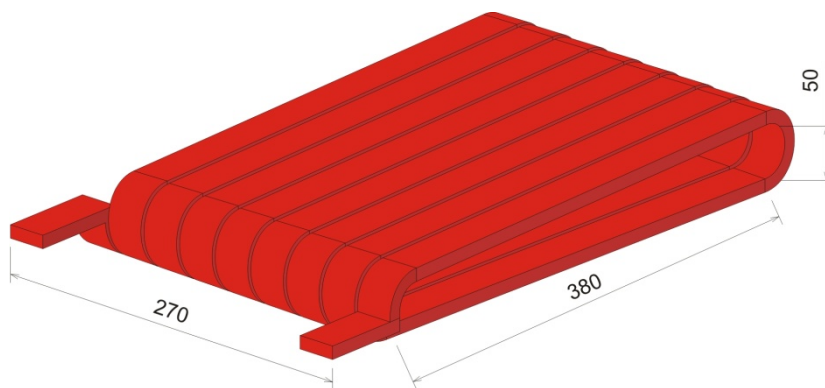


Abbildung 27 Verwendeter Längsfeldinduktor

Der Längsfeldinduktor wird mit einer Frequenz von knapp 100kHz betrieben.

*Verwendete Frequenz*

### 6.2.2 Flächeninduktor

Der Flächeninduktor ist mit zwei Windungen ausgeführt, wie auf Abbildung 28 ersichtlich. Der Induktorleiter hat eine Höhe und Breite von 20 mm. Die Windungen sind in einem Abstand von 55 mm zueinander angeordnet. Anzumerken ist, dass der Induktorleiter auf einer Länge von 500 mm von Ferritkernen umgeben ist.

*Aufbau Flächeninduktor*

Deren Aufgabe besteht in der Ausrichtung der magnetischen Feldlinien. Zwischen dem Induktorleiter und der zu erwärmenden Platine befindet sich eine 15 mm starke Isolierplatte. Diese Isolierplatte ist mit dem Gehäuse des Flächeninduktors verbunden und der Induktorleiter liegt auf dieser Platte auf.

*Aufgabe der Ferritkerne*

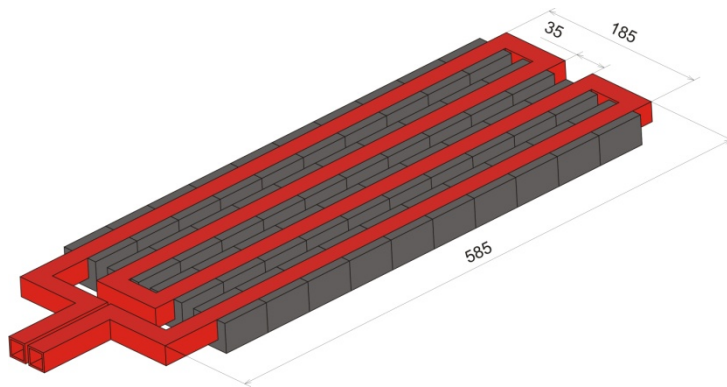


Abbildung 28 Verwendeter Flächeninduktor

Die Frequenz des Flächeninduktors kann durch eine Änderung der Anzahl der Kondensatoren im Anpassungstransformator eingestellt werden. Wird der Flächeninduktor mit drei eingebauten Kondensatoren betrieben, so stellt sich eine Frequenz von 9,2 kHz ein. Bei der Verwendung von sechs Kondensatoren wird eine Frequenz von 6,7 kHz erreicht.

*Veränderung der Frequenz*

### 6.2.3 Quersfeldinduktor

Der Quersfeldinduktor ist mit zwei übereinanderliegenden Windungen ausgeführt, der Aufbau wird in Abbildung 29 dargestellt. Der vertikale Abstand zwischen den beiden Windungen beträgt 40 mm. Der Induktorleiter hat eine Höhe von 15 mm und eine Breite von 50 mm.

*Aufbau Quersfeldinduktor*

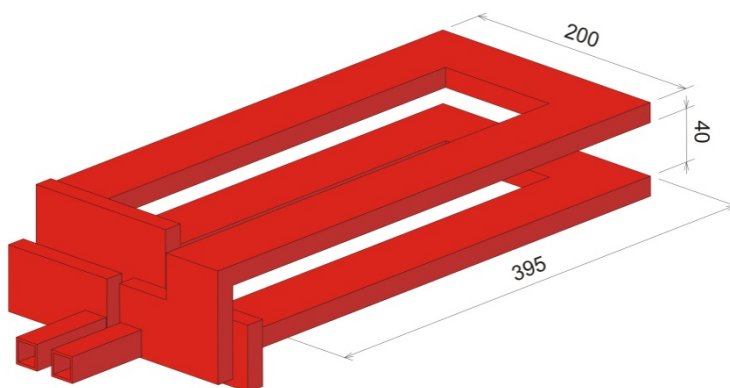


Abbildung 29 Verwendeter Quersfeldinduktor

Der Quersfeldinduktor wird an dem gleichen Umrückerausgang, wie der Flächeninduktor angeschlossen. Auch hierbei besteht die Möglichkeit die Frequenz über die Anzahl der verwendeten Kondensatoren im Anpassungstransformator zu variieren. Um zu verhindern, dass die erwärmte Platine mit dem Induktor in Berührung kommt, sind die Windungen mit einer 5 mm starken Isolierplatte abgeschirmt.

*Anschluss Quersfeldinduktor*



## 6.3 Transporteinrichtung

Für vergleichbare Temperaturmessergebnisse kommt der Transporteinrichtung eine besondere Bedeutung zu. Sie ist dafür verantwortlich, dass die Formplatte mit einer definierten Geschwindigkeit und einer definierten Position transportiert wird. Des Weiteren ist für spezielle Anwendungen eine konstruktive Lösung erforderlich, die ein Abheben der Platine von der Transporteinrichtung verhindert. Die Transporteinrichtung sollte das magnetische Wechselfeld nicht beeinflussen und selber nicht induktiv erwärmt werden. Des Weiteren ist die Wärmeleitung von der erwärmten Platine auf das Transportsystem zu vermeiden.

*Anforderungen an die Transporteinrichtung*

### 6.3.1 Transport mittels Kette

Das Transportsystem erster Generation besteht aus drei nebeneinander liegenden Ketten, die über Kettenräder mit einer Welle verbunden sind. Die Welle wird von einem Asynchronmotor mit einem Getriebe ebenfalls über eine Kette angetrieben. Die Kette besteht aus Edelstahl und lässt sich somit nur bei hohen Frequenzen induktiv erwärmen. Um einen definierten Transport der Platine zu gewährleisten sind auf der Kette Mitnehmer angebracht. Damit wird eine Verschiebung der Platine auf der Kette verhindert und auch die Aufbiegung der Platine wird vermindert.

*Aufbau*

Wärmeleitungsverluste von der erwärmten Platine auf die Kette werden durch die Anbringung von Keramikplättchen auf der Kette verhindert. Somit hat die Platine, bis auf den Bereich der Mitnehmer, keinen direkten Kontakt mit der Kette.

*Wärmeleitungsverluste verhindern*

Ein Nachteil des Transportsystems mittels Kette ist, dass die Kette mit den Mitnehmern immer wieder in die Ausgangsposition gebracht werden müssen. In dieser Ausgangsposition ist die Kette zu stoppen und die Platine mit den Mitnehmern zu fixieren. Derzeit ist es nicht möglich mehrere Platinen hintereinander induktiv zu erwärmen, da die Platine immer an der gleichen Stelle auf der Kette liegen muss. Dieser Bereich erwärmt sich aufgrund von Wärmestrahlung und Konvektion sehr stark. Somit ist beim Fixieren der Platine nach mehreren Erwärmungsversuchen besondere Vorsicht bezüglich der heißen Mitnehmer und auch der heißen Kette gefordert.

*Nachteile der Kette*

### 6.3.2 Transport mittels Hubbalken

Beim Hubbalkensystem, dem Transportsystem zweiter Generation, wird die Formplatte mittels vier Hubbalken befördert. Von diesen vier Hubbalken führen jeweils zwei die gleiche Bewegung aus. Die Horizontalbewegung wird über Schrittmotoren ausgeführt, das Heben und Senken über Pneumatikzylinder.

*Aufbau Hubbalkensystem*

Im Folgenden wird die Bewegung der Hubbalken kurz beschrieben. Beide Schlitten befinden sich am Anfang in Startposition. Der erste Schlitten beschleunigt und hebt sich erst, wenn die geforderte Schrittzahl und eine gleichmäßige Geschwindigkeit erreicht sind. Somit bewegt sich die Platte auf dem ersten Schlitten. Nach einer gewissen Zeit beschleunigt der zweite Schlitten und hebt sich ebenfalls nach einer vorgegebenen Schrittzahl. Für kurze Zeit wird die Platte von allen vier Hubbalken befördert. Nähert sich der erste Schlitten seine Endposition, senkt er sich ab, verzögert und fährt mit der vierfachen Vorwärtsgeschwindigkeit zurück. Zu diesem Zeitpunkt wird die Platte nur von den Hubbalken des zweiten Schlittens geführt. Bevor der zweite Schlitten seine Position zum Senken erreicht, beschleunigt der erste Schlitten wieder und hebt sich nach Erreichung der vorgegebenen Schrittzahl. Erst danach senkt sich der zweite Schlitten, verzögert und fährt in die Startposition zurück. Die Platte befindet sich immer auf der gleichen Höhe.

*Bewegungsablauf*

Der Vorteil dieses Systems liegt in der Möglichkeit des kontinuierlichen Transportes von mehreren Formplatten hintereinander. Des Weiteren geht durch die Keramikrohre nur ein geringer Anteil der Wärme durch Wärmeleitung zwischen der erwärmten Platte und den Hubbalken verloren. Das magnetische Wechselfeld wird nicht beeinflusst und die Keramikrohre können nicht induktiv erwärmt werden.

*Vorteil des Hubbalkensystems*

## 7 Methoden und Lösungswege

### 7.1 Platinengeometrie

Für die Erwärmungsversuche ist es wichtig eine Platinengeometrie zu ermitteln, die eine möglichst große Anzahl von typischen Merkmalen aktuell verwendeter Formplatinen für die Warmumformung in sich vereint. Dazu wird das Bauteilespektrum eines Automobilzulieferers verwendet. Von besonderer Bedeutung für eine homogene Erwärmung bei der induktiven Erwärmung sind Bereiche mit einer Veränderung der Platinenbreite bezogen auf die Förderrichtung, des Weiteren 90° Außenkanten, Laschen und unterschiedliche Radien. Die Bauteile haben eine Stärke von 1 bis 2 Millimeter, ein maximales Gewicht von 20 Kilogramm und werden von 20 auf 950°C erwärmt. Nach einer genauen Analyse der realen Bauteile wird für die induktiven Erwärmungsversuche eine Platinengeometrie nach Abbildung 30 festgelegt. Diese Platine beinhaltet viele Geometrielemente von bereits typisch eingesetzten warmumgeformten Bauteilen.

*Ermittlung der Platinengeometrie anhand realer Bauteile*

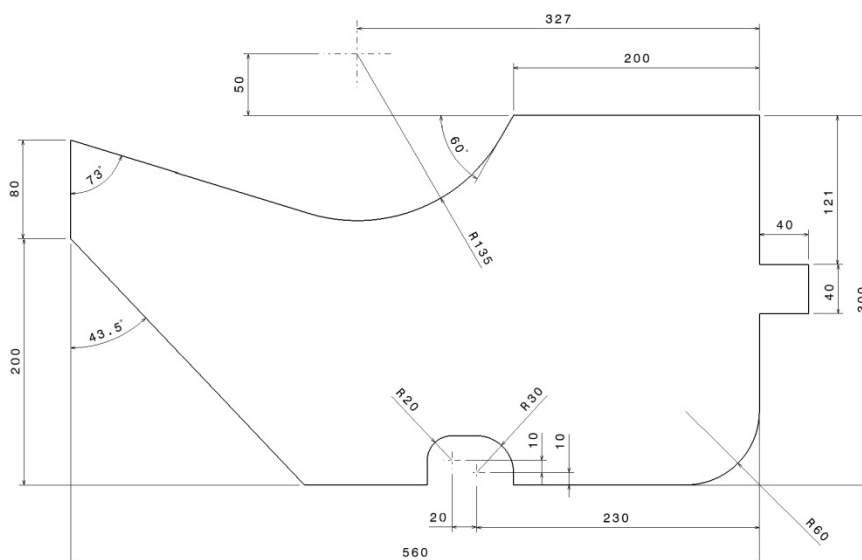


Abbildung 30 Formplatte für Versuchszwecke

### 7.2 Grundlagen der Temperaturmessung

Um die homogene Temperaturverteilung auf der Formplatte zu messen und zu dokumentieren, werden Messungen mittels Thermokabel, Wärmebildkamera und Pyrometer durchgeführt. Das Thermokabel wird auf die Formplatte angeschweißt und die Temperatureinbringung wird während der induktiven Erwärmung aufgezeichnet. Mit der Wärmebildkamera wird die Temperaturverteilung auf der Formplatte nach der Erwärmung sichtbar gemacht. Am Auslauf der Formplatte aus den Induktoren wird die Temperatur mittels Pyrometer gemessen.

*Temperaturmesssysteme*

Die Oberflächeneigenschaften der Formplatine hängen stark mit der erreichten Erwärmungstemperatur zusammen. Für die Temperaturmessungen mittels Wärmebildkamera und Pyrometer werden alle Formplatinen mit Ofenlack geschwärzt. Somit wird der Einfluss der unterschiedliche Erwärmungstemperaturen auf die Oberfläche minimiert und es kann der Emissionsgrad auf 1 eingestellt werden. Dadurch sind die erhaltenen Messwerte des Pyrometers und der Wärmebildkamera den Ergebnissen der Thermokabelmessung angenähert. Dennoch ist es unumgänglich, auf jeder Platine ein Thermokabel an einer festgelegten Position anzuschweißen, um in einem weiteren Schritt den Emissionskoeffizienten in der Bearbeitungssoftware der Wärmebildkamera exakt anzupassen. Nur mit dieser Vorgehensweise wird auf den Wärmebildern die wahre Temperaturverteilung auf der Formplatine abgebildet.

*Oberflächeneigenschaften  
verändern sich mit der Temperatur*

### 7.2.1 Temperaturmessung Thermokabel

Werden zwei Leiter mit unterschiedlichen Thermospannungswerten durch einen Schweißpunkt zu einem Thermoelement zusammengefügt, so wird eine Spannung gemessen. Diese Spannung wird als elektromotorische Kraft oder als Thermospannung bezeichnet. Die Empfindlichkeit der Messung steigt mit der Verwendung von Leitern, die einen großen Unterschied in den Thermospannungswerten aufweisen. Für die Temperaturmessung auf der Platine werden Thermoleitungen vom Typ N verwendet. Diese sind unempfindlich gegen Oxidation bei hohen Temperaturen.

*Funktionsweise Temperaturmessung Thermokabel*

Damit können Temperaturen bis 1300°C gemessen werden. Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit die Thermokabel in der gewünschten Länge selber zu fertigen. Dazu werden auf die Thermoschenkel Isolierröhrchen aus Magnesium- oder Aluminiumoxid, wie in Abbildung 31 ersichtlich ist, gefädelt.[26] Für die Messung wird die Software Labview von National Instruments verwendet. Mit Hilfe der grafischen Programmierumgebung können Mess-, Prüf-, Steuer- und Regelsysteme, den eigenen Anforderungen entsprechend, entwickelt werden. Die Thermokabel werden an ein Messmodul mit der Bezeichnung NI9211 angeschlossen. Spannungen von  $\pm 80$  Millivolt werden damit gemessen.

*Einsatzbereich*

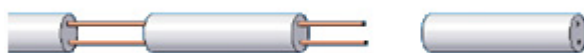


Abbildung 31 Herstellverfahren Thermoelement [27]

### 7.2.2 Temperaturmessung Thermografiecamera

Die Temperaturverteilung auf der Platine wird mit einer Thermografiecamera der Marke Jenoptik sichtbar gemacht. Mit dieser Kamera können Mes-

*Verwendungsbereich*

sungen in einem Temperaturbereich von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis zu  $1200^{\circ}\text{C}$  durchgeführt werden. Es werden elektromagnetische Strahlen mit einer Wellenlänge von 8 bis  $13\mu\text{m}$  abgebildet. Bei der Verwendung eines Pyrometers oder einer Wärmebildkamera ist der Emissionskoeffizient für eine ordnungsgemäße Temperaturmessung an den zu messenden Werkstoff anzupassen. Dabei ist der Emissionskoeffizient das Verhältnis der abgestrahlten Intensität eines Körpers zur Intensität eines schwarzen Strahlers mit der gleichen Temperatur. Bei der Temperaturmessung von Metallen ist der Emissionskoeffizient von der Wellenlänge und der Temperatur abhängig.[28]

### 7.2.3 Temperaturmessung Pyrometer

Für die Temperaturmessung wird ein Pyrometer mit der Bezeichnung DP 201 D der Firma Sensotec am Auslauf der Platine aus dem Induktor befestigt. Hiermit können Temperaturen von  $-40$  bis  $900^{\circ}\text{C}$  gemessen werden. Das Pyrometer ist über eine Elektronik-Box, wie auf Abbildung 32 ersichtlich, mit der Steckkarte von National Instruments und der Software Lapview verbunden. Der Emissionskoeffizient wird für eine ordnungsgemäße Temperaturmessung in der Elektronik-Box über Kippschalter eingestellt. Die Elektronik-Box ist über ein separates Netzteil mit Energie zu versorgen.

*Einsatzbereich Pyrometer*

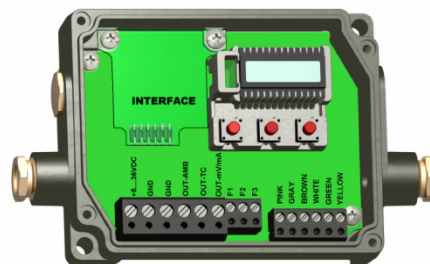


Abbildung 32 Elektronik-Box [29] S. 3

Für eine ordnungsgemäße Messung der Temperaturverteilung in einem kleinen Bereich auf der Platine ist es wichtig den Messfleck des Pyrometers so klein als möglich zu halten. Die Vergrößerung des Messfleck mit der Entfernung wird in Abbildung 33 dargestellt.

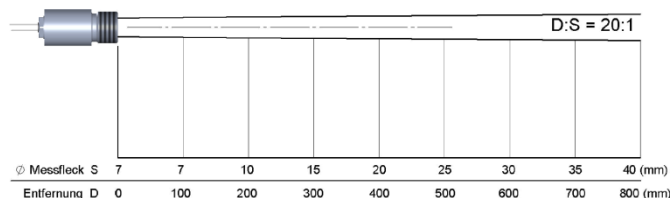


Abbildung 33 Messfleckdurchmesser in Abhängigkeit der Entfernung [29] S. 6

### 7.3 Beschreibung der Einflussgrößen

Umrichter:	Spannung Frequenz
Transformator:	Übersetzungsverhältnis (nur für Quersfeld- und Flächeninduktor)
Induktor:	Windungszahl Abstand der Windungen Länge & Bauform des Induktorleiters
Längsfeldinduktor:	Spulenhöhe Spulenlänge
Quersfeldinduktor:	Spulenhöhe
Flächeninduktor:	Blechpakete Abstand zum Bauteil einseitige/beidseitige Erwärmung
Bauteil:	Werkstoff Geometrie Stärke Ausgangstemperatur Vorhandene innere Spannungen
Fördersystem:	Vorschubgeschwindigkeit Mitnahme der Platine Kontakt zum Werkstück – Wärmeleitung Beeinflussung des magnetischen Feldes Verhinderung des Aufbiegens der Platine

Tabelle 7 Beschreibung der Einflussgrößen

## 7.4 Definition der Zielgrößen

Das Ziel der Versuche liegt in der Erwärmung einer Formplatte auf 500°C, 600°C, Curie-Temperatur und 950°C mit den zur Verfügung stehenden Induktoren, oder einer Kombination mehrerer Induktoren, sodass eine homogene Temperaturverteilung auf der Platine erreicht wird. Die Curie-Temperatur für den Werkstoff mit der Bezeichnung MBK 1500 liegt bei 760°C.

## 7.5 Versuchsvorbereitung

Zur Überprüfung, ob der geplante Versuchsablauf zu realisieren ist, werden für Vorversuche Formplatten nach Abbildung 34 im Längsfeldinduktor erwärmt und die Temperatur wird mit allen 3 Messverfahren ermittelt.

*Überprüfung der Temperaturmessverfahren*

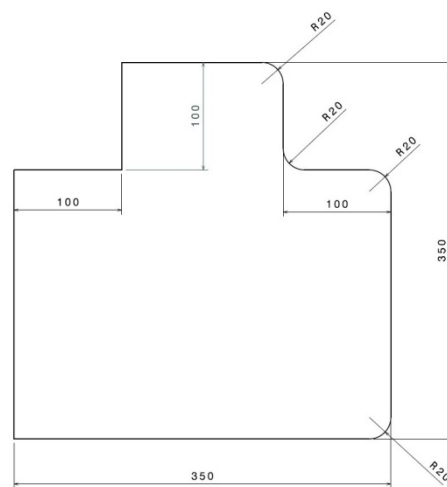


Abbildung 34 Formplatte für die Vorversuche

Für den Abgleich der Werte des Pyrometers und auch der Wärmebildkamera, sind die Ergebnisse der Thermokabelmessung von außerordentlicher Bedeutung. Jedoch zeigt sich bei den ersten Versuchen die Problematik der Temperaturmessung mittels Thermokabel.

Sobald die Platine in das magnetische Wechselfeld des Längsfeldinduktors eintritt, gibt das Programm einen Fehler aus und beendet die Messung. Alle Versuche das Problem auf der Softwareseite zu lösen schlagen fehl. Die Steckkarte wird ebenfalls auf ihre Funktion überprüft, mit der Erkenntnis, dass die Fehlermeldung von der Steckkarte und nicht von der Software kommt. Da die verwendete Steckkarte für die Thermokabelmessung nur eine Spannung von  $\pm 80$  Millivolt auflösen kann, liegt es nahe, dass eine höhere Spannung über das Thermokabel übertragen wird.

*Thermokabelmessung funktioniert nicht*

Um diese Vermutung zu bestätigen wird die über das Thermokabel übertragene Spannung mittels LapVIEW gemessen. Dazu wird eine Steckkarte verwendet, die einen Spannungsbereich von  $\pm 10$  Volt abdeckt. Für die Spannungsmessung wird die Formplatte mittig im Längsfeldinduktor auf die Hubbalken gelegt. Erst nach dem Beginn der Messung wird der Umrichter eingeschaltet, um den Einfluss des magnetischen Wechselfeldes auf die Platine zu dokumentieren. Die Messergebnisse dieses Versuches sind in Abbildung 35 dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass extreme Spannungsspitzen beim Betrieb des Längsfeldinduktors über das Thermokabel übertragen werden. Normalerweise ist der Anschluss des Thermokabels galvanisch von der Steckkarte entkoppelt, jedoch scheint es so, dass sich die Steckkarte aufgrund einer Überspannung am Beginn der Messung ausschaltet.

*Überprüfung der übertragenen Spannung über das Thermokabel*

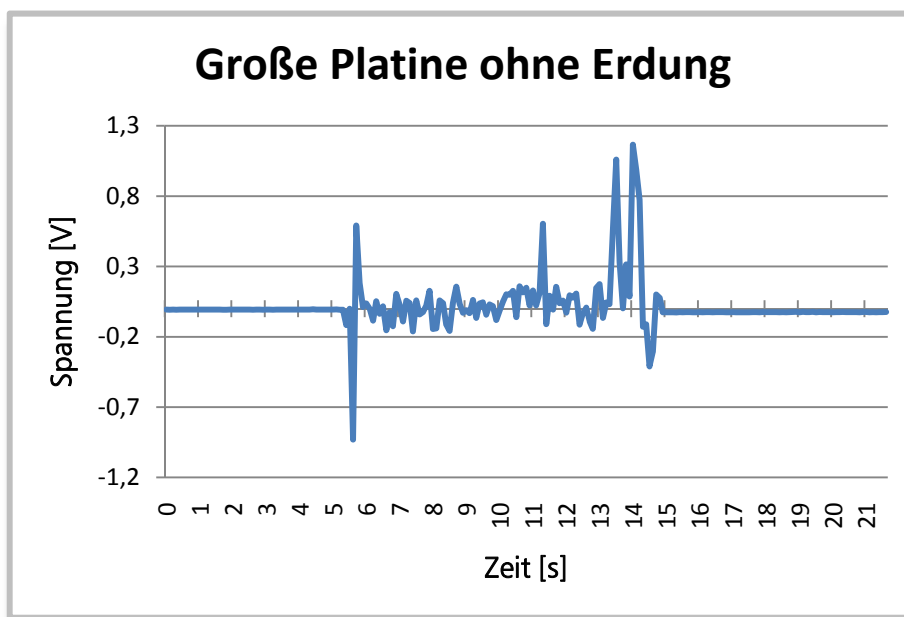


Abbildung 35 Gemessene Spannung am Thermokabel

Aufgrund der Tatsache, dass die Temperaturmessung im Längsfeldinduktor bei Vorabversuch bei der Inbetriebnahme des neuen Umrichters bereits einmal durchgeführt werden konnte, wird versucht den ausschlaggebenden Faktor zu finden. Bei dieser Inbetriebnahme wurde der Transport der Platine durch das Längsfeld mittels Edelstahlkette bewerkstelligt. Diese Kette wird von einem Elektromotor angetrieben der über das Gehäuse geerdet ist. Genau darin liegt der Grund für die Funktionsfähigkeit der Temperaturmessung mit diesem Aufbau. Über die Verbindung zwischen Platine, Mitnehmer, Kette und Motor wird die Spannung auf der Platine aufgrund der Erdung des Motors reduziert. Um diese Erkenntnis auch mit Werten zu hinterlegen wird eine Platine mit einer Erdung versehen und die Spannung auf dem Thermokabel während des Betriebes des Umrichters gemessen. In

*Suche nach Lösungen*



Abbildung 36 ist nun deutlich erkennbar, dass die Spannungsspitzen im Vergleich zu Abbildung 35 deutlich kleiner sind.

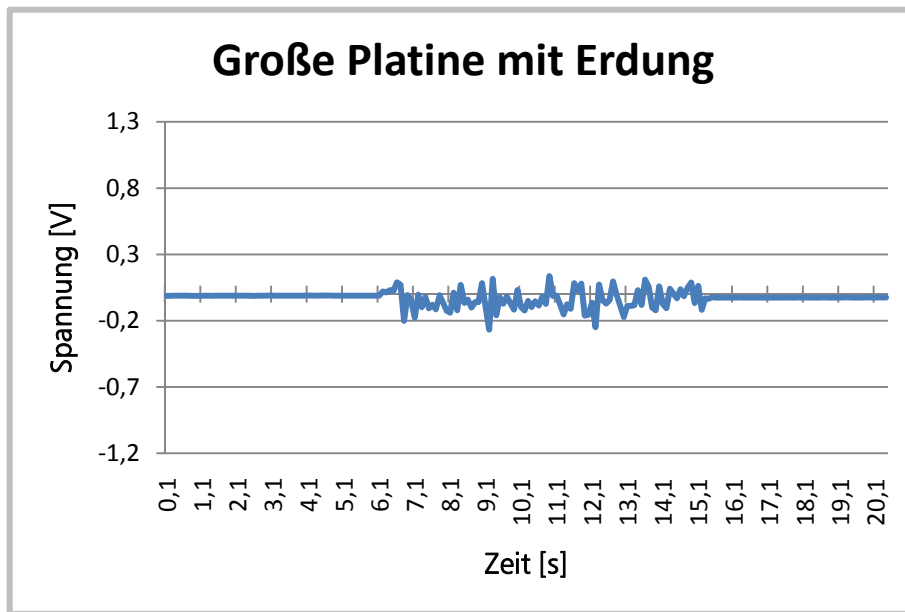


Abbildung 36 Gemessene Spannung am Thermokabel - Platine geerdet

Des Weiteren wird eine Temperaturmessung durchgeführt, bei der eine Platine kontinuierlich durch den Längsfeldinduktor gefördert wird. Es zeigt sich, dass die Temperaturmessung, auf einer mit einer Erde versehenen Platine, ohne Fehlermeldung funktioniert.

*Temperaturmessung  
funktioniert*

## 8 Versuchsdurchführung

Die Versuche werden nach Typ des verwendeten Induktors eingeteilt. Begonnen wird mit einer Charakterisierung des Längsfeldinduktors. Diesem gefolgt sind Versuche mit dem Flächeninduktor und dem Quersfeldinduktor. Des Weiteren werden Versuche mit einer Kombination aus Längsfeldinduktor und Flächeninduktor und zum Abschluss mit einer Kombination aus Längsfeldinduktor und Quersfeldinduktor durchgeführt.

*Ablauf der Versuche*

Um einen Werkstoffeinfluss der zu erwärmenden Platinen auszuschließen, wird für alle Erwärmungsversuche der unbeschichtete Werkstoff mit der Bezeichnung MBK 1500 mit einer Stärke von 1,5mm verwendet.

*Verwendeter Werkstoff*

### 8.1 Charakterisierung Längsfeldinduktion

Mit dem Längsfeldinduktor wird die Formplatinen auf 500°C, 600°C und Curie-Temperatur erwärmt. Hierfür ist es notwendig die maximale Vorschubgeschwindigkeit zu ermitteln, mit der die Platine noch auf Curie-Temperatur erwärmt werden kann. Die Curie-Temperatur vom Werkstoff MBK 1500 liegt laut den ersten Messungen zwischen 756°C und 758°C. Diese Variation der Temperatur befindet sich im Toleranzbereich der Temperaturmessung mittels Thermokabel. Der Toleranzbereich für Thermokabel vom Typ N der Toleranzklasse 1 wird mit  $0,004 \times T$  im Temperaturbereich zwischen 375°C und 1000°C angegeben [26].

*Zu erreichenden Temperaturen im Längsfeldinduktor*

#### 8.1.1 Auswahl der Vorschubgeschwindigkeit

Mit maximaler Spannung wird eine Vorschubgeschwindigkeit gesucht, mit der die Platine kurzzeitig auf die Curie-Temperatur erwärmt werden kann. Diese Vorschubgeschwindigkeit wird mit 33mm/s festgelegt.

*Maximale Vorschubgeschwindigkeit*

Um eine Aussage treffen zu können, mit welcher Geschwindigkeit eine homogenere Temperaturverteilung auf der Formplatine erreicht wird, ist eine weitere Vorschubgeschwindigkeit auszuwählen.

Diese langsamere Geschwindigkeit wird bereits vom Transportsystem mittels Hubbalken vorgegeben. Die minimale reproduzierbare Vorschubgeschwindigkeit liegt bei 25mm/s.

*Minimale Vorschubgeschwindigkeit*

#### 8.1.2 Vorbereitung der Formplatine für die Versuche

Alle Formplatinen werden für die Erwärmungsversuche mit Ofenlack auf der Ober- und Unterseite geschwärzt. Des Weiteren wird der Lack mittels Heißluftföhn auf beiden Seiten erwärmt und eingebrannt, dadurch wird eine allzu starke Rauchentwicklung während der induktiven Erwärmung vermieden.

*Platine wird geschwärzt*

Um die maximale Temperatureinbringung in die Formplatine in der Längsfeldspule zu messen wird auf der Unterseite jeder Formplatine ein Thermokabel an der festgelegten Position, laut Abbildung 37, angeschweißt.

*Anbringung Thermokabel*

Die Temperaturmessung funktioniert nur, wenn eine Erdung auf der Platine angebracht ist. Ein weiteres Thermokabel wird dafür in der Nähe des Befestigungspunktes des ersten Thermokabels auf die Platine angeschweißt und als Erdung verwendet. Somit ist es leichter beide Thermokabel beim Transport der Platine mit der Hand zu führen.

*Formplatte wird geerdet*

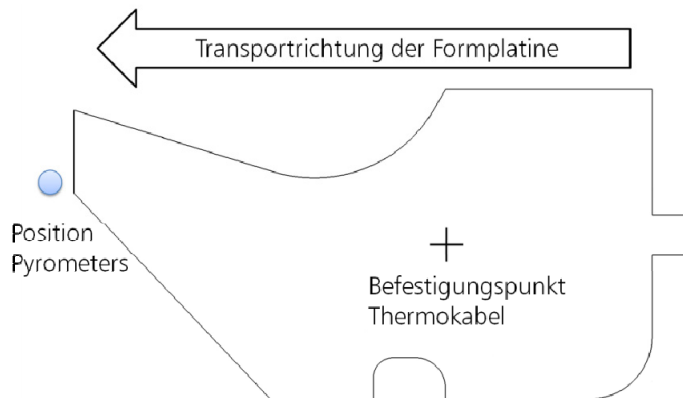


Abbildung 37 Position Pyrometer und Befestigungspunkt Thermokabel

Am Auslauf der Formplatte aus dem Längsfeldinduktor ist ein Pyrometer im Abstand von 3 cm von der Platinenunterseite befestigt. Das Pyrometer wird außermittig von der Platine positioniert, um zu verhindern, dass das Thermokabel im Bereich des Messflecks die Temperaturmessung beeinflusst. Mit dem Pyrometer wird die Temperaturverteilung über die Länge des soeben erwärmten Bleches gemessen.

*Position des Pyrometers*

Des Weiteren wird die Wärmebildkamera über dem Auslauf des Längsfeldinduktors aufgebaut und mit dem Laptop verbunden. Damit wird die Kamera über die Software gesteuert. Die Anzahl und der zeitliche Abstand zwischen den Wärmebildaufnahmen werden über die Software festgelegt. Von besonderer Wichtigkeit für eine ordnungsgemäße Aufnahme der Wärmebilder ist die Einstellung des passenden Kalibrierbereiches in der Software.

*Aufbau und Bedienung der Wärmebildkamera*

### 8.1.3 Anlagentechnische Vorbereitung

Der Transport der Formplatte zur Charakterisierung des Längsfeldinduktors wird mittels Hubbalken durchgeführt. Die Formplatte wird zuerst durch den Längsfeldinduktor ohne Erwärmung transportiert. Die Platine wird in entgegengesetzter zur normalerweise verwendeten Transportrichtung erwärmt. Die Versuche sind somit leichter zu bewerkstelligen, das Pyrometer leichter anzubauen, das Thermokabel und die Erdung besser mit der Hand zu führen. Für die Aufnahme der Wärmebilder steht ebenfalls mehr Platz zur Verfügung.

*Transportrichtung*

Aufgrund von Schwingungen des Transportsystems verdreht sich die Formplatte auf den Hubbalken. Dies führt zu einem verkannten der Formplatte

*Einlaufbleche sind anzufertigen und zu befestigen*

am Einlauf in den Längsfeldinduktor. Aus diesem Grund werden Einlaufbleche gefertigt und vor dem Längsfeldinduktor befestigt. Somit wird die Formplatte ohne sich zu verkannten oder verdrehen mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeit durch das Längsfeld transportiert.

#### 8.1.4 Versuchsablauf

Die Vorschubgeschwindigkeiten sind bereits mit 25mm/s und 33mm/s festgelegt. Die Einstellungen für die erforderliche Spannung sind noch zu ermitteln, mit denen die Formplatinen am Messpunkt des Thermokabels die gewünschten Temperaturen erreichen. Die am Umrichterausgang zur Verfügung stehende Spannung wird über eine Prozenteingabe am Bedienelement des Umrichters eingestellt. Sind die passenden Einstellungen gefunden, werden mit der Wärmebildkamera am Auslauf der Platine aus dem Längsfeldinduktor Bilder im Abstand von einer Sekunde aufgenommen.

*Spannungswerte für die gewünschte Temperatur sind zu ermitteln*

#### 8.1.5 Erklärung Versuchsauswertung

Auf den folgenden Seiten befindet sich die Auswertung der Versuche zur Charakterisierung des Längsfeldinduktors.

Hierbei sind jeweils die Versuche nach den erreichten Temperaturen von 500, 600 und Curie-Temperatur mit den Vorschubgeschwindigkeiten von 25mm/s und 30mm/s angeführt.

*Anordnung*

Alle Wärmebilder sind mit einem aus den Thermokabelmessungen erhaltenen Temperaturwert und einem daraus in der Software angepassten Emissionskoeffizienten versehen. Somit sind die Temperaturwerte auf den Wärmebildern den tatsächlichen Temperaturwerten auf der Formplatte bestmöglich angenähert. Zu beachten ist der unterschiedlich gewählte Temperaturbereich der Wärmebilder bei den unterschiedlichen Zieltemperaturen.

*Wärmebilder mit angepassten Emissionskoeffizienten*

Die Profildiagramme werden ebenfalls erst nach der Anpassung des Emissionskoeffizienten erstellt. Zum Profildiagramm ist anzumerken, dass es keine Übereinstimmung der Länge der Profillinien L1 und L2 auf den Wärmebildern und dem Profildiagramm gibt. Die Profillinie L1 entspricht den Temperaturwerten der Linie L1 von oben nach unten.

*Profildiagramme*

Auf dem zweiten Diagramm sind die Temperaturwerte der Thermokabel- und Pyrometermessung angeführt.

*Thermokabelmessung*

Die Temperaturwerte des Pyrometers werden mit einem Emissionskoeffizienten von 0,89 aufgenommen. Diese Werte können nicht bearbeitet und an den tatsächlichen Emissionskoeffizienten angepasst werden. Der Emissionskoeffizient müsste für jede Endtemperatur neu ermittelt werden. Aus diesem Grund wird bei den weiteren Versuchen zur qualitativen Temperaturmessung die Thermografiekamera herangezogen, da hierbei ein Abgleich des Emissionskoeffizienten auch nach der Messung durch den Vergleich mit den Messwerten des Thermokabels möglich ist.

*Pyrometermessung*

Die Messwerte des Pyrometers sind beispielhaft in den Temperaturmessungen für die Längsfelderwärmung im Diagramm belassen, weisen jedoch aufgrund des fest eingestellten Emissionskoeffizienten einen Unterschied zu den tatsächlichen Temperaturwerten auf. Auf den Temperaturmessungen mittels Pyrometer zeigt sich in einigen Diagrammen aufgrund der rapiden Temperaturverringern, dass die Platine ihre Lage auf den Hubbalken verändert und sich somit der Messfleck zeitweise nicht zur Gänze auf der Formplatte befindet.

*Vorsicht bei den Temperaturwerten des Pyrometers*

Im Anschluss werden die Ergebnisse jeder Zieltemperatur, die mit beiden Vorschubgeschwindigkeiten erreicht wurden, diskutiert. Im Anhang ist die Auswertung von jedem einzelnen Bauteil angeführt.

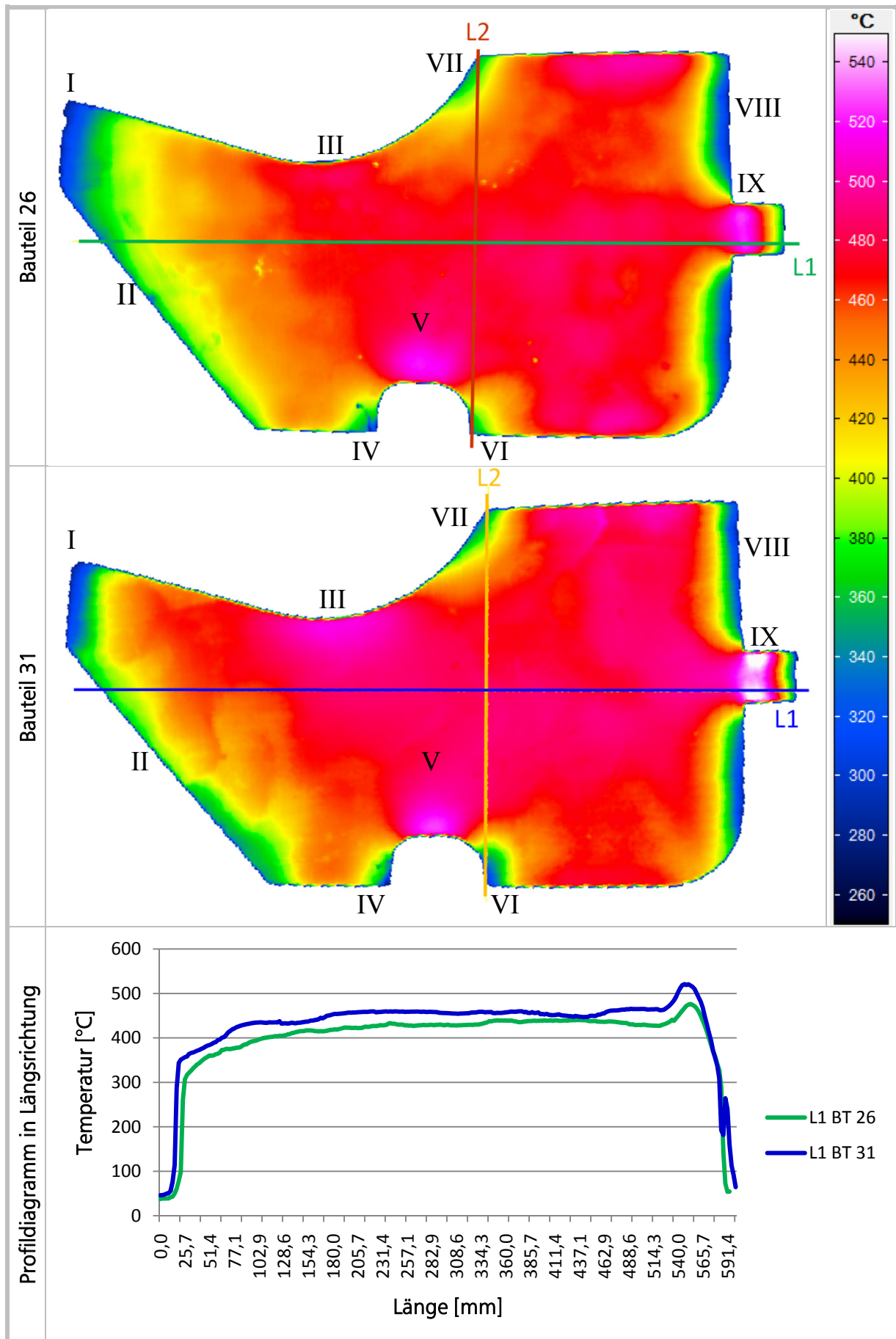
*Ergebnisdiskussion im Anschluss*

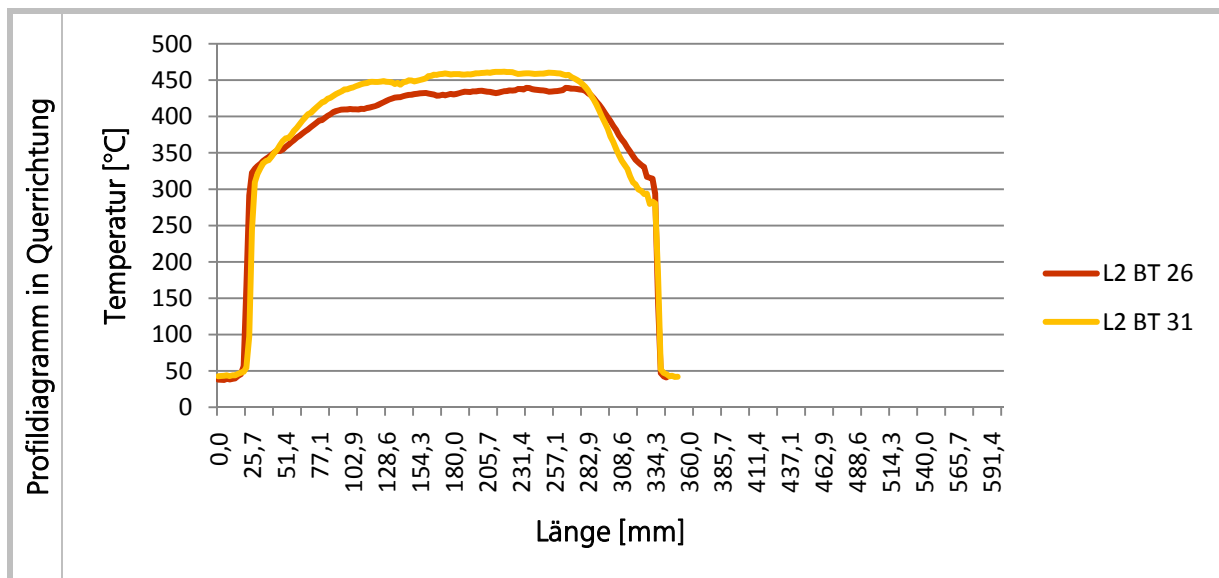
Für einen einfacheren Vergleich der Bauteile werden Bereiche von Interesse auf der Formplatte mit römischen Ziffern gekennzeichnet.

Bauteil	Zieltemperatur [°C]	Erreichte Temperatur [°C]	Vorschubgeschwindigkeit [mm/s]	Spannung [%]
26	500	508	25	50
31	500	510	33	60
28	600	612	25	58
32	600	616	33	71
25	Curie	756	25	73
33	Curie	758	33	100

Tabelle 8 Versuchsablauf Längsfeldinduktion

8.1.5.1 Zieltemperatur 500°C



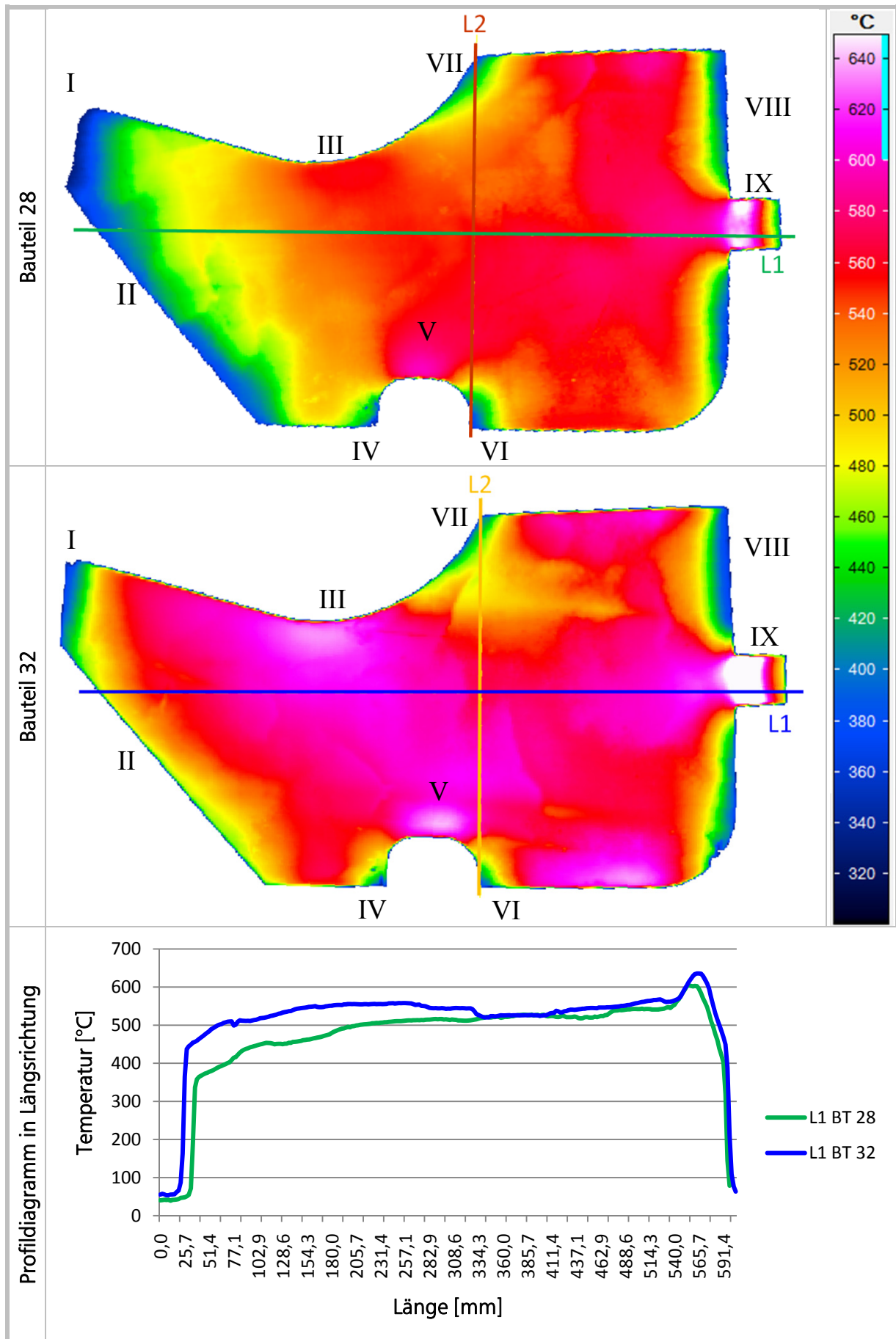


### Auswertung Zieltemperatur 500°C

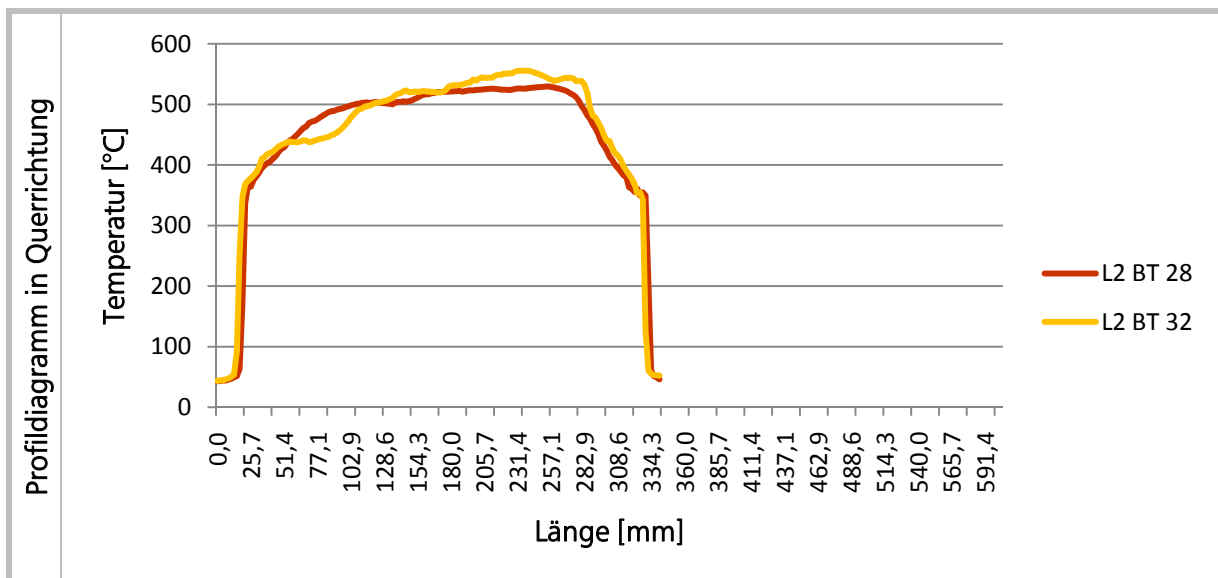
Schnell erkennbar ist, dass die Temperatur im Bereich I auf dem Bauteil 26 geringer ist als auf Bauteil 31. Dies ist auf die langsamere Vorschubgeschwindigkeit und die damit verbundene längere Abkühlzeit an der Umgebungsluft zurückzuführen. Im Bereich II ist der Temperaturunterschied zwischen beiden Bauteilen kaum feststellbar. Vor allem auf dem Bauteil 31 ist in den Bereichen III, V und IX eine deutlich erhöhte Temperatur im Vergleich zur restlichen Platine erkennbar. Diese Bereiche mit höherer Temperatur sind auf eine Konzentration der Wirbelströme zurückzuführen. Im Bereich VIII zeigt sich auf beiden Bauteilen, dass die Zone am Ende der Formplatte eine deutlich niedrigere Temperatur aufweist. Ebenso verhält es sich mit den Bereichen IV, VI und VII auf beiden Bauteilen. Erstaunlich ist, dass die Temperatur im Bereich VI im Bauteil 26 kleiner ist als im Bauteil 31.

*Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit*

8.1.5.2 Zieltemperatur 600°C







### Auswertung Zieltemperatur 600°C

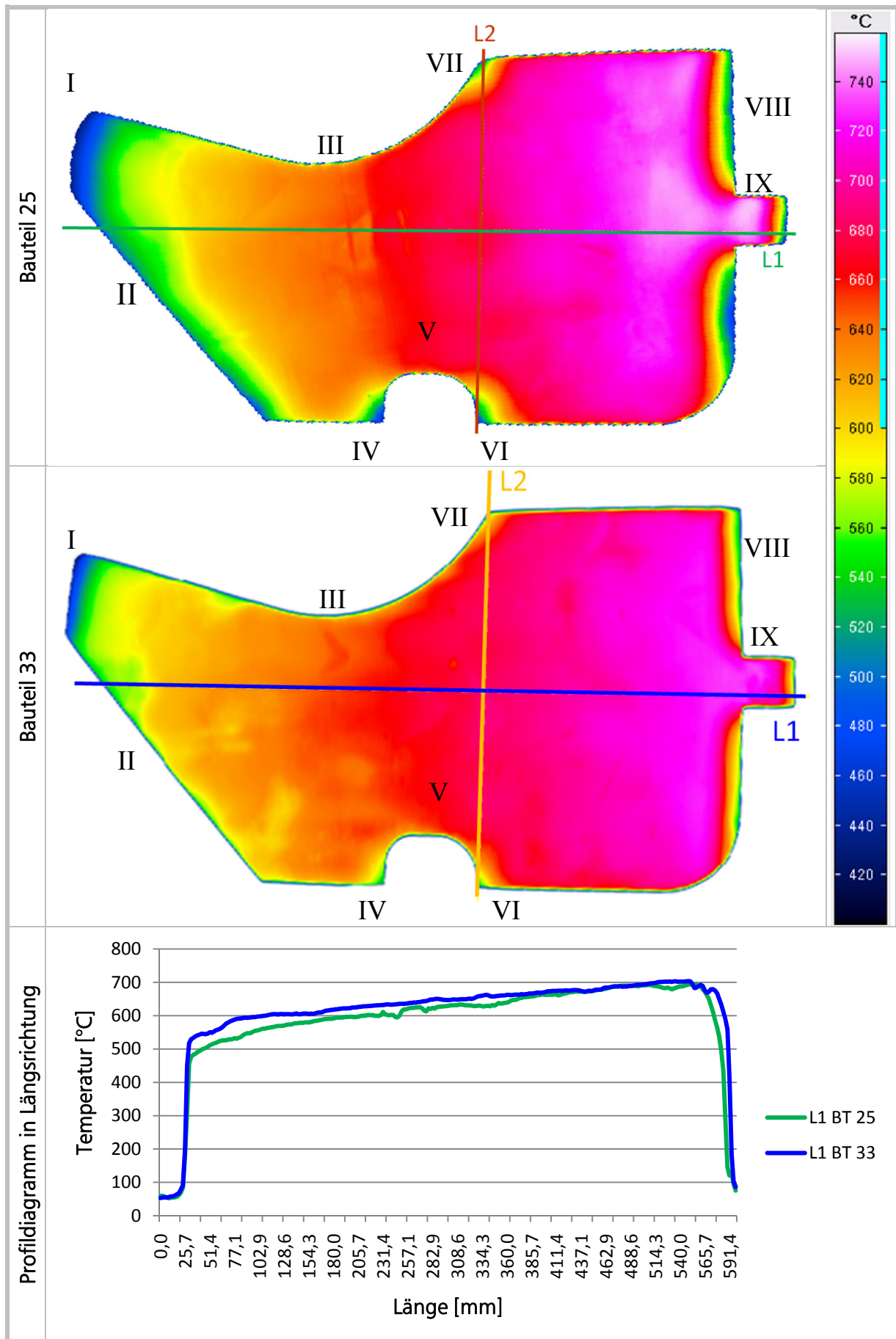
Bei der Betrachtung der Wärmebilder fällt auf, dass die Bereiche I und II auf dem Bauteil 28 kälter sind als auf Bauteil 32. Dies folgt wieder aus der langsameren Vorschubgeschwindigkeit und der längeren Abkühlung an der Umgebungsluft. Dieser große Temperaturunterschied zeigt sich auch auf den Linien L1 der Profildiagramme der jeweiligen Bauteile. Im Bauteil 28 liegt der Anfangswert der Profillinie L1 auf der Platine bei 365°C und im Bauteil 32 bei 437°C. Der Bereich VIII am Ende der Platine ist auf beiden Bauteilen fast ident. Im Bereich IX des Bauteils 32 zeigt sich wieder deutlich der Verlauf der Wirbelströme. Damit verbunden ist auch eine höhere Temperatur in diesem Bereich.

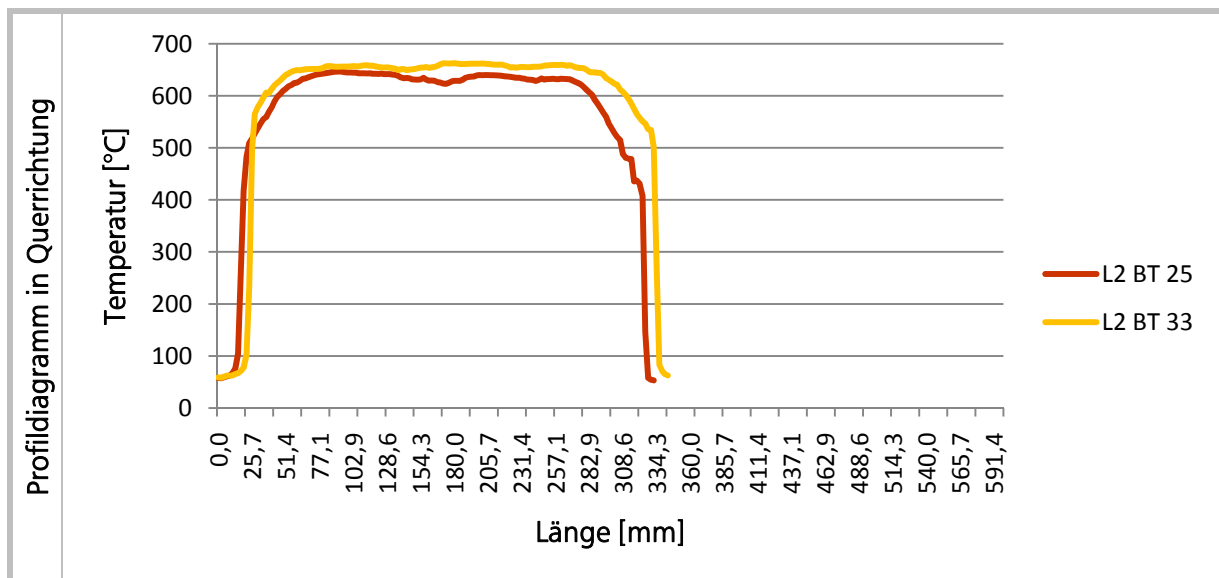
Profildiagramm

Die Werte der Thermokabelmessung zeigen gut den kontinuierlichen Anstieg der Temperatur während der Erwärmung im Längsfeldinduktor. Nach dem Erreichen der Maximaltemperatur wird die Abkühlung der Platine an der Umgebungsluft abgebildet. Die Werte der Pyrometermessung sind nur begrenzt verwertbar. Erstens ist der Emissionskoeffizient auf den fixen Wert 0,89 eingestellt, dieser müsste an jeden Temperaturbereich angepasst werden. Als weiteres Problem kommt hinzu, dass sich die Platine auf den Hubbalken verdreht. Somit trifft der Messfleck zeitweise nicht zur Gänze auf die Formplatine. Dieser Fall zeigt sich im Diagramm des Bauteils 32, hier sinkt die Temperatur auf der Formplatine kurzzeitig ab.

Temperaturmessung Thermokabel

8.1.5.3 Zieltemperatur Curie





### Auswertung Zieltemperatur Curie

Das Bauteil 33 bringt das gewünschte Ergebnis der Erwärmungsversuche mit dem Längsfeldinduktor. Auf dieser Formplatine ist die Temperatur im Vergleich zum Bauteil 25 viel homogener verteilt. Die Temperatur in den Bereiche IV, VI und VII ist fast gleich wie in der Mitte der Formplatine. Der kühlere Rand im Bereich VIII ist extrem klein. Des Weiteren ist in der Lasche im Bereich IX keine erhöhte Temperatur messbar. Dies zeigt sich auch auf der Temperaturkurve L1 im Profildiagramm des Bauteils 33. Der Anstieg der Temperaturwerte auf L1 im Bereich IX, wie auf den Bauteilen mit 500 und 600°C als Zieltemperatur, fehlt komplett. Dass es zu keinem überhitzen in diesem Bereich kommt, lässt sich mit dem Erreichen der Curie-Temperatur erklären. Damit verliert der Werkstoff seinen Ferromagnetismus und die magnetischen Feldlinien werden nicht mehr in den Werkstoff gezogen. Somit können keine größeren Wirbelströme entstehen, die zu einer weiteren Erwärmung der Formplatine führen. Aufgrund der Tatsache, dass beide Platinen auf Curie-Temperatur erwärmt wurden ist festzustellen, dass die Abkühlung der Platine nach der Erwärmung verhindert werden muss. Ist das nicht möglich, so ist die Vorschubgeschwindigkeit so schnell als möglich zu wählen, wie der Vergleich der Bauteile 25 und 33 zeigt.

*Homogene Erwärmung erreicht*

## 8.2 Charakterisierung Flächeninduktion

Bei der induktiven Erwärmung mittels Flächeninduktor ist der Abstand zwischen dem Induktor und dem zu erwärmenden Gut von besonderer Bedeutung. Der Abstandseinfluss wird dargestellt, indem Platinen mit einem unterschiedlichen Abstand zum Flächeninduktor erwärmt werden.

*Abstandseinfluss*

Hier tritt jedoch das Problem auf, dass sich die zu erwärmende Platine aufgrund der unterschiedlichen Temperatureinbringung verformt. Die unterschiedliche Temperatureinbringung des Flächeninduktors wird für eine ruhende Platine in Abbildung 38 gezeigt. Durch die Verformung verkeilt sich die Platine bei einem kleinen Abstand zwischen dem Flächeninduktor und der Transporteinrichtung. Mit der Verkeilung und dem damit verbundenen nicht kontinuierlichen Transport der Platine sind reproduzierbare Erwärmungsversuche nur schwer durchzuführen.

*Verformung aufgrund der Temperatureinbringung*

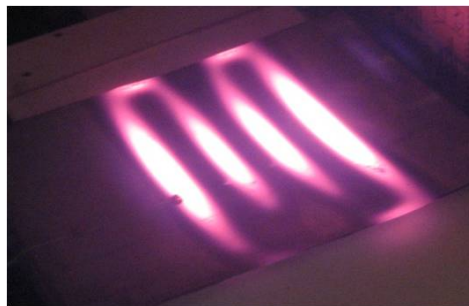


Abbildung 38 Temperatureinbringung des Flächeninduktors

### 8.2.1 Auswahl der Vorschubgeschwindigkeit

Die Vorschubgeschwindigkeit wird aufgrund der Erkenntnisse aus den Längsfeldversuchen mit 33mm/s gewählt. Mit dieser Geschwindigkeit kann die Formplatte im Längsfeldinduktor noch auf Curie-Temperatur erwärmt werden.

*Gleiche Vorschubgeschwindigkeit wie im Längsfeld*

### 8.2.2 Einstellung der Frequenz

Über den an den Flächeninduktor angebauten Anpassungstransformator wird durch eine Veränderung der Anzahl der Kondensatoren die Frequenz verändert. Die Versuche werden jeweils mit 3 oder 6 Kondensatoren durchgeführt. Bei der Verwendung von 3 Kondensatoren stellt sich eine Frequenz von 9,2 kHz ein, bei 6 eingebauten Kondensatoren wird eine Frequenz von 6,7 kHz erreicht.

*Veränderung der Frequenz*

### 8.2.3 Anlagentechnische Vorbereitung

Die Verformung aufgrund der Temperatureinbringung tritt verstärkt bei der Erwärmung von großen Platinen auf. Mit dem Hubbalkensystem ist ein kontrollierter Transport der Formplatine unter dem Flächeninduktor nicht möglich. Eine weitere Schwierigkeit liegt darin, dass die Platine vom Flächeninduktor aufgrund der Feldwirkung angezogen wird, solange nicht Curie-Temperatur erreicht ist.

*Verformung aufgrund der unterschiedlichen Temperatureinbringung*

Das Anhaften der Platine wird am einfachsten verhindert, indem die Platine zuerst im Längsfeldinduktor auf Curie-Temperatur erwärmt wird.

*Verhindern des Anhaftens der Formplatine*

## 8.2.4 Versuchsablauf Abstandseinfluss

Für die Dokumentation des Abstandseinflusses werden die Platinen von Raumtemperatur aus erwärmt.

*Abstandseinflussversuche:  
Blech bei Raumtemperatur*

Jedoch treten hierbei die Probleme des Anhaftens der Platine an den Flächeninduktor auf. Dieses Problem kann mit dem derzeitigen Hubbalkensystem nicht gelöst werden. Somit wird für den Transport der Platine das Fördersystem mit der Edelstahlkette verwendet. Die Mitnehmer auf der Kette vermindern die Verformung der Platine aufgrund der unterschiedlichen Temperatureinbringung, auch das Anhaften der Platine an den Flächeninduktor wird verhindert. Der Einfluss der Edelstahlkette auf das Erwärmungsverhalten der Platine wird so gut als möglich ausgeschlossen, indem auf die Edelstahlkette Keramikplättchen befestigt werden. Somit liegt die Platine nicht direkt auf der Kette auf. Das Thermokabel für die Temperaturmessung wird genau zwischen den Edelstahlketten angeschweißt, wie auf Abbildung 39 ersichtlich ist.

*Hubbalkensystem wird  
gegen Edelstahlkette ausgetauscht*

Für die Versuche wird anstatt der Formplatine eine Rechteckplatine der Größe 260mm x 260mm verwendet, da sich diese kleinere Platine weniger verformt und somit ein gleichbleibender Abstand gegeben ist.

*Kleine Rechteckplatine wird  
für Versuche erwärmt*



Abbildung 39 Flächeninduktor mit Edelstahlkette

Der Abstand zwischen dem Flächeninduktor und der Platine wird von der Unterseite der Isolierplatte des Flächeninduktors aus gemessen. Die Isolierplatte hat eine Stärke von 15mm. In den Versuchsreihen wird der Abstand zwischen dem Flächeninduktor und der Platine von 5 auf 25mm, in 5mm Schritten, vergrößert.

*Messen des Abstandes*

Die Spannung für die Flächenspule wird mit 90 Prozent gewählt. Für jeden Abstand werden drei Versuche durchgeführt. Somit ist eine klare Aussage bezüglich des Erwärmungsverhaltens zu treffen und Messabweichungen werden ausgeschlossen.

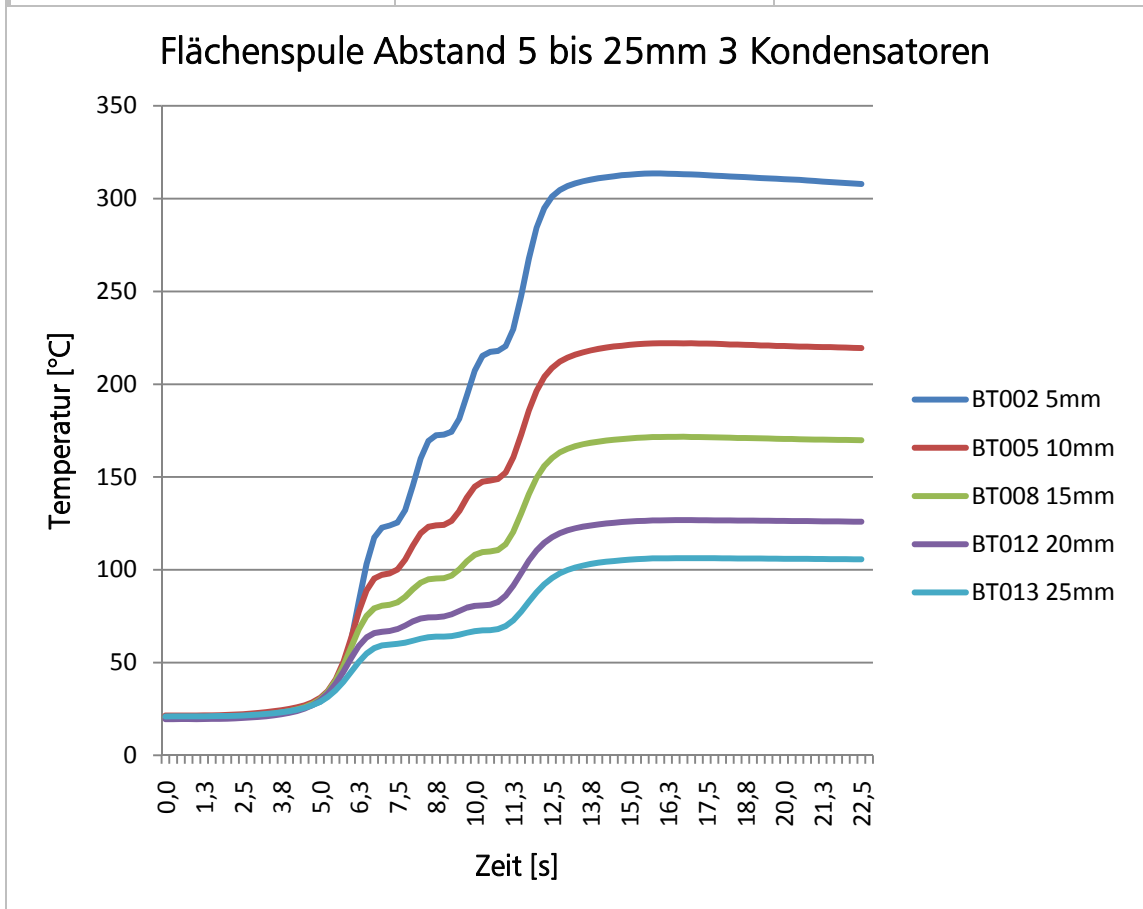
3 Versuche für jeden Abstand

Die Temperatur wird nur mittels Thermokabel gemessen, da keine relevanten Endtemperaturen erreicht werden. Die Temperaturverteilung auf der kleinen Rechteckplatte ist von keiner großen Bedeutung.

Temperaturmessung mittels Thermokabel

### 8.2.5 Abstandseinfluss 3 Kondensatoren

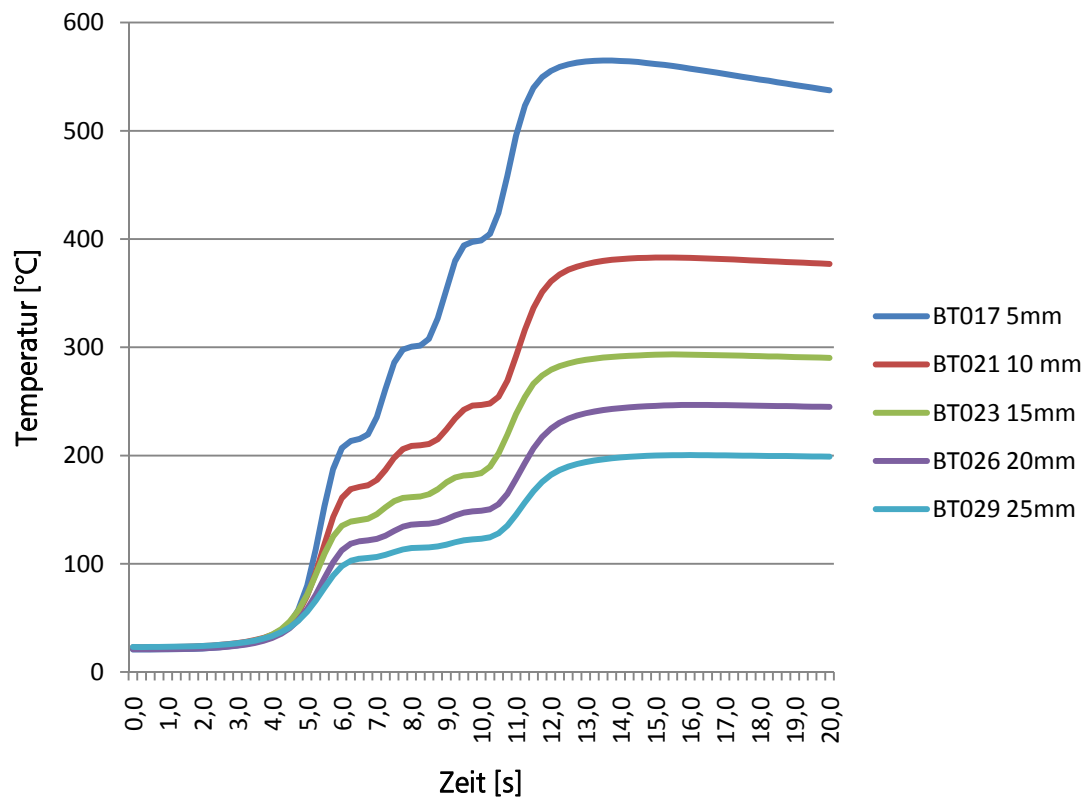
Datum: 10.11.2010		
Induktor: Flächeninduktor		Spannung: 90%
Vorschub: 33mm/s		Anzahl der Kondensatoren: 3 Stück
Bauteil	Abstand	Maximale Temperatur
BT002	5 mm	313 °C
BT005	10 mm	222 °C
BT008	15 mm	171 °C
BT012	20 mm	126 °C
BT013	25 mm	106 °C



## 8.2.6 Abstandseinfluss 6 Kondensatoren

Datum: 10.11.2010		
Induktor: Flächeninduktor		Spannung: 90%
Vorschub: 33mm/s		Anzahl der Kondensatoren: 6 Stück
Bauteil	Abstand	Maximale Temperatur
BT017	5 mm	565 °C
BT021	10 mm	382 °C
BT023	15 mm	293 °C
BT026	20 mm	246 °C
BT029	25 mm	200 °C

Flächenspule Abstand 5 bis 25mm 6 Kondensatoren





### 8.2.7 Auswertung Abstandseinfluss

Der Einfluss des Abstandes auf die maximal erreichbare Temperatur wird in Abbildung 40 gezeigt. Hier ist jedoch zu bedenken, dass die Isolierplatte des Flächeninduktors 15mm stark ist. Das Diagramm weist auf eine exponentielle Erhöhung der erreichbaren Endtemperatur bei einer Verringerung des Abstandes hin. Durch die Verwendung einer dünneren Platte mit einer Stärke von 10 oder 5 Millimetern kann eine deutlich höhere Endtemperatur erreicht werden.

*Anstieg der Temperatur bei  
Abstandsverringering*

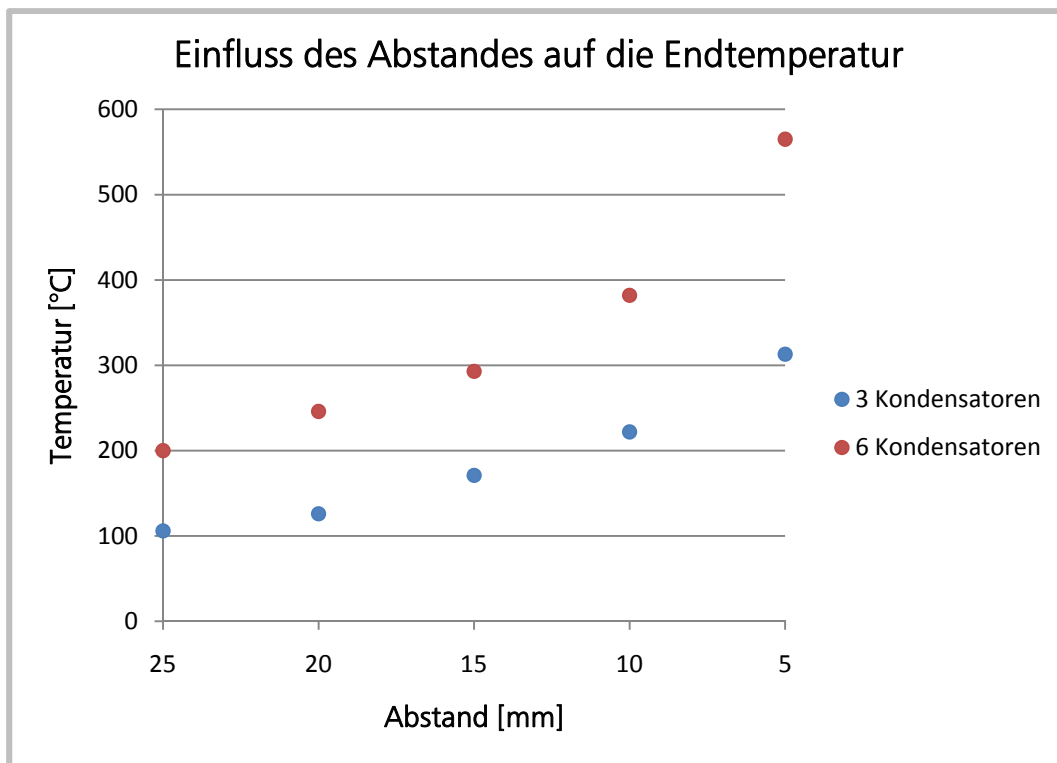


Abbildung 40 Abstandseinfluss auf die Endtemperatur bei Erwärmung mittels Flächeninduktor

## 8.3 Charakterisierung Quersfeldinduktion

Das Hauptanwendungsgebiet der Quersfeldinduktion liegt in der Erwärmung von Bandmaterial. Von besonderem Interesse für die Charakterisierung ist die Erwärmung von einzelnen Formplatinen.

*Verwendung von Quersfeldinduktoren*

### 8.3.1 Anlagentechnische Vorbereitung

Für den Transport der Platinen durch den Quersfeldinduktor wird das Hubbalkensystem verwendet. Mit dem Quersfeldinduktor können auch alle Nichteisenmetalle erwärmt werden. Somit würde sich die Edelstahlkette im Einflussbereich des Quersfeldinduktors bis zum Schmelzen erwärmen. Der Aufbau des Quersfeldinduktors mit dem Hubbalkensystem wird in Abbildung 41 gezeigt.

*Gewählte Transporteinrichtung*

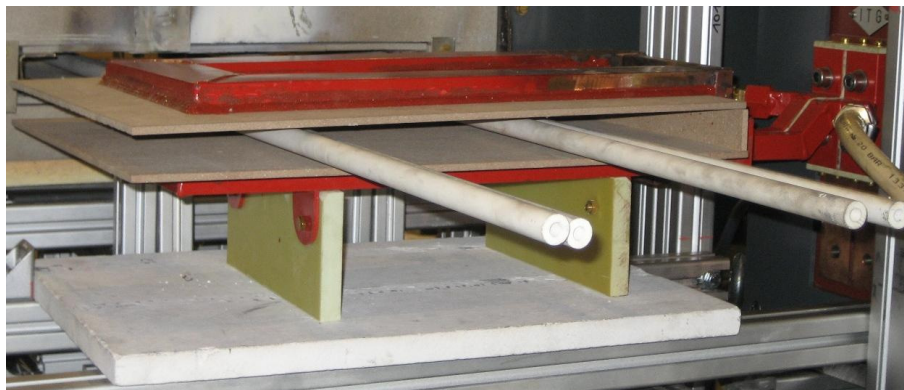


Abbildung 41 Aufgebauter Quersfeldinduktor

### 8.3.2 Versuchsablauf

Zuerst wird eine Formplatte mit dem Quersfeldinduktor erwärmt. Die Spannung wird mit 50 Prozent und der Vorschub mit 33mm/s gewählt.

*Einstellungsparameter*

Die Formplatte wird durch das magnetische Wechselfeld des Quersfeldinduktors stark erwärmt und auch aufgrund der unterschiedlichen Temperatureinbringung so stark verformt, dass sich die Platte Induktor verkeilt.

Das Verkeilen der Platte führt auch zu einem Ausfall des Vorschubs und die Bereiche der Platte, die sich im magnetischen Wechselfeld des Quersfeldinduktors befinden, werden bis zum Schmelzen erwärmt. Eine verkeilte Platte im Quersfeldinduktor wird in Abbildung 42 gezeigt.

*Formplatte verkeilt sich im Quersfeldinduktor*

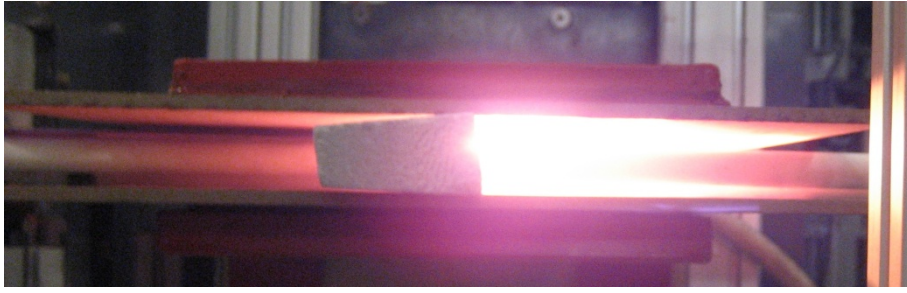


Abbildung 42 Platine steckt im Quersfeldinduktor fest

Der Versuch wird aufgrund dieser Erkenntnisse mit einer kleineren Platine und den gleichen Einstellungen wiederholt. Auch diese Platine bleibt aufgrund der Aufbiegung und der beengten Platzverhältnisse im Quersfeldinduktor kurzzeitig stehen. Auf dieser Platine zeigt sich, dass die Temperatur links und rechts im Randbereich der Platine wesentlich höher ist als in der Mitte. Die Erwärmungsversuche mit dem Quersfeldinduktor werden abgebrochen.

*Kleine Platine wird verwendet*

Um eine Erwärmung mit dem Quersfeldinduktor überhaupt durchführen zu können muss im weiteren Versuchsablauf eine Kombination aus Längsfeldinduktor und Quersfeldinduktor vorgesehen werden.

*Abbruch der Versuche*

## 8.4 Kombination Längsfeldinduktion und Flächeninduktion

Das Ziel der Versuche, mit einer Kombination aus Längsfeldinduktor und Flächeninduktor, liegt in der Erwärmung einer Formplatte auf 950°C, mit einer homogenen Temperaturverteilung. Die Formplatte wird zuerst im Längsfeldinduktor auf 500°C, 600°C und Curie-Temperatur erwärmt. Ausgehend davon erfolgt eine Erwärmung im Flächeninduktor auf 950°C.

Versuchsprogramm

Versuchsreihe	Bauteile	Zieltemperatur Längsfeldinduktor [°C]	Zieltemperatur Flächeninduktor [°C]	Vorschubgeschwindigkeit [mm/s]	Höhe Isolierplatte [mm]	Abstand [mm]
1		500	950	33	15	18
2		500	950	25	15	18
3	45	Curie	950	25	9	19
4	55	500	950	33	9	19
5	57/59	600	950	33	9	19
6	54	Curie	950	33	9	19
7		Curie	950	33	9	14

Tabelle 9 Versuchsablauf Kombination Längsfeld- & Flächeninduktor

### 8.4.1 Anlagentechnische Vorbereitung

Die Abkühlung der Platine zwischen dem Längsfeldinduktor und dem Flächeninduktor wird verhindert, indem der Flächeninduktor so nahe als möglich an den Längsfeldinduktor angebaut wird. Des Weiteren wird ein Edelstahlblech zur Verminderung der Abstrahlverluste im Zwischenraum der beiden Induktoren montiert. Die Platine wird mittels Hubbalkensystem transportiert. Die Isolierplatte des Flächeninduktors ist 15mm stark und der Abstand zwischen Flächeninduktor und dem Hubbalkensystem beträgt 18mm.

Abstrahlverluste werden vermindert

## 8.4.2 Versuchsablauf

### Versuchsreihe 1

In einem ersten Schritt wird ausgehend von 500°C im Längsfeldinduktor und 100% Spannung im Flächeninduktor die maximal erreichbare Temperatur ermittelt. Mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 33mm/s und maximaler Spannung ist es nicht möglich die Formplatte mit dem Flächeninduktor auf eine Temperatur von 950°C zu erwärmen. Die erreichbare Temperatur liegt beim Bauteil 40 bei 840°C.

*Auswahl Vorschubgeschwindigkeit*

### Versuchsreihe 2

Aufgrund der Erkenntnisse der Versuchsreihe 1 wird die Vorschubgeschwindigkeit mit 25mm/s gewählt. Mit dieser Geschwindigkeit ist es möglich eine Formplatte, ausgehend von 500°C im Längsfeldinduktor, auf eine Endtemperatur von 950°C im Flächeninduktor zu erwärmen. Dies zeigt sich im Bauteil 42, hier wird die geforderte Temperatur im Längsfeld mit 540°C ein wenig überschritten. Im Flächeninduktor wird eine Temperatur von 1131°C erreicht, dies jedoch bei einer Aufbiegung der Formplatte nach oben.

*Langsamere Geschwindigkeit wird gewählt*

In den weiteren Versuchen zur Findung der Spannungsprozente für eine Erwärmung auf 950°C unter dem Flächeninduktor zeigt sich, dass die Erwärmungsversuche aufgrund der Aufbiegung der großen Platine nicht reproduzierbar ist. Des Weiteren verkeilt sich die Formplatte bei einer starken Aufbiegung und wird nicht kontinuierlich befördert.

*Erwärmung ist aufgrund der Aufbiegung nicht reproduzierbar*

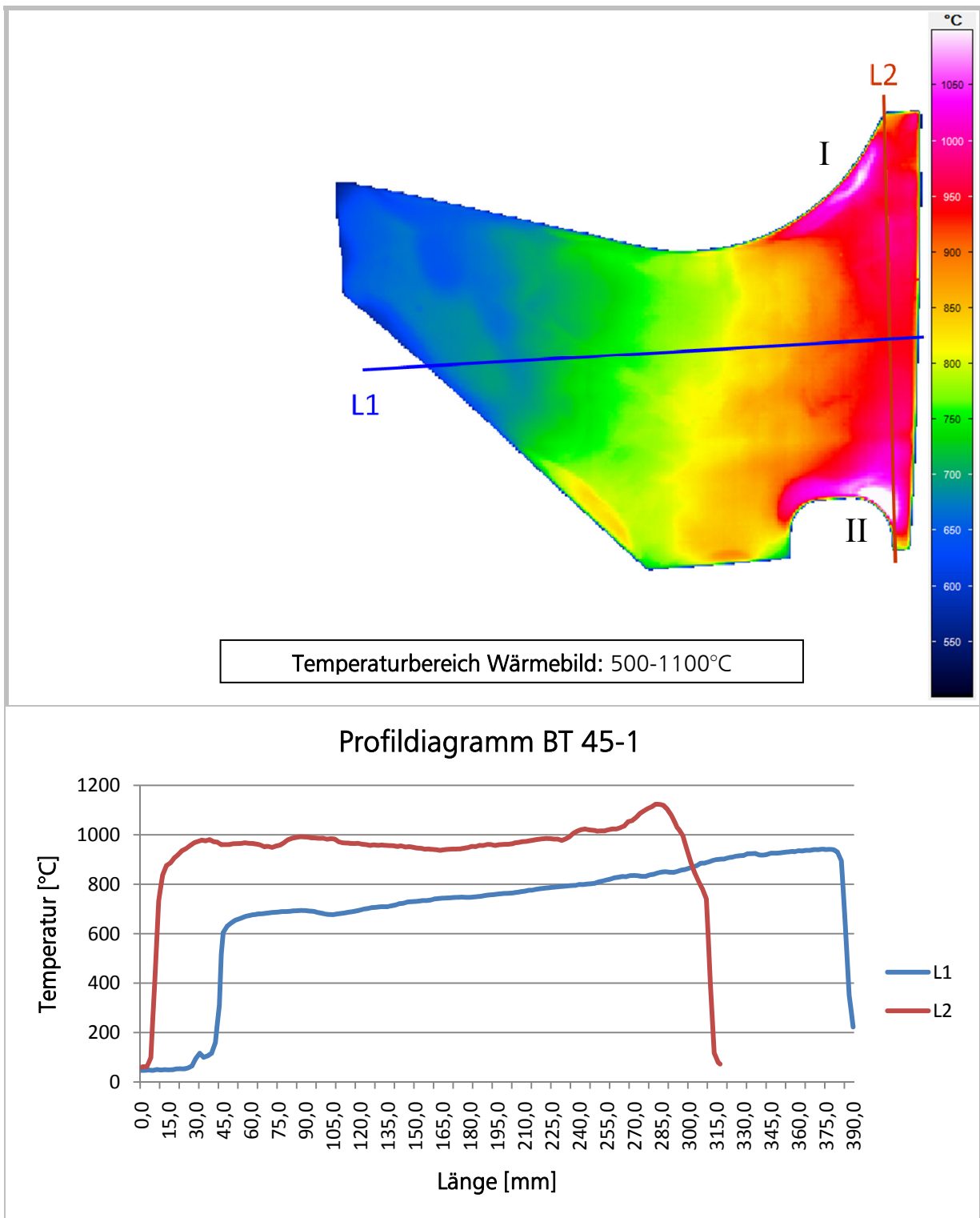
### Versuchsreihe 3

Das Verkeilen der Formplatte unter dem Flächeninduktor wird durch den Wechsel der 15mm starken und porösen Isolierplatte gegen eine 9mm starke Fliese, mit einer harten und glatten Oberfläche, verhindert. Der Flächeninduktor wird insgesamt 5 mm tiefer gesetzt, um den Abstand zwischen Flächeninduktor und den Hubbalken fast gleich zu halten. Das Bauteil 45 wird im Längsfeld auf Curie-Temperatur und im Längsfeldinduktor auf 1025°C erwärmt, die Vorschubgeschwindigkeit beträgt 25mm/s. Die Endtemperatur wird trotz Durchbiegung der Formplatte nach unten, im Bereich des Thermoelements, überschritten.

*Maßnahmen gegen das Verkeilen der Platine*

### Bauteil 45-1 Platine im Flächeninduktor nach unten gebogen

Datum: 17.11.2010	Zieltemperatur: Curie/950
Induktor: Längsfeldinduktor	Spannung: 73%
Induktor: Flächeninduktor	Spannung: 90%
Vorschub: 25mm/s	Max. Temperatur Thermokabel: 1025°C
Thermobildnummer.: 40023	Aufnahmezeit Thermobild: 18:27:41,750
Emissionskoeffizient: 0,87	Temperatur am Messpunkt zur Aufnahmezeit: 942°C

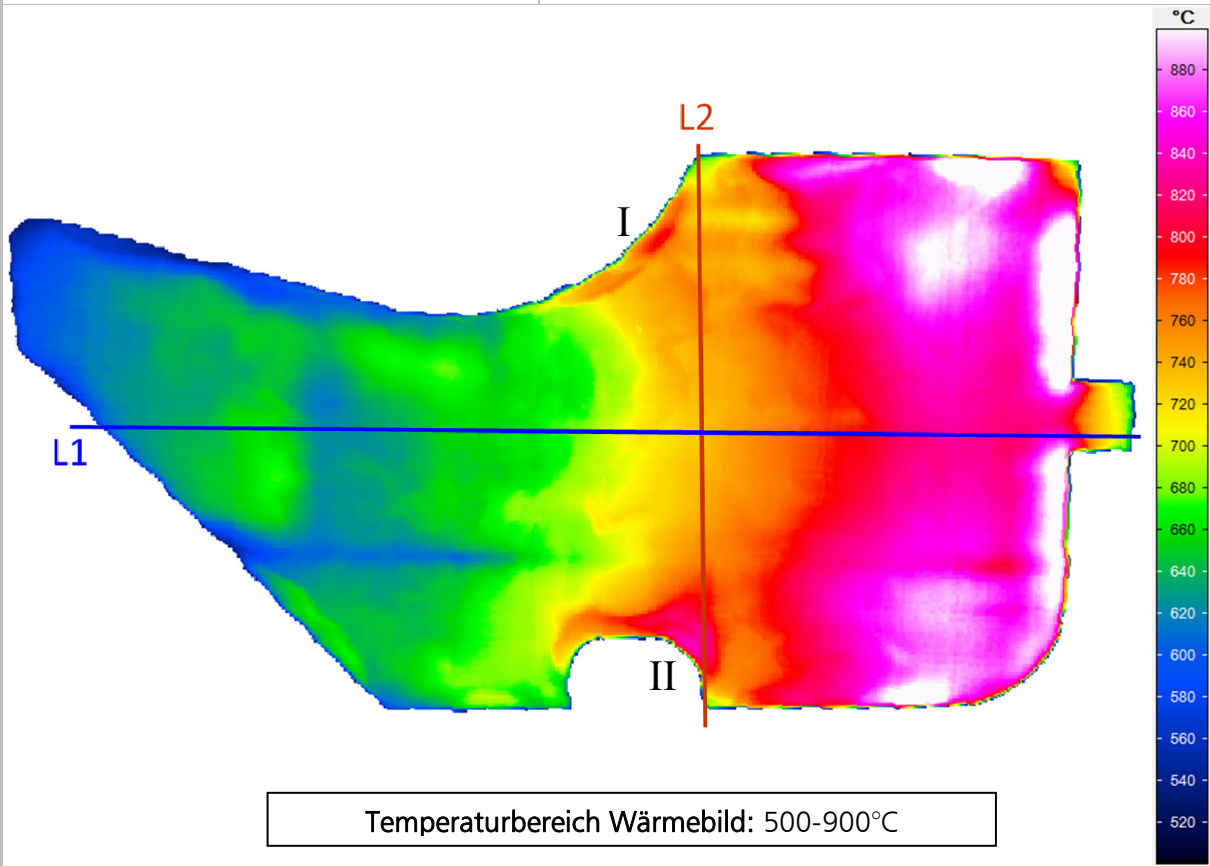


Vom Bauteil 45 werden zwei Wärmebilder mit dem zugehörigen Profildiagrammen gezeigt. Auf Bauteil 45-1 wird das Wärmebild der Formplatte beim Verlassen des Längsfeldinduktors gezeigt. Dieses Thermobild ist von Interesse, da nur zu diesem Zeitpunkt die Überhitzung in den Bereichen I und II erkennbar ist. Das Wärmebild 45-2 zeigt die Formplatte nach dem Verlassen des Flächeninduktors. Auf diesem Wärmebild ist die vorhergehende Kantenüberhitzung in den Bereichen I und II nur leicht sichtbar.

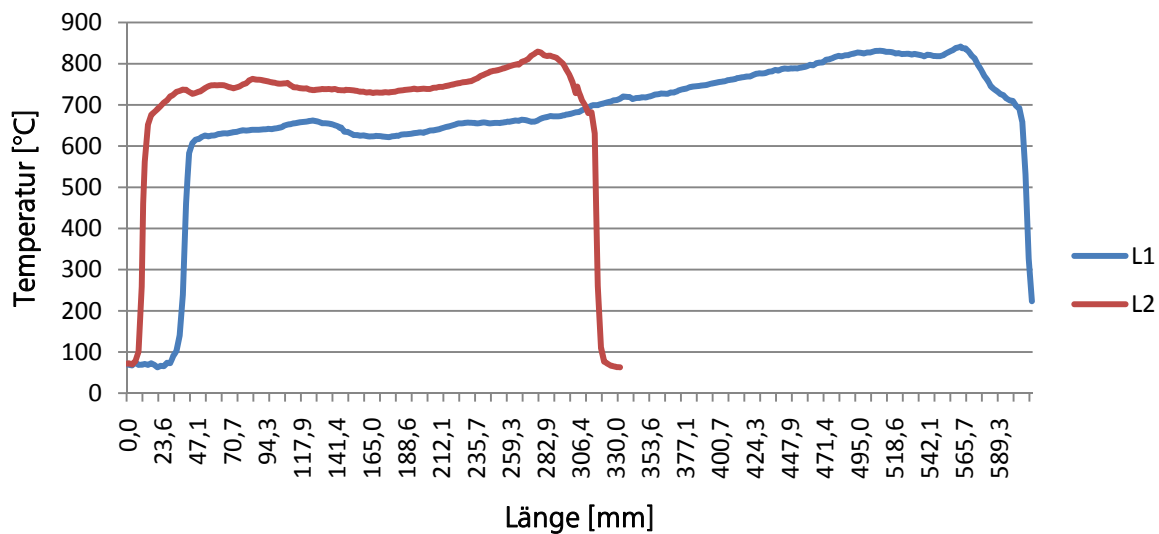
*Erklärung zu Bauteil 45*

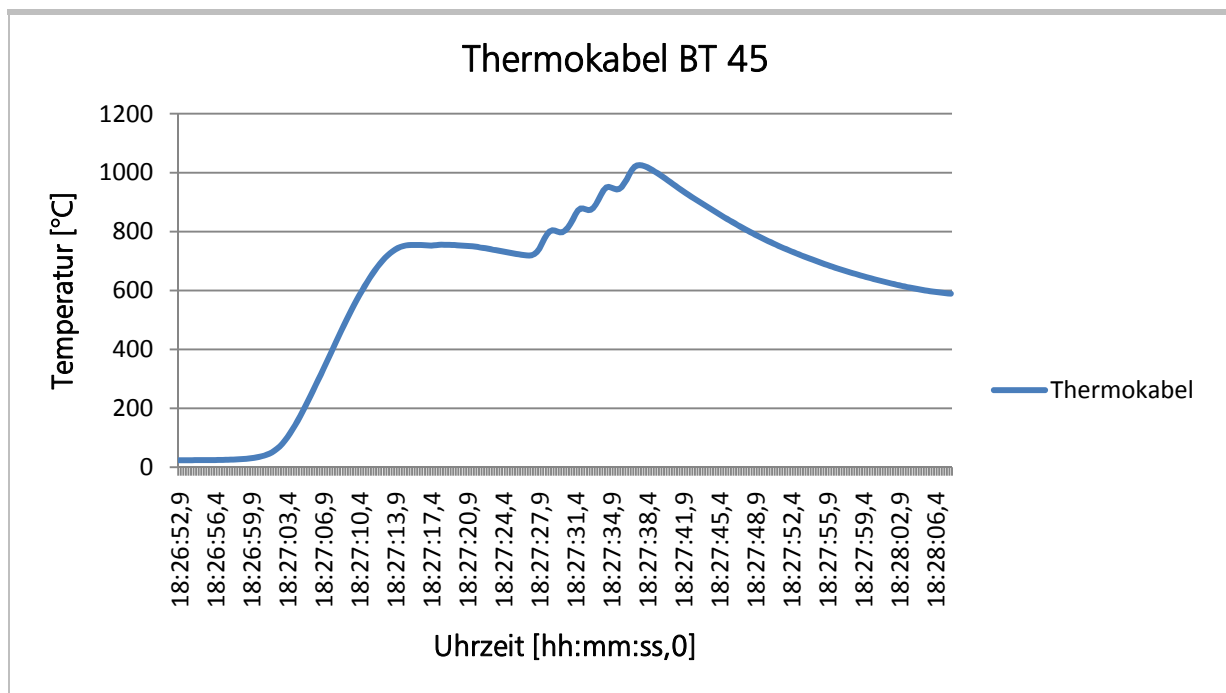
Bauteil 45-2 – Platine im Flächeninduktor nach unten gebogen

Datum: 18.11.2010	Zieltemperatur: 500/950
Induktor: Längsfeldinduktor	Spannung: 60%
Induktor: Flächeninduktor	Spannung: 90%
Vorschub: 25mm/s	Max. Temperatur Thermokabel: 1025°C
Thermobildnummer.: 40034	Aufnahmezeit Thermobild: 18:27:52,750
Emissionskoeffizient: 0,87	Temperatur am Messpunkt zur Aufnahmezeit: 729°C



Profildigramm BT 45





#### Versuchsreihe 4

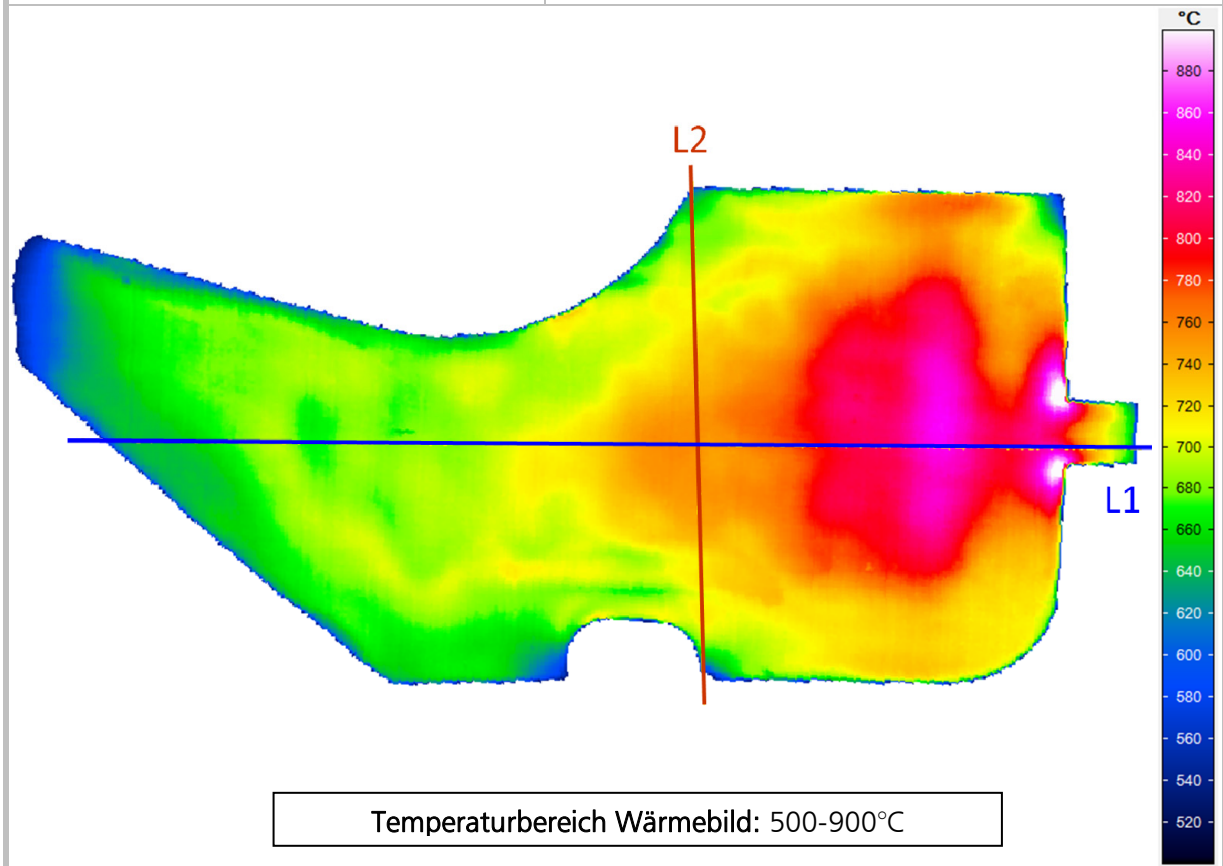
Mit der Verwendung der Fliese und dem Tiefersetzen des Längsfeldinduktors um 5mm wird mehr Energie in die Formplatte übertragen. Die Vorschubgeschwindigkeit wird wieder auf 33mm/s erhöht und es wird nochmals versucht die Formplatte im Flächeninduktor von 500°C auf 950°C zu erwärmen. Das ist auch möglich, wie das Bauteil 55 zeigt. Jedoch ist auf dem Wärmebild wieder zu erkennen, dass aufgrund der Aufbiegung der Bereich mit einem geringeren Abstand zum Flächeninduktor eine viel höhere Temperatur aufweist. .

*Abstandsverringering hat  
höhere Temperatur zur Folge*

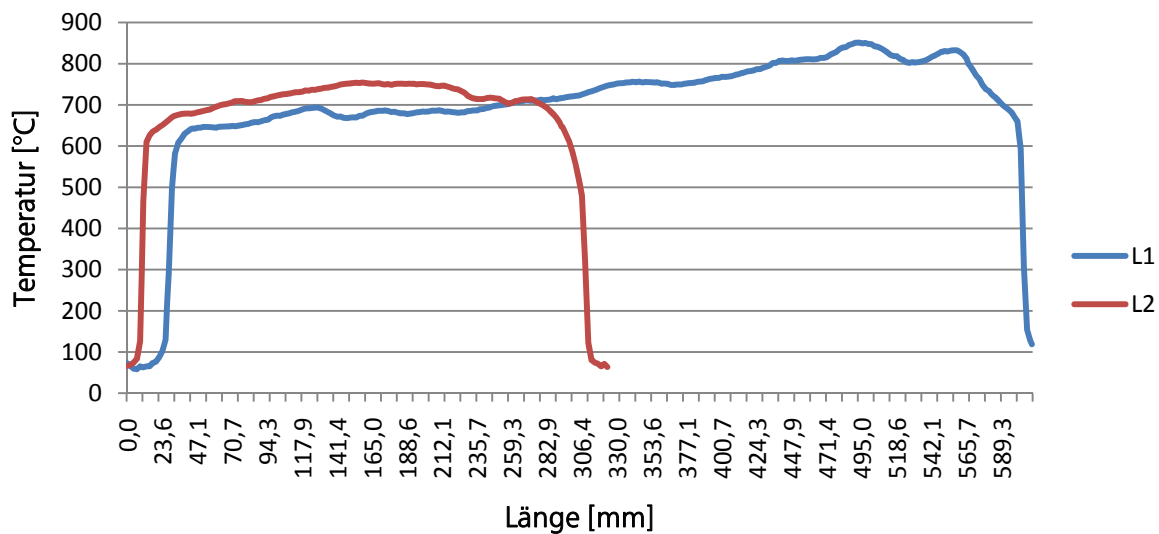


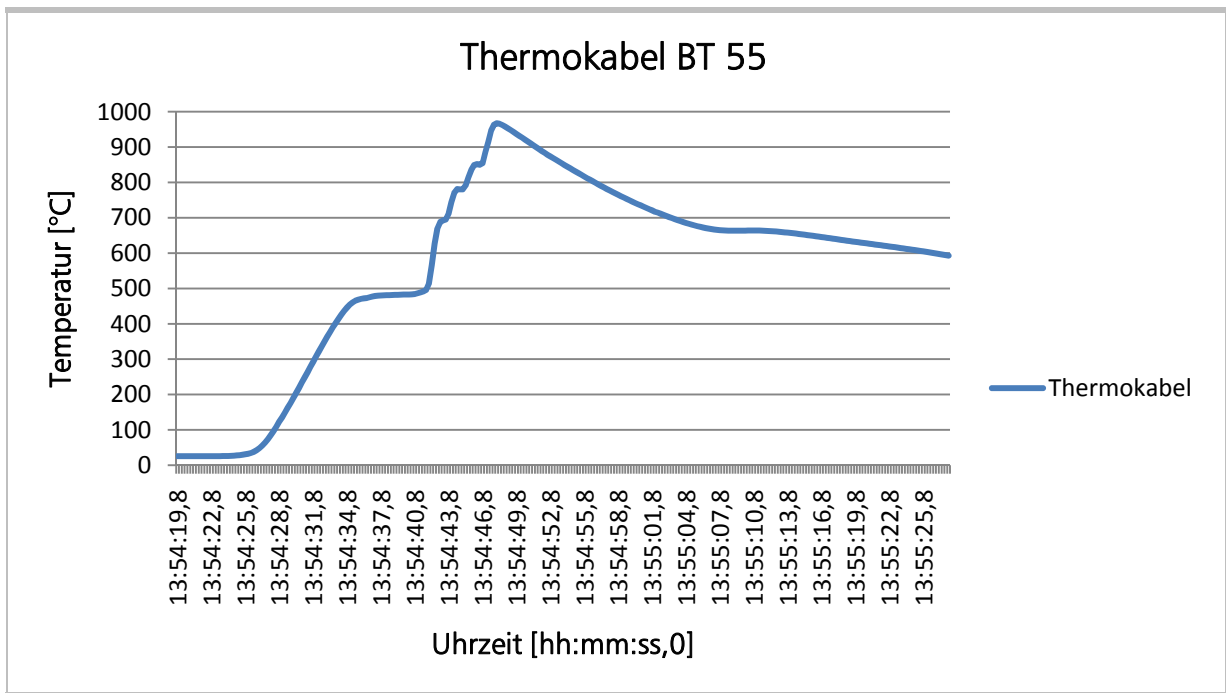
Bauteil 55 – Platine im Flächeninduktor nach oben aufgebogen

Datum: 18.11.2010	Zieltemperatur: 500/950
Induktor: Längsfeldinduktor	Spannung: 60%
Induktor: Flächeninduktor	Spannung: 90%
Vorschub: 33mm/s	Max. Temperatur Thermokabel: 967°C
Thermobildnummer.: 40032	Aufnahmezeit Thermobild: 13:54:59,468
Emissionskoeffizient: 0,88	Temperatur am Messpunkt zur Aufnahmezeit: 753°C



Profildiagramm BT 55



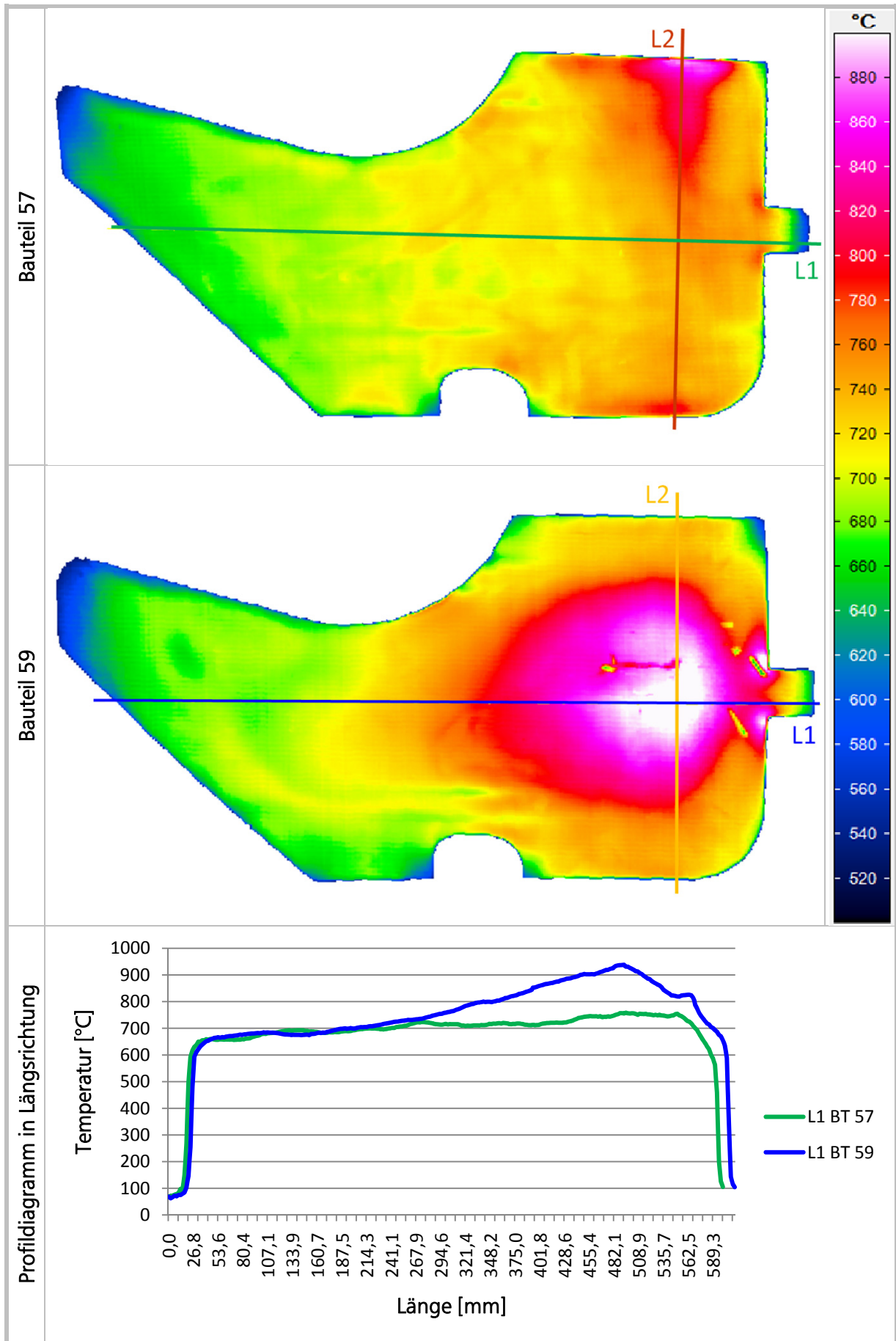


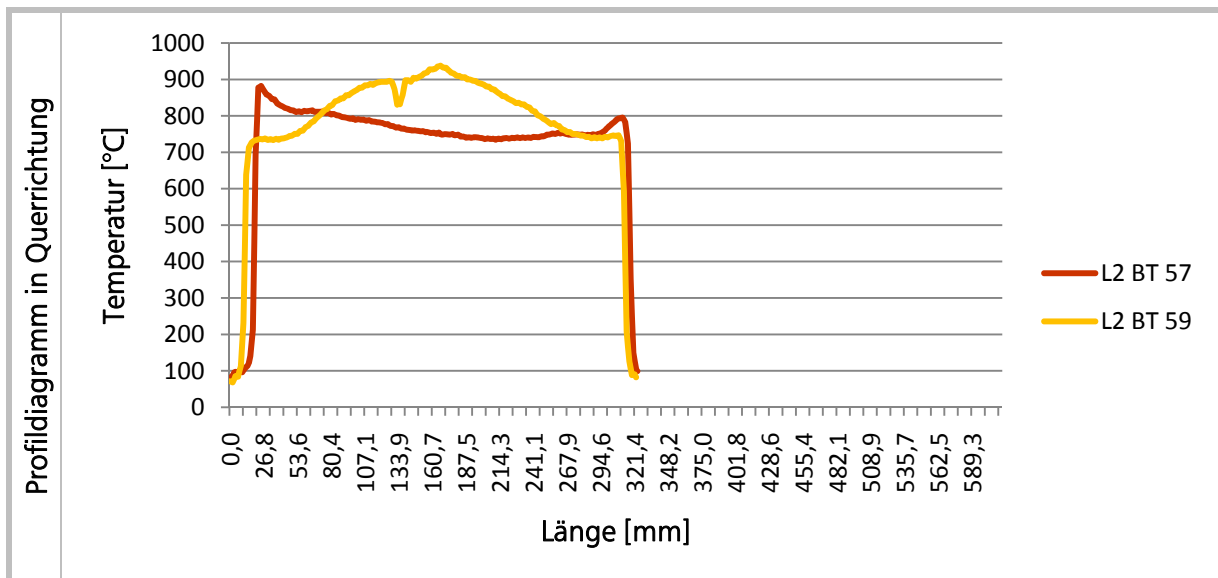
### Versuchsreihe 5

Die Formplatte wird mit einer Temperatur von 600°C aus dem Längsfeldinduktor kommend unter dem Flächeninduktor auf 950°C erwärmt. Im Folgenden sind zwei Bauteile angeführt, die mit den fast gleichen Einstellungen erwärmt wurden. Diese weisen eine große Differenz in der Endtemperatur, nur aufgrund der unterschiedlichen Verformungsrichtung, auf.

*Einfluss der Aufbiegung auf die erreichte Temperatur*

Bauteil 57 und 59 - Zieltemperatur 600°C/950°C





### Auswertung Zieltemperatur 600°C/950°C

Die unterschiedliche Temperatur aufgrund der Durchbiegung der Formplatte wird auf dem Profildiagramm des Bauteils 57 sichtbar. Hierbei gibt das Temperaturprofil der Linie L2 den Temperaturverlauf quer zur Transportrichtung wieder. Im Randbereich, indem die Formplatte direkten Kontakt mit der Isolierplatte des Flächeninduktors hatte, wird eine maximale Temperatur von 877°C erreicht. Im Gegensatz dazu wird in der Mitte der Formplatte auf der Linie L2 nur eine Temperatur von 738°C gemessen.

*Ergebnis Bauteil 57*

Die unterschiedliche Temperaturverteilung in der Formplatte ist bereits deutlich auf dem Wärmebild des Bauteils 59 erkennbar. Auf den Temperaturwerten des Profildiagramms zeigt sich ebenfalls der große Temperaturunterschied in Längs- und Querrichtung der Platte. Hat der Randbereich der Formplatte eine Temperatur von 733°C, so werden in der Mitte der Formplatten Temperaturen von bis zu 938°C gemessen. Hierbei handelt es sich um eine Temperaturdifferenz in Querrichtung von mehr als 200°C. Somit kann gesagt werden, dass die erreichbare Temperatur nur von der Richtung der Aufbiegung und somit vom Abstand zum Flächeninduktor abhängt.

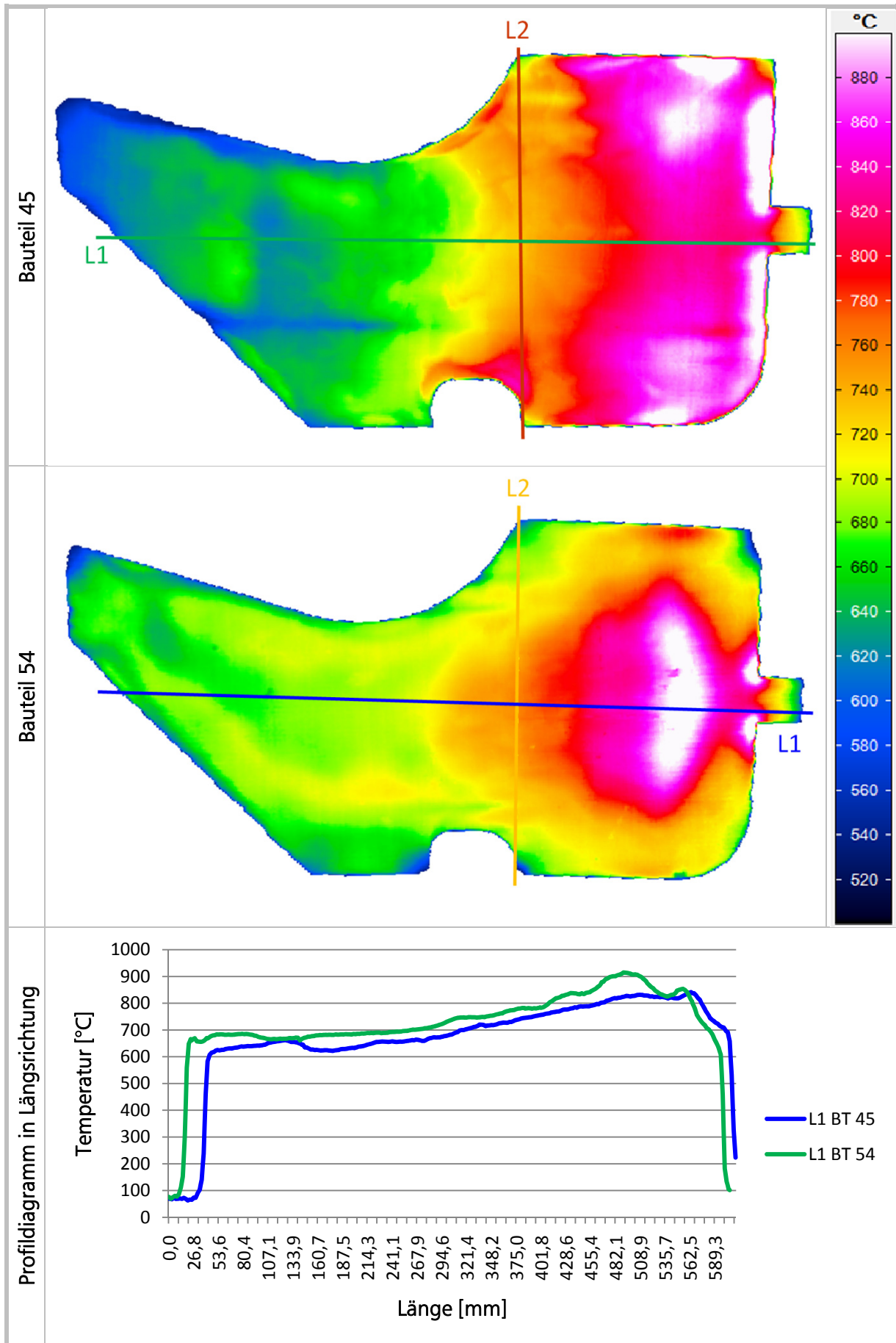
*Ergebnis Bauteil 59*

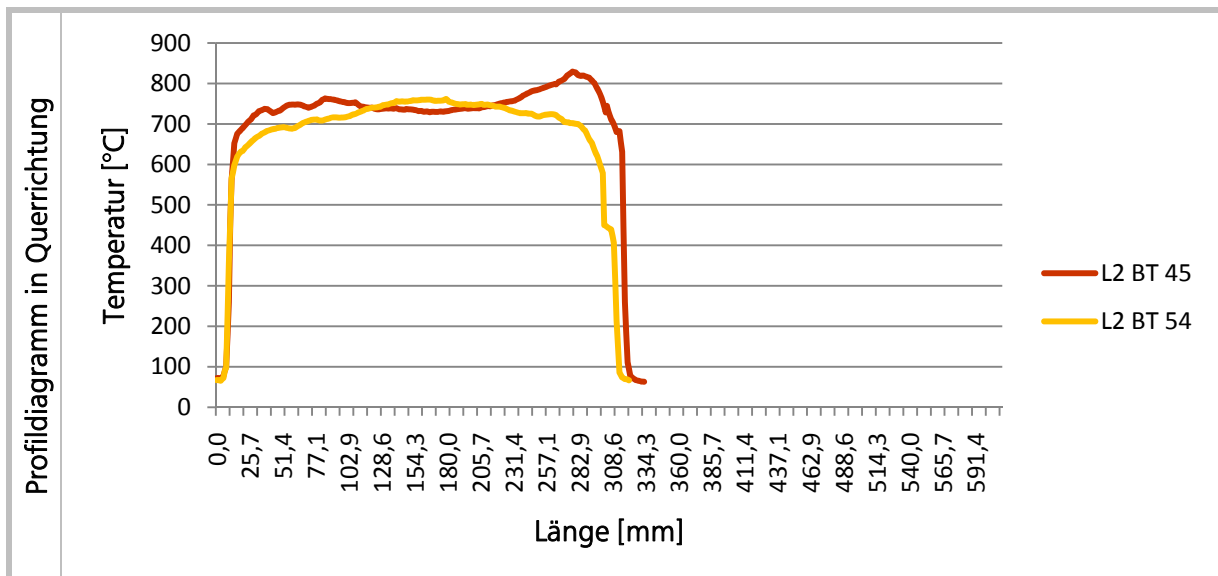
### Versuchsreihe 6

In Versuchsreihe 6 wird die Formplatte im Längsfeldinduktor auf Curie-Temperatur erwärmt. Im Flächeninduktor folgt eine Erwärmung auf 950°C. Das Bauteil 45 wird mit dem Bauteil 54 verglichen. Die Zieltemperaturen sind für beide Bauteile gleich, das Bauteil 45 wurde mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 25mm/s und das Bauteil 54 mit 33mm/s erwärmt. Die Auswertung der einzelnen Bauteile ist im Anhang zu finden.

*Erwärmung von Curie auf 950°C*

Bauteil 45 und 54 - Zieltemperatur Curie/950°C





### Auswertung Zieltemperatur Curie/950°C

Auf der Auswertung der Messergebnisse sind wieder die Zonen mit einer erhöhten Temperatur aufgrund der Aufbiegung und der damit verbundenen Abstandsverringering zum Flächeninduktor zu sehen. Auf dem Wärmebild des Bauteils 45 ist die Durchbiegung nach unten sichtbar, der Randbereich weist eine höhere Temperatur wie der Bereich in der Mitte auf. Auf Bauteil 54 ist eine deutliche Aufbiegung nach oben erkennbar. Der unterschiedliche Temperaturverlauf aufgrund der Aufbiegung ist auf dem Profildigramm in Querrichtung gut zu erkennen.

### Versuchsreihe 7

Der Abstand zwischen dem Flächeninduktor und den Hubbalken wird nochmals um 5mm verringert. Damit wird der Formplatte weniger Platz zur Verformung zu geben. Die Formplatte verkeilt sich jedoch unter dem Flächeninduktor und es ist kein kontinuierlicher Transport der Platine möglich.

*Abstand wird nochmals verringert*

### 8.4.3 Neuer Ansatz

Zum Abschluss der Versuche wird die Anlage nochmals umgebaut. Es gilt die Frage zu klären, ob eine reproduzierbare Erwärmung überhaupt erreicht werden kann. Die Überlegungen stützen sich dabei auf Abbildung 43. In diesem Diagramm wird die unterschiedliche Temperatureinbringung aufgrund einer Veränderung des Abstandes gezeigt.

*Abklärung der Reproduzierbarkeit*

Bei einem Abstand von 20 mm und einer Reduktion des Abstandes aufgrund der Verformung der Platine um 5mm beträgt die Temperaturdifferenz  $\Delta T_2$  bereits 47°C. Wird der Abstand jedoch mit 10mm gewählt und es tritt einer Verringerung des Abstandes um 5mm auf, so hat  $\Delta T_1$  einen Wert von 183°C. Daraus ist abzuleiten, dass der Abstand für eine Erwärmung mittels Flächeninduktor möglichst groß zu wählen ist. Nur somit wird eine Platine, auch bei einer kleinen Änderung des Abstandes, homogen erwärmt.

*Abstandseinfluss verändert sich*

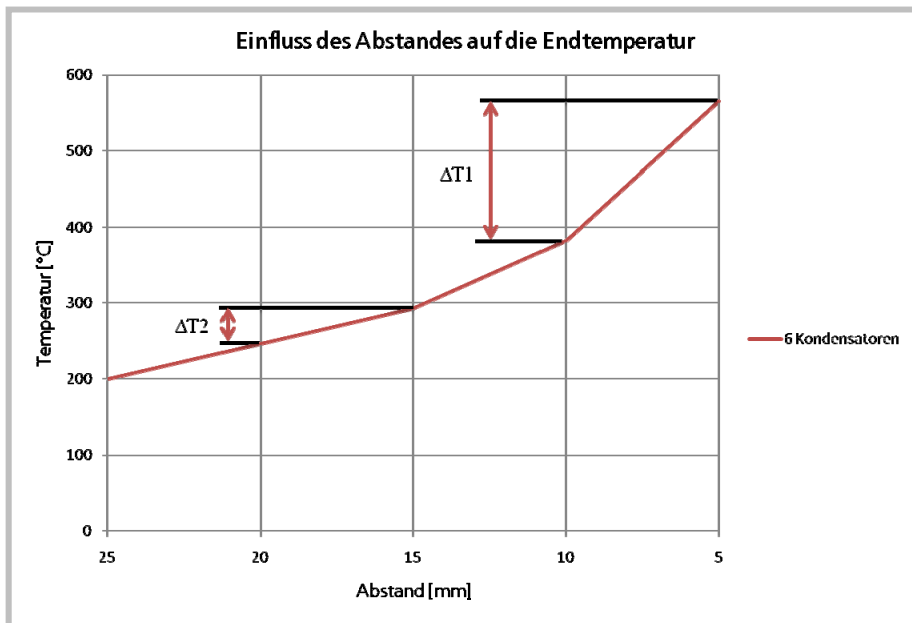


Abbildung 43 Unterschiedliche Temperatureinbringung aufgrund des Abstandes

Die Fliese wird wieder gegen eine 15mm starke Isolierplatte ausgetauscht. Der freie Abstand zwischen dem Induktor und den Keramikrohren wird auf die ursprünglichen 18mm vergrößert und die Vorschubgeschwindigkeit wird mit 25mm/s gewählt. Die Formplatinen werden im Längsfeldinduktor auf Curie-Temperatur erwärmt und die Spannung für den Flächeninduktor wird mit 100 Prozent gewählt. Die Zieltemperatur wird nicht erreicht, die Bauteilen 65, 66 und 67 weisen eine Endtemperatur von 802, 810 und 800°C auf. Bei diesen Versuchen kommt es zu keiner großen Temperatureinbringung unter dem Flächeninduktor und somit auch zu keinen großen Abstandsveränderungen zwischen Induktor und Platine. Aus diesen Erkenntnissen lässt sich abschließend feststellen, dass eine kombinierte Erwärmung mit einem Flächeninduktor reproduzierbar möglich ist. Jedoch ist ein Weg zu finden, um ein Aufbiegen der Platine aufgrund der unterschiedlichen Wärmeeinbringung und der daraus folgenden Abstandsveränderung zum Flächeninduktor, zu verhindern.

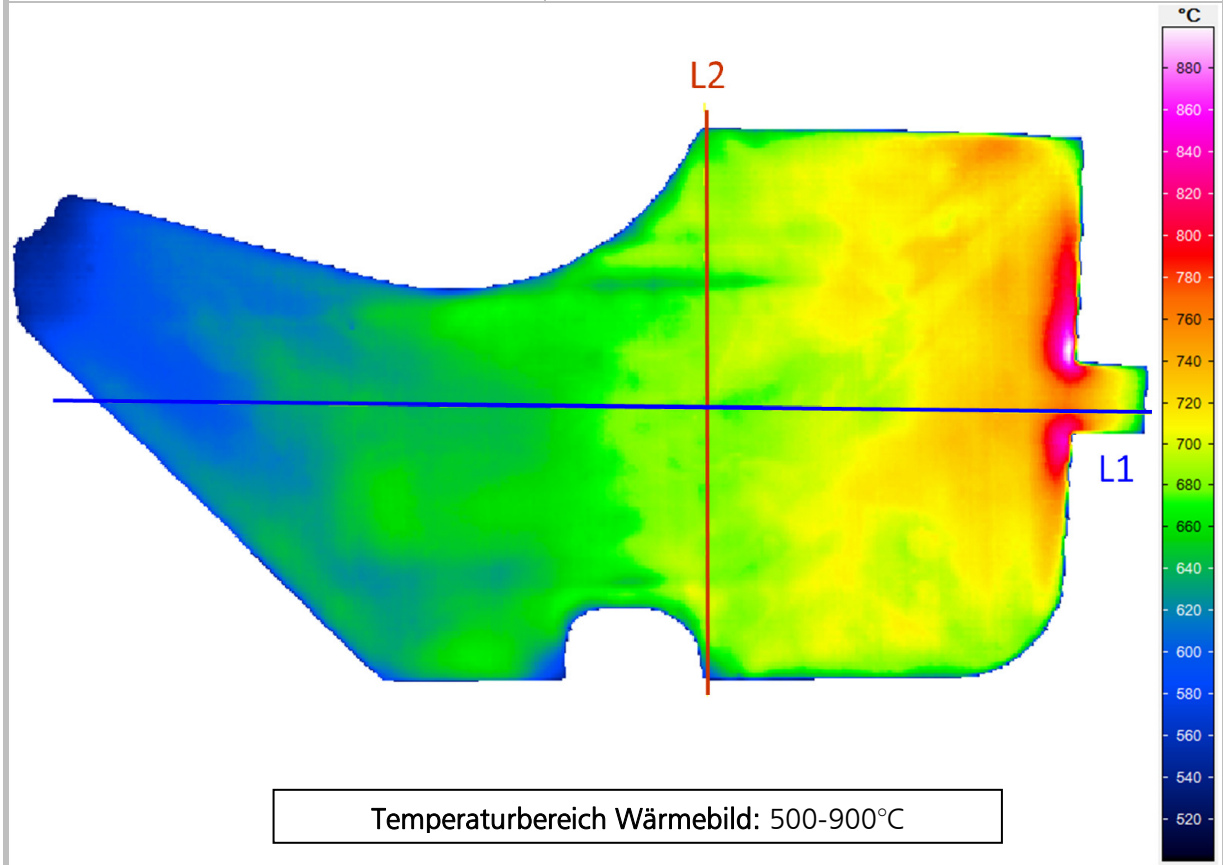
Als Beispiel dafür ist nachfolgend das Bauteil 66 angeführt.

*Umbau der Anlage*

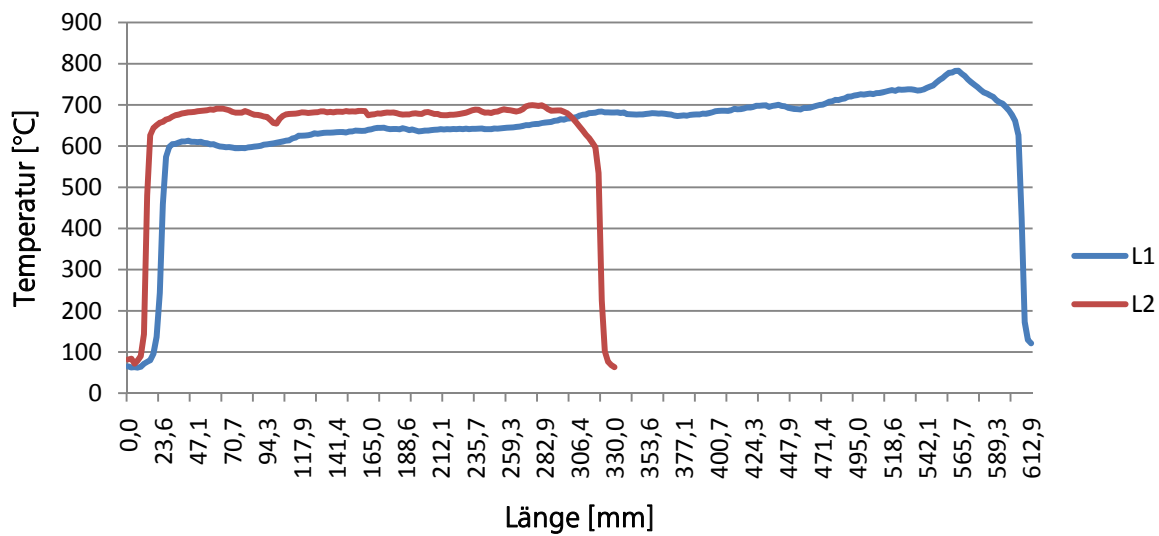


Bauteil 66

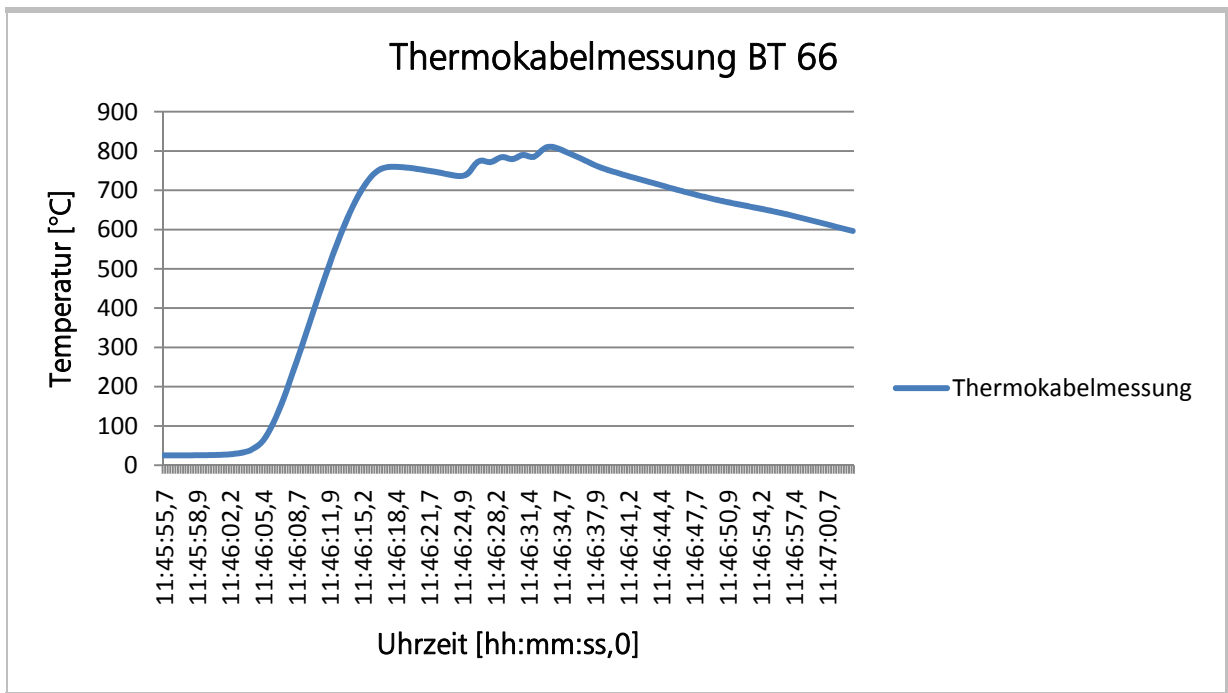
Datum: 19.11.2010	Zieltemperatur: Curie/950
Induktor: Längsfeldinduktor	Spannung: 73%
Induktor: Flächeninduktor	Spannung: 100%
Vorschub: 25mm/s	Max. Temperatur Thermokabel: 810°C
Thermobildnummer.: 40052	Aufnahmezeit Thermobild: 11:46:49,531
Emissionskoeffizient: 0,89	Temperatur am Messpunkt zur Aufnahmezeit: 676°C



Profildigramm BT 66







## 8.5 Kombination Längsfeldinduktion und Quersfeldinduktion

In diesen Versuchen wird die Formplatine, ausgehend von den Erkenntnissen der Charakterisierung des Quersfeldes, im Längsfeldinduktor auf Curie-Temperatur erwärmt. Damit wird ein kleinerer Temperaturhub mit dem Quersfeldinduktor durchgeführt und die Formplatine sollte, ohne sich zu verkeilen, durch den Quersfeldinduktor transportieren werden können.

*Kleiner Temperaturhub wird angestrebt*

### 8.5.1 Versuchsablauf

Am Beginn der Versuche wird noch ohne Temperaturmessung überprüft, ob eine kleine Platine überhaupt aus dem Längsfeld kommend in die Öffnung des Quersfeldinduktors einläuft. Dies funktioniert, wie auf Abbildung 44 ersichtlich ist, gut.

*Selbstständiger Einlauf wird überprüft*

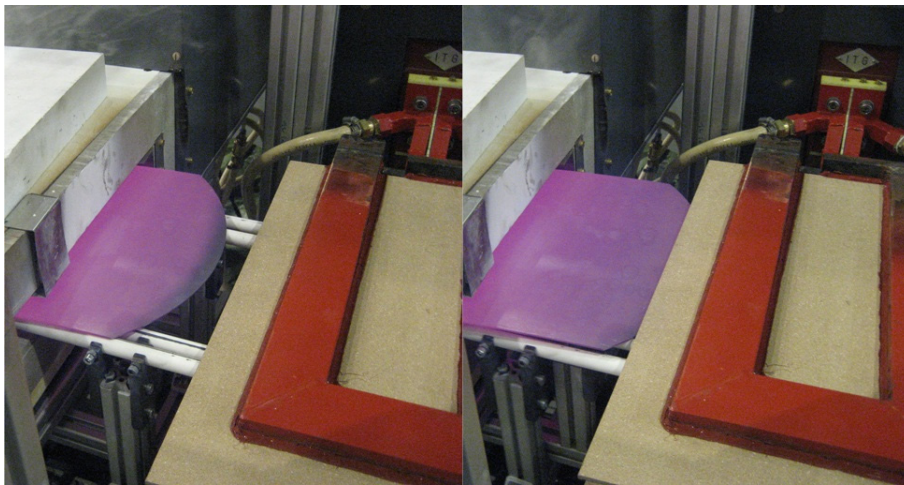


Abbildung 44 Einlauf der Platine in den Quersfeldinduktor

Auch bei dieser kleinen Platine zeigt sich bereits eine Überhitzung im Randbereich. Die Überhitzung ist so groß, dass der Werkstoff wie auf Abbildung 45 ersichtlich ist, bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 25mm und einer Spannung von 50 Prozent, im Randbereich schmilzt.

*Überhitzung im Randbereich*

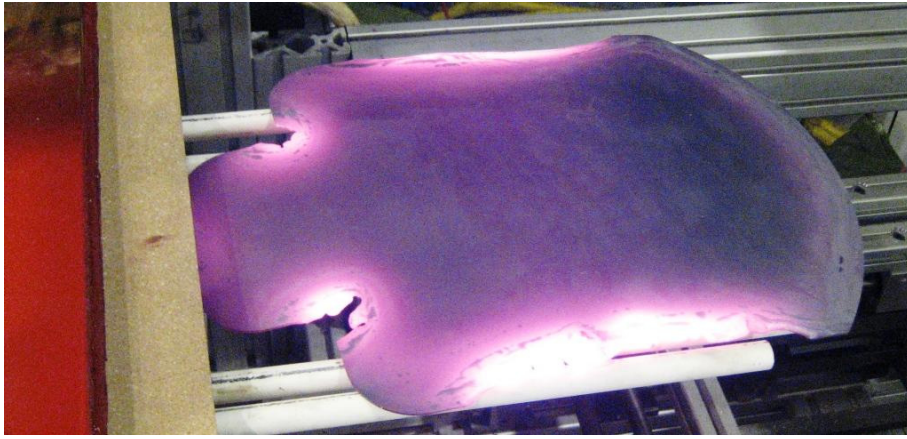


Abbildung 45 Platine mit Randüberhitzung

Des Weiteren wird die große Formplatte zuerst im Längsfeldinduktor auf Curie-Temperatur und danach im Querfeldinduktor auf 950°C erwärmt. Das Ergebnis dieses Erwärmungsversuches ist in Abbildung 46 zu sehen. Eine weitere Formplatte wird mit den gleichen Einstellungen erwärmt. Erstaunlich daran ist, dass diese Bauteile 70 und 71 nach der Erwärmung nur einen Temperaturunterschied von 25°C aufweisen und komplett an den gleichen Stellen aufgeschmolzen sind.

*Erwärmung einer Formplatte*

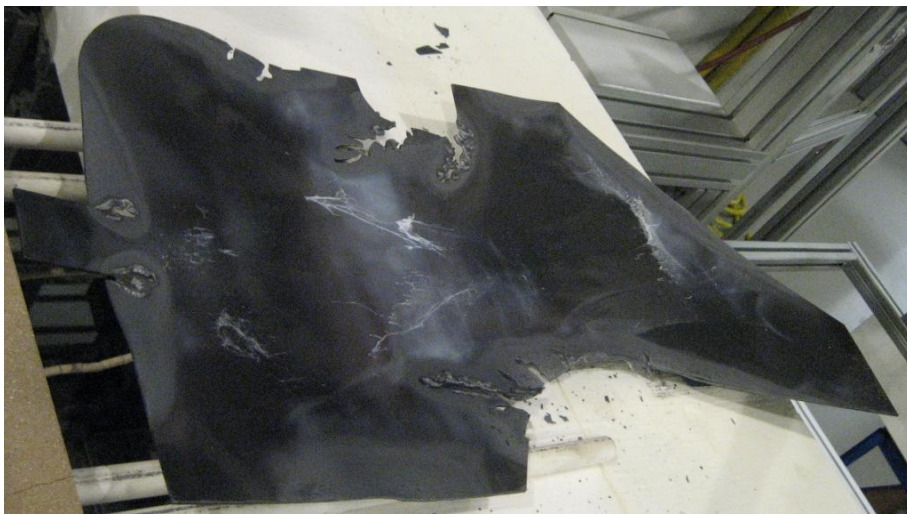
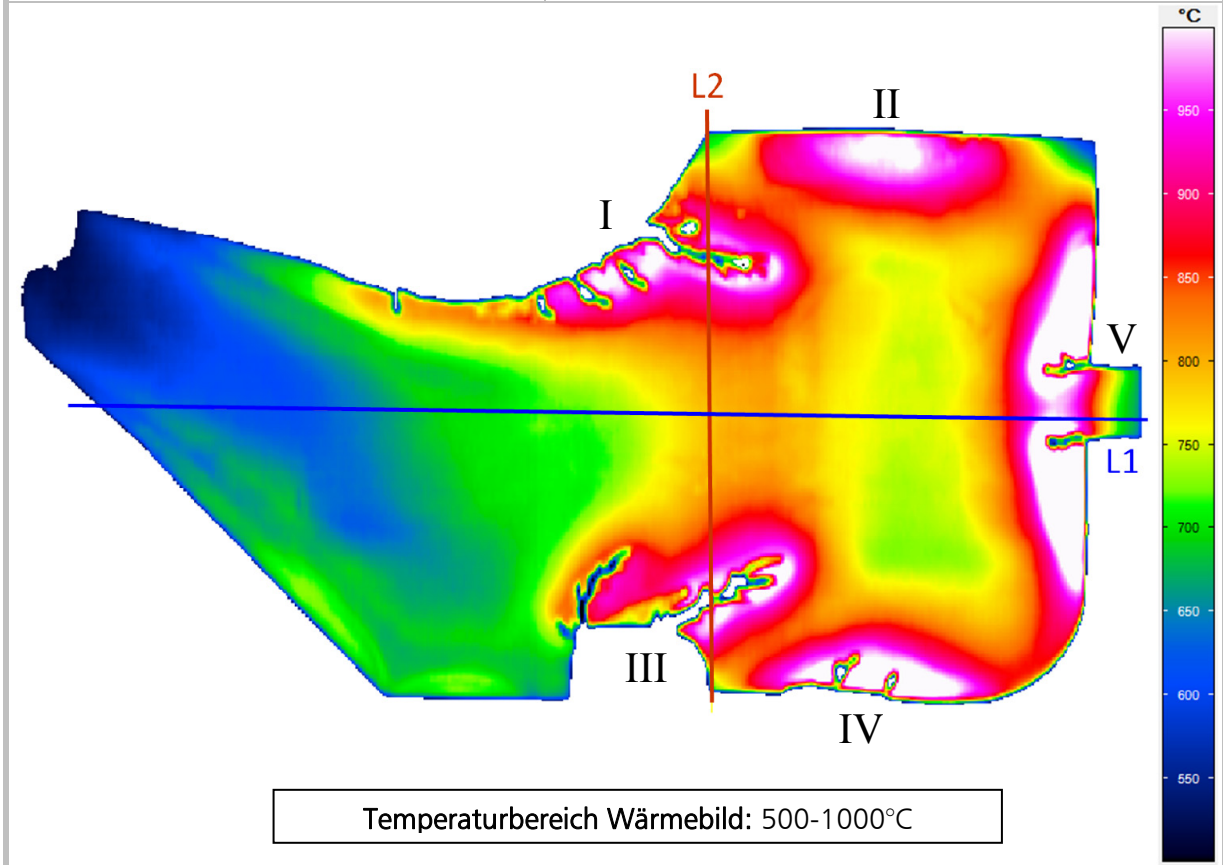


Abbildung 46 Formplatte nach kombinierter Erwärmung

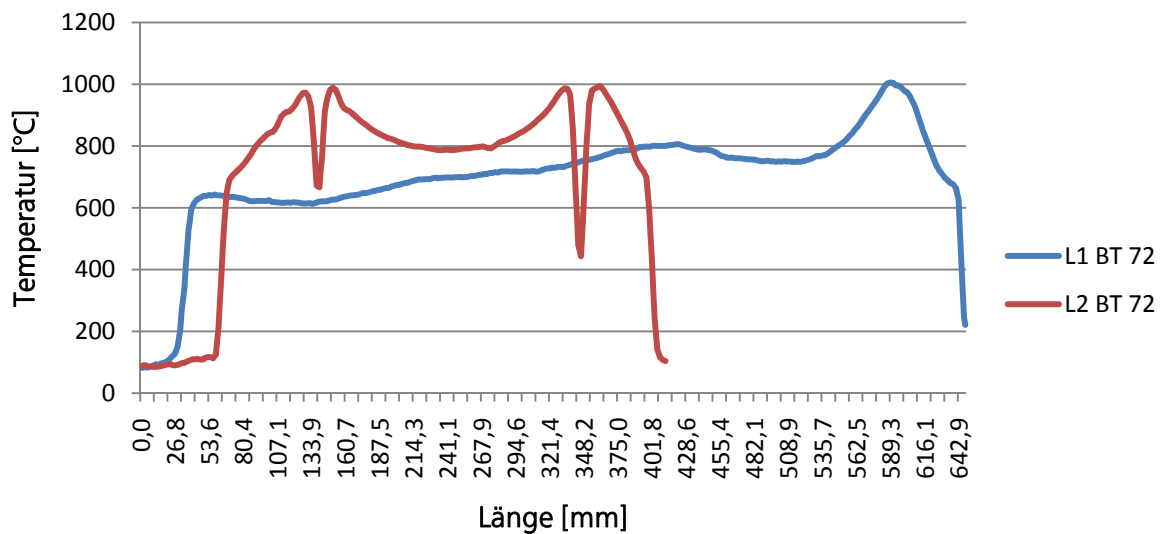
Die Auswertung der Erwärmung des Bauteils 72 ist auf den folgenden Seiten zu finden.

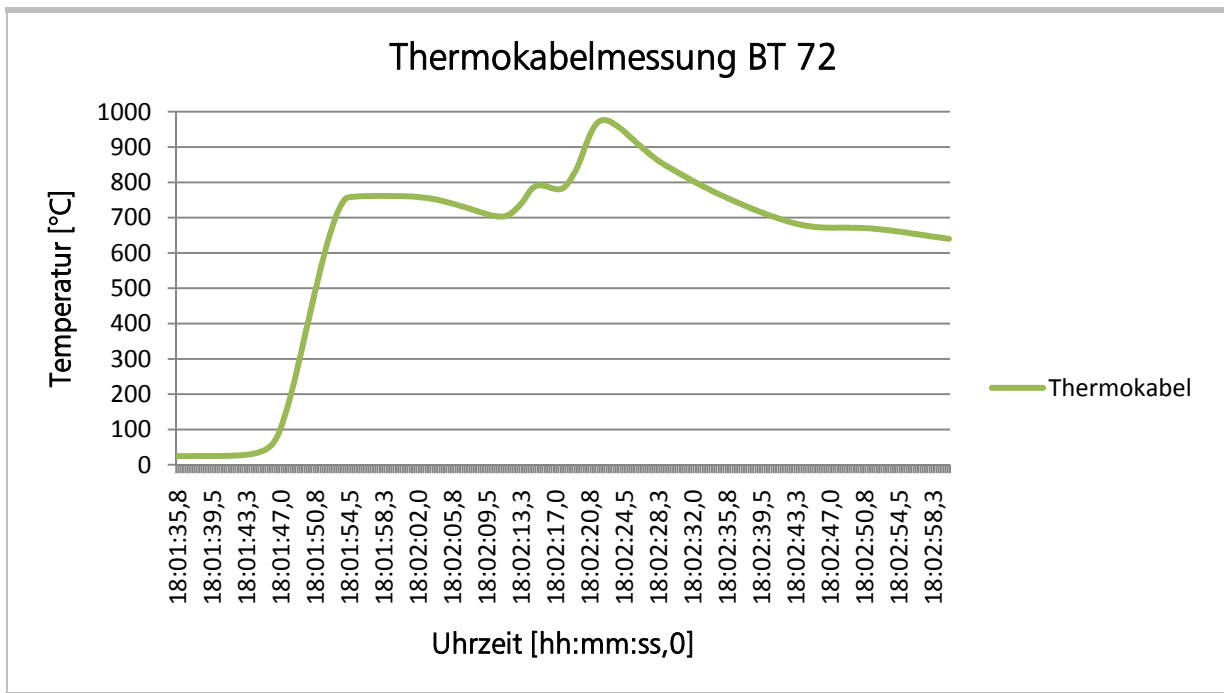
Bauteil 72

Datum: 19.11.2010	Zieltemperatur: Curie/950
Induktor: Längsfeldinduktor	Spannung: 100%
Induktor: Quersfeldinduktor	Spannung: 50%
Vorschub: 25mm/s	Max. Temperatur Thermokabel: 976°C
Thermobildnummer.: 40050	Aufnahmezeit Thermobild: 18:02:33,796
Emissionskoeffizient: 0,89	Temperatur am Messpunkt zur Aufnahmezeit: 781°C



Profildigramm BT 72





### Auswertung BT 72

In den Bereichen I und III ist aufgrund der Verkleinerung der Platinenbreite in Förderrichtung eine Konzentration der Wirbelströme feststellbar. Diese Konzentration führt zu einem Aufschmelzen des Werkstoffes in diesen Bereichen. Erstaunlich ist, dass es im Anfangsbereich der Platine noch nicht zu einer so großen Überhitzung und einem Aufschmelzen der Platine kommt. Die nicht Ausfüllung der Fläche im Quersfeldinduktor mit der Formplatine im Anfangsbereich ist verantwortlich, dass sich am Beginn der Platine weniger Wirbelström ausbildet. Die Bereiche II und IV liegen genau in der Zone des Quersfeldinduktors, wo nach Abbildung 24 die Wirbelströme aufgrund der Bauform des Induktors umgelenkt werden. Somit fließen in diesem Bereich die Wirbelströme länger und die Temperatur erhöht sich folglich. Über den Bereich V kann keine Aussage getroffen werden, da sich die Platine am Auslauf aus dem Induktor aufgrund von Verformungen durch die Abkühlung an der Umgebungsluft verkeilt hat

*Konzentration der Wirbelströme führt zum Aufschmelzen des Werkstoffes*

## 9 Ergebnisdiskussion – Gegenüberstellung

### 9.1 Messtechnik

#### 9.1.1 Thermokabel

Die Thermokabelmessung funktioniert trotz anfänglicher Schwierigkeiten und einer daraus folgenden Erdung der Platine gut. Der Schweißpunkt des Thermokabels ist sorgsam auszuführen, um ein Ablösen der einzelnen Thermoleiter zu verhindern. Bei der Führung des Thermokabels ist darauf zu achten, dass sich kein Isolierrohrchen des Thermokabels verhakt. Die Folge ist ein Ablösen des Thermokabels oder ein Festhalten der Platine an derselben Position.

#### 9.1.2 Wärmebildkamera

Die Wärmebildkamera ist für die Dokumentation des Temperaturverlaufs auf einer Platine sehr gut verwendbar. Hierfür ist es aber unbedingt erforderlich die Oberfläche der Platine zu schwärzen. Damit ist es möglich einen Emissionskoeffizienten zu erhalten der dem Wert 1 angenähert ist. Jedoch ist es trotzdem unumgänglich den Emissionskoeffizienten mittels Bearbeitungssoftware an die Temperaturwerte der Thermokabelmessung anzupassen. Der Kalibrierbereich der Wärmebildkamera ist auf die zu erwartende Erwärmungstemperatur der Platine einzustellen. Für eine ordnungsgemäße Temperaturmessung ist die Platine vor dem Schwärzen bereits gründlich zu reinigen. Nach dem Schwärzen ist der Lack einzubrennen. Nur damit kann eine das Wärmebild störende Rauchentwicklung während der Erwärmung verhindert werden.

#### 9.1.3 Pyrometer

Die Temperaturmessung mittels Pyrometer ist für diese Anwendungen nicht zu empfehlen. Das Problem liegt in der großen Differenz der erreichten Endtemperaturen in den einzelnen Versuchen. Hierbei müsste für jede Endtemperatur der Emissionskoeffizient neu bestimmt werden, was einen großen Aufwand mit sich bringt. Es ist nicht möglich die Messwerte über eine Anpassung des Emissionskoeffizienten in einer Software nachträglich zu ändern.

## 9.2 Induktion

### 9.2.1 Längsfeldinduktor

Die besten Ergebnisse im Längsfeldinduktor werden bei einer Erwärmung der Formplatte auf Curie-Temperatur erreicht. Die Erwärmung auf Curie-Temperatur ist ein selbstregulierender Prozess. Die magnetischen Feldlinien werden ab dem Verlust des Ferromagnetismus nicht mehr in den Werkstoff gezogen. Somit kommt es zu keiner Vergrößerung der Wirbelströme und damit verbunden auch zu keinem weiteren Anstieg der Temperatur. Wird die Curie-Temperatur erreicht, so weist die Formplatte auch in den Ecken, Rändern und Kanten am Ende eine homogene Temperatur auf.

### 9.2.2 Flächeninduktor

Eine reproduzierbare Erwärmung ist mit dem Flächeninduktor nur bei einem gleichbleibenden Abstand zwischen Induktor und Platte erreichbar. Aufgrund der starken Temperatureinbringung, bei einer Erwärmung von Raumtemperatur aus, verformt sich die Platte und verändert den Abstand zum Induktor. Diese Abstandsveränderung hat eine höhere Temperatureinbringung, in den zum Induktor näherliegenden Bereichen, zur Folge.

Des Weiteren ist zu bedenken, dass die Platte, solange sie nicht auf Curie-Temperatur erwärmt wurde, vom Flächeninduktor aufgrund der Feldwirkung angezogen wird. Das Anhaften der Platte ist durch die Auswahl eines geeigneten Transportsystems zu verhindern.

### 9.2.3 Quersfeldinduktor

Mit dem Quersfeldinduktor ist aufgrund der beengten Platzverhältnisse und der Verformung der Platte aufgrund der Temperatureinbringung keine Erwärmung von Raumtemperatur aus möglich.

### 9.2.4 Kombination Längsfeld- und Flächeninduktor

Die Kombination aus einem Längsfeld- und Flächeninduktor ist die zu verwendende Kombination um eine Formplatte für den Warmformprozess auf die geforderten 950°C zu erwärmen. Im Längsfeldinduktor ist eine Erwärmung auf Curie-Temperatur vorzunehmen. Die weitere Erwärmung erfolgt mit dem Flächeninduktor. Jedoch ist eine Abstandsveränderung der Platte zum Flächeninduktor aufgrund der lokalen Wärmeeinbringung zu verhindern. Nur mit einem gleichbleibenden Abstand ist eine reproduzierbare Erwärmung möglich.

### 9.2.5 Kombination Längsfeld- und Quersfeldinduktor

Mit einer vorhergehenden Erwärmung im Längsfeldinduktor auf Curie-Temperatur ist ein Transport der Platine in den Quersfeldinduktor möglich. Mit dem Quersfeldinduktor ist es nicht möglich eine Formplatine mit einer homogenen Temperaturverteilung zu erwärmen. Auf allen erwärmten Platinen ist eine Überhitzung im Randbereich feststellbar.

### 9.3 Vorschubgeschwindigkeit

Die Vorschubgeschwindigkeit ist stets schnellstmöglich zu wählen. Damit können die Wärmeverluste der Platine an Umgebungsluft vermindert werden.



## 10 Zusammenfassung und Ausblick

In einem ersten Schritt wird das unterschiedliche Erwärmungsverhalten der verschiedenen Induktoren untersucht. Dazu werden die Formplatinen von Raumtemperatur aus auf die geforderten Temperaturen erwärmt. Mit den gewonnenen Erkenntnissen werden in einem weiteren Schritt Formplatinen mit einer Kombination aus mehreren Induktoren erwärmt.

Das Ziel aller Versuche liegt in der Erreichung einer homogenen Temperaturverteilung auf der Formplatine am Ende des Erwärmungsprozesses. Die Temperaturverteilung auf der Platine wurde mittels Thermokabel, Pyrometer und Wärmebildkamera gemessen. Die unterschiedlich hohen Temperaturen und auch die Wirkung des magnetischen Wechselfeldes stellten spezielle Anforderungen an die Temperaturmesssysteme. Um den Transport der Formplatine bei den unterschiedlichen Versuchsreihen sicherzustellen war es notwendig zwei unterschiedliche Transportsysteme zu verwenden.

Die Erwärmung einer Formplatine für den Warmformprozess auf 950°C ist mit einer Kombination aus Längsfeldinduktor und Flächeninduktor durchzuführen. Im Längsfeldinduktor ist die Platine auf Curie-Temperatur zu erwärmen.

Eine reproduzierbare Erwärmung mit dem Flächeninduktor ist mit der zurzeit verwendeten Anlage nur bedingt möglich. Die Verformung der Platine, aufgrund der lokalen Temperatureinbringung und der daraus folgenden Verformung und Abstandsveränderung, bereitet die größten Probleme.

Der Aufbau des Induktors ist mit den Erkenntnissen aus den Versuchen zur Charakterisierung des Flächeninduktors zu verändern.

Der erste und schnellstmöglich zu realisierende Ansatz ist, den Abstand zwischen dem Flächeninduktor und der Platine möglichst groß zu wählen. Somit ist der Temperaturunterschied auf der Platine bei einer Veränderung des Abstandes zwischen Flächeninduktor und Platine gering. Jedoch ist für eine Erwärmung auf 950°C dem ersten Flächeninduktor ein weiterer Flächeninduktor anzufügen, diese Anordnung wird in Abbildung 47 gezeigt.

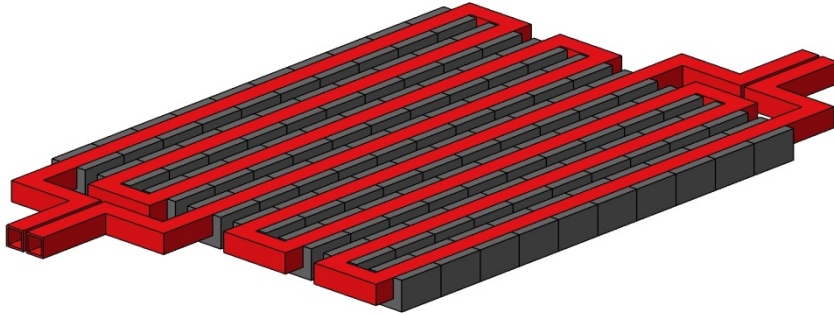


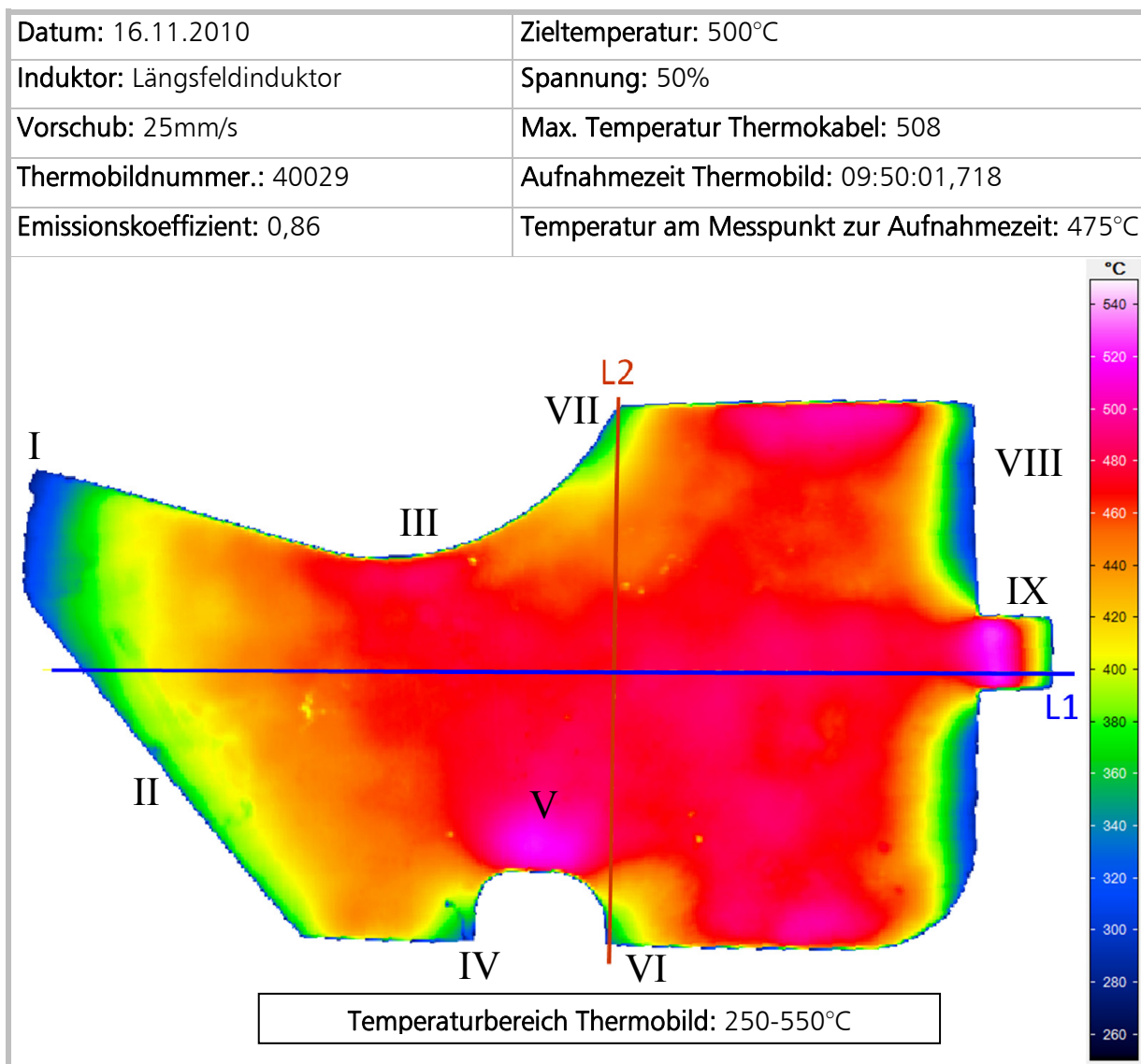
Abbildung 47 Zwei Flächeninduktoren hintereinander angeordnet

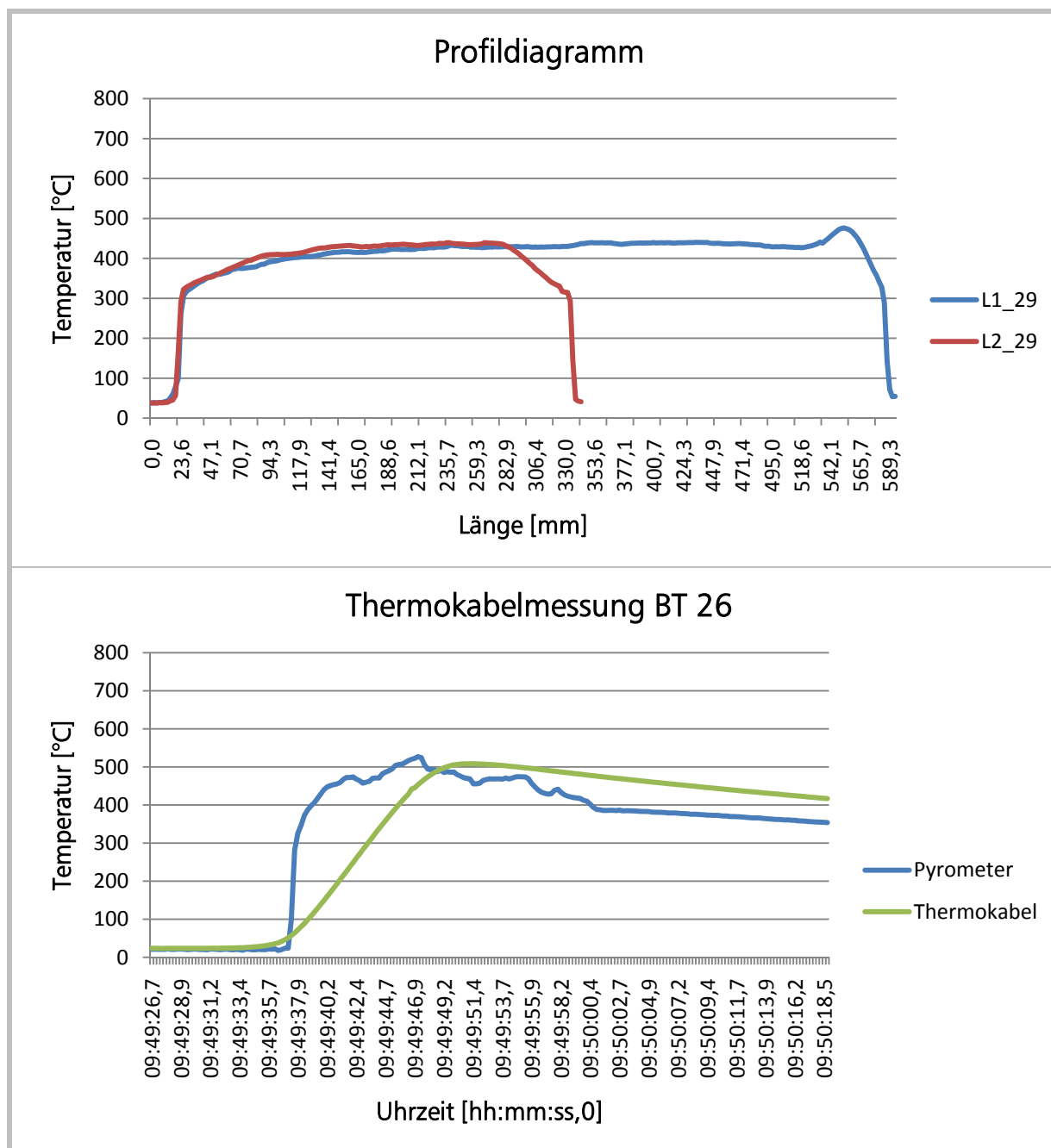
Die weiteren Vorteile dieses Aufbaus sind, dass die erwärmte Zone auf der Platine größer, der Temperaturhub pro Induktorleiter und die Aufbiegung aufgrund der Temperatureinbringung geringer wird. Dies ist zwar nicht die energetisch beste Lösung, jedoch besteht darin eine Möglichkeit die Formplatte homogen zu erwärmen.

In weiterer Folge ist ein neuer Flächeninduktor zu bauen. Dieser ist mit vielen Windungen für eine homogene Ausbreitung des magnetischen Feldes auszuführen. Der Abstand zwischen Induktor und Platine ist für die Erreichung eines besseren Wirkungsgrades gering zu halten.

## Anhang

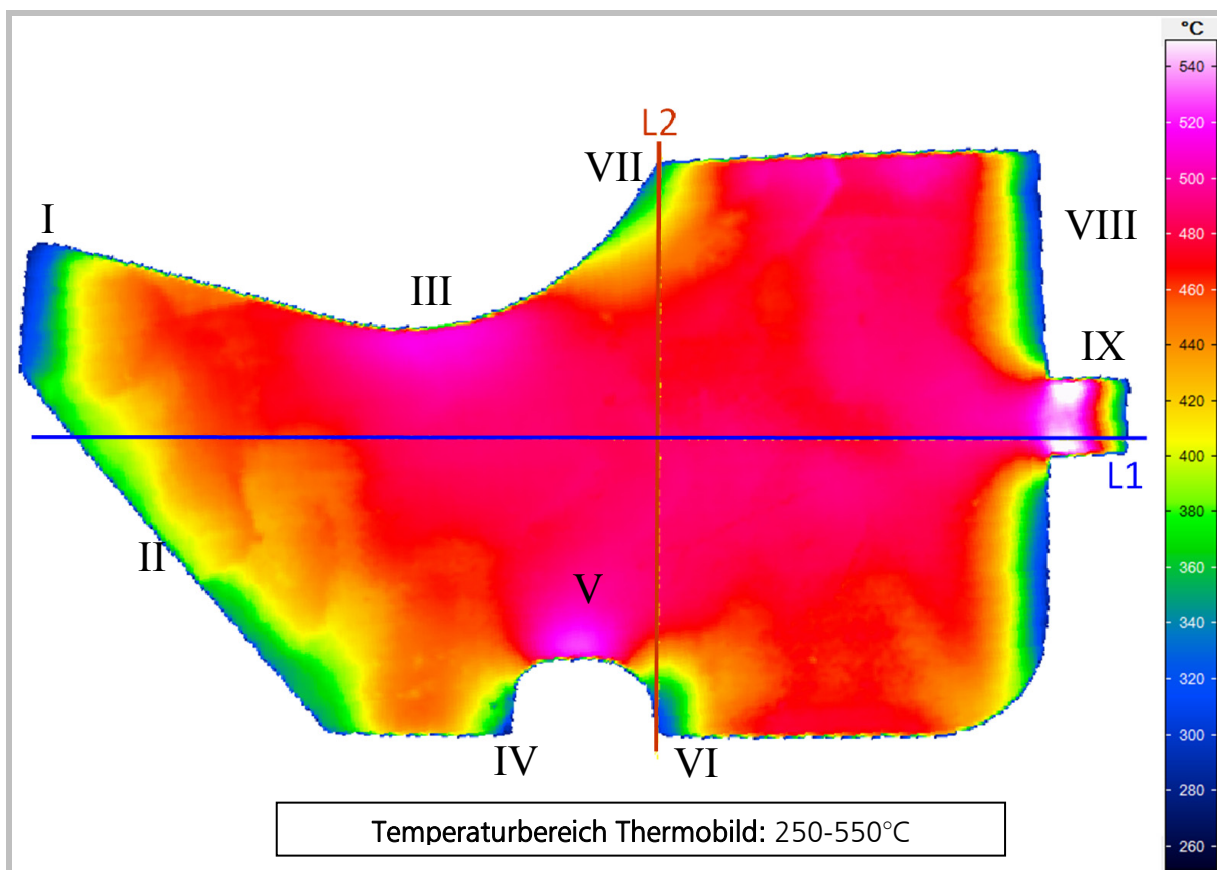
## Bauteil 26



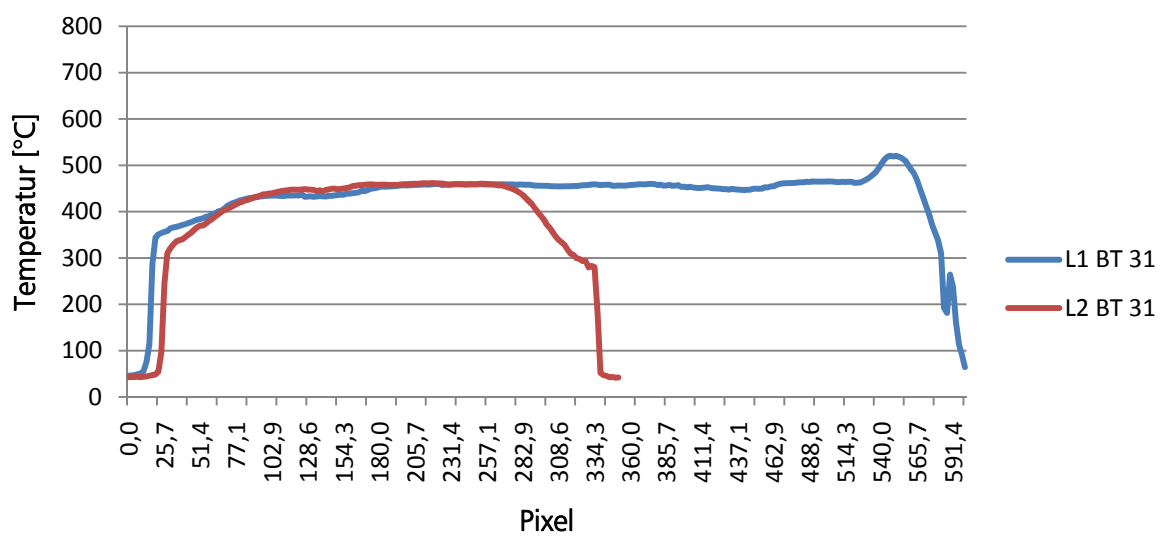


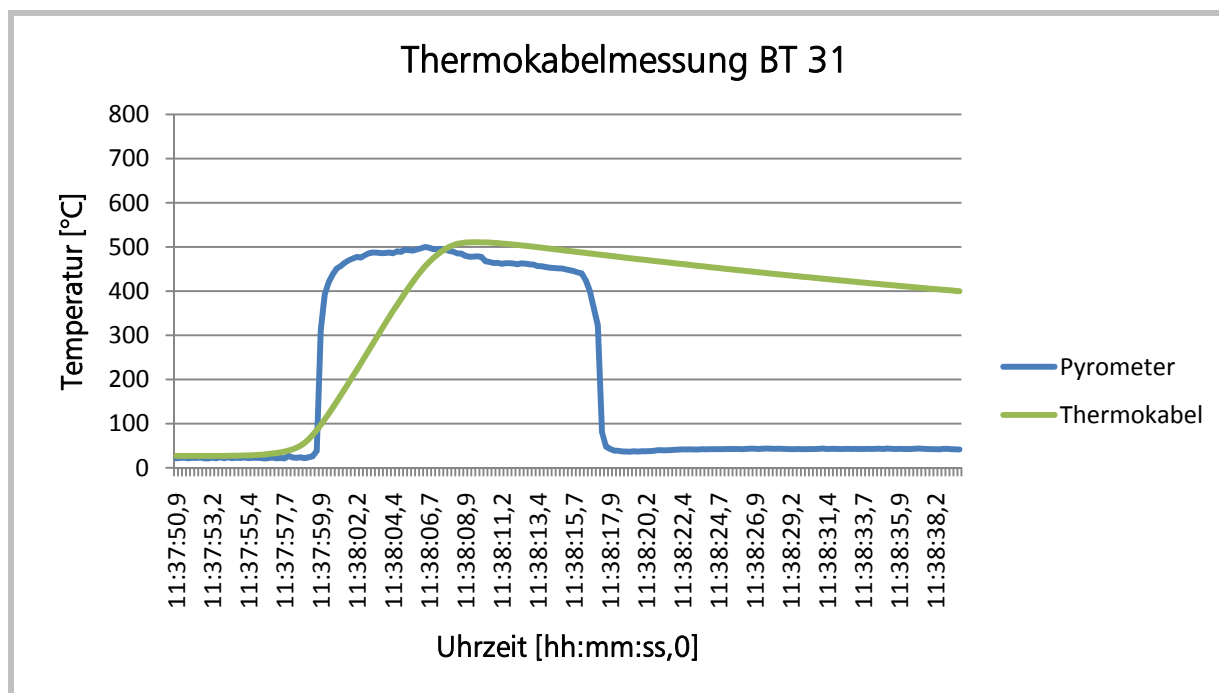
## Bauteil 31

Datum: 16.11.2010	Zieltemperatur: 500°C
Induktor: Längsfeldinduktor	Spannung: 60%
Vorschub: 33mm/s	Max. Temperatur Thermokabel: 510°C
Thermobildnummer.: 40020	Aufnahmezeit Thermobild: 11:38:16,562
Emissionskoeffizient: 0,91	Temperatur am Messpunkt zur Aufnahmezeit: 485°C



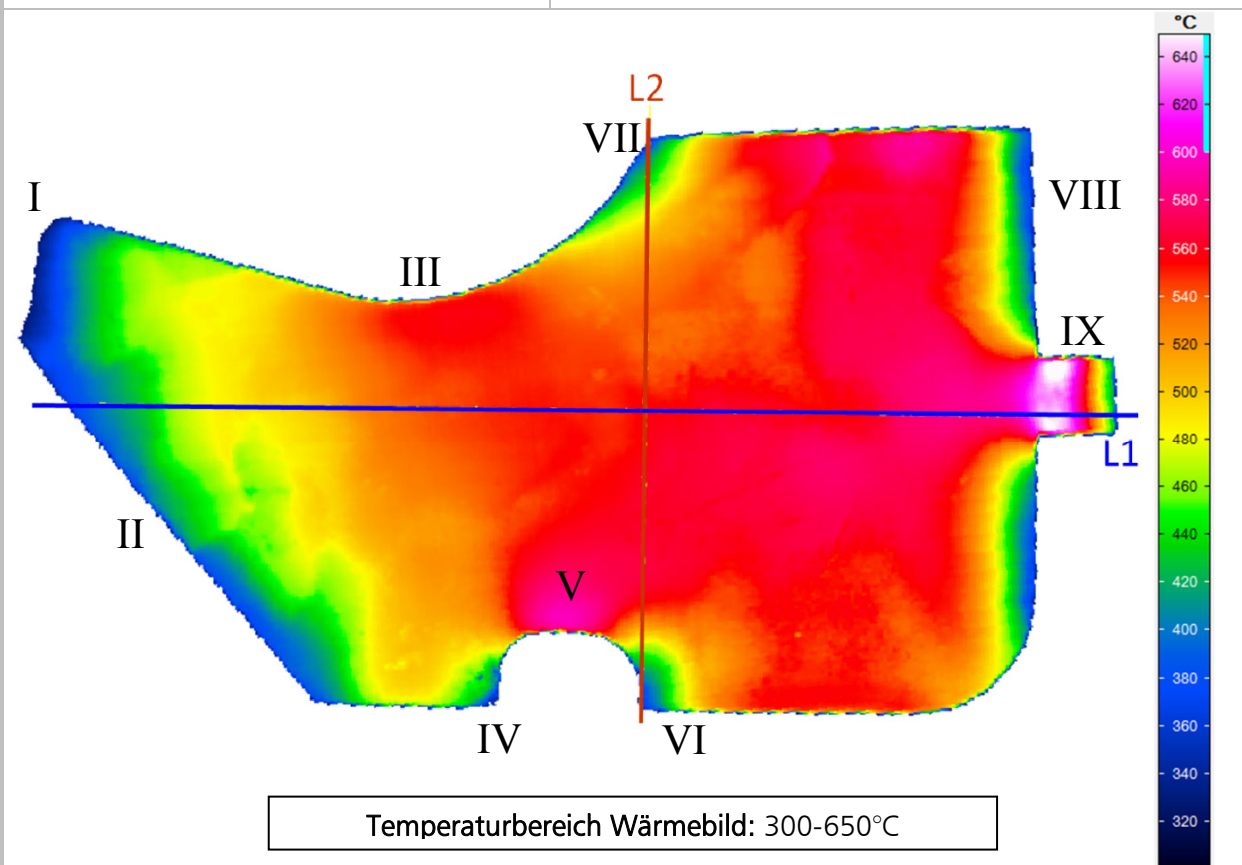
Profildigramm



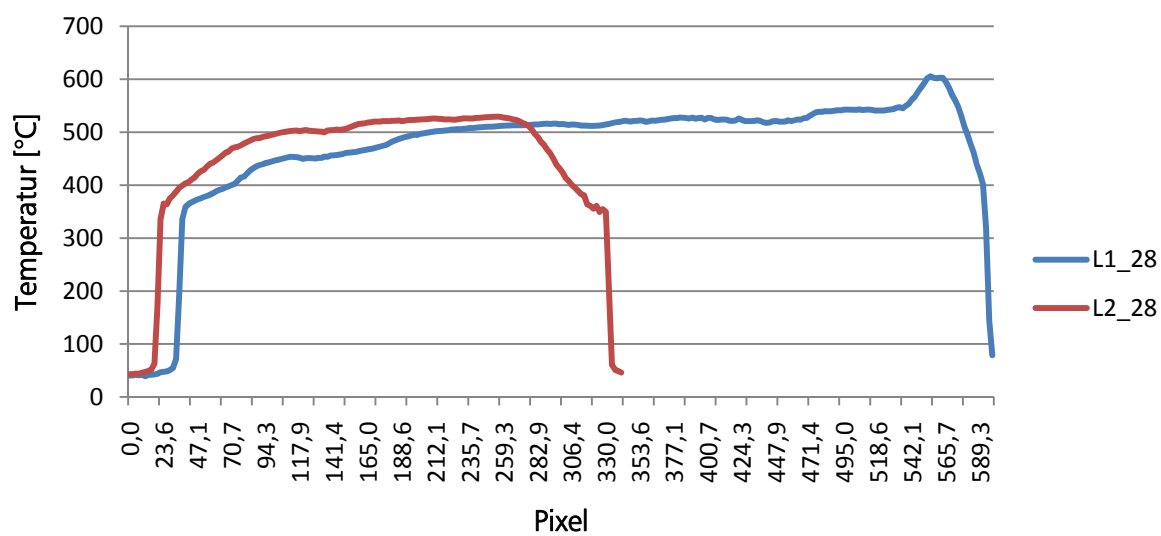


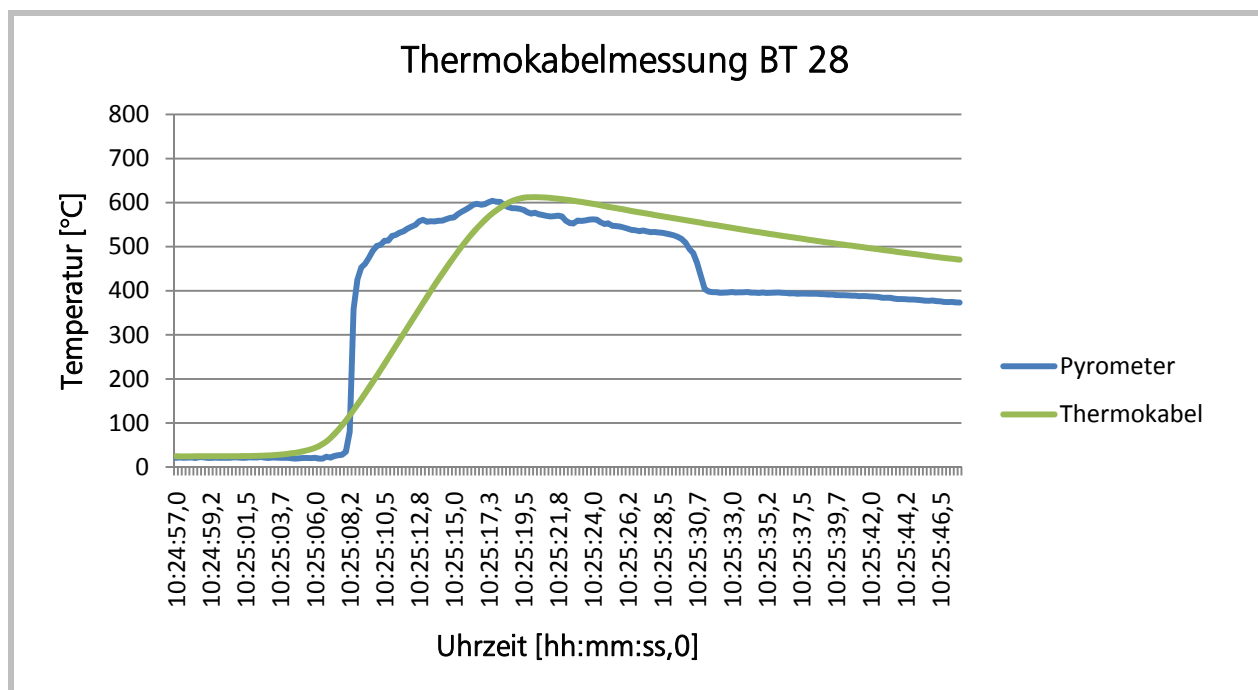
## Bauteil 28

Datum: 16.11.2010	Zieltemperatur: 600°C
Induktor: Längsfeldinduktor	Spannung: 58%
Vorschub: 25mm/s	Max. Temperatur Thermokabel: 612°C
Thermobildnummer.: 40028	Aufnahmezeit Thermobild: 10:25:31,421
Emissionskoeffizient: 0,9	Temperatur am Messpunkt zur Aufnahmezeit: 554°C



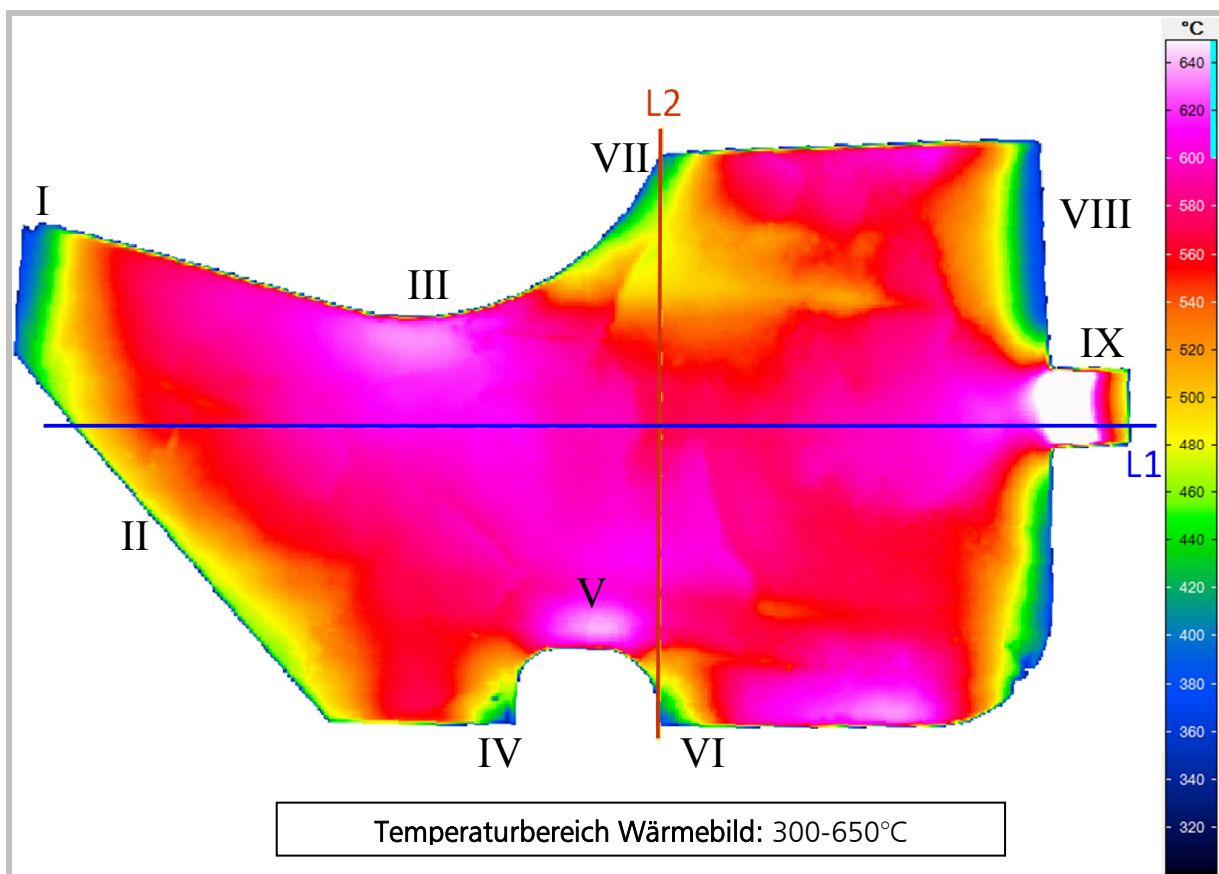
Profildiagramm



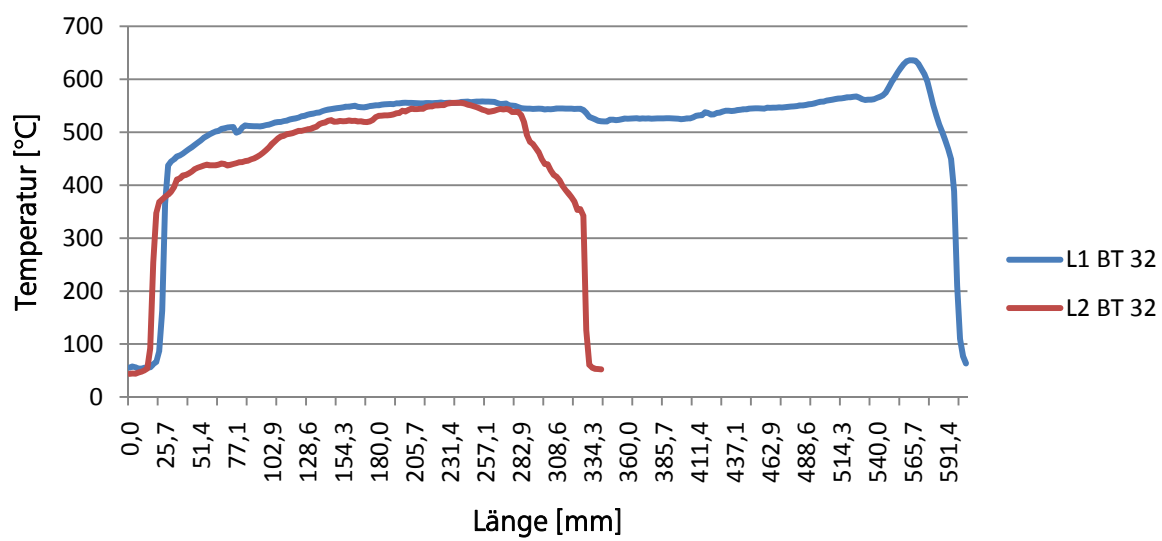
**Bauteil 32**

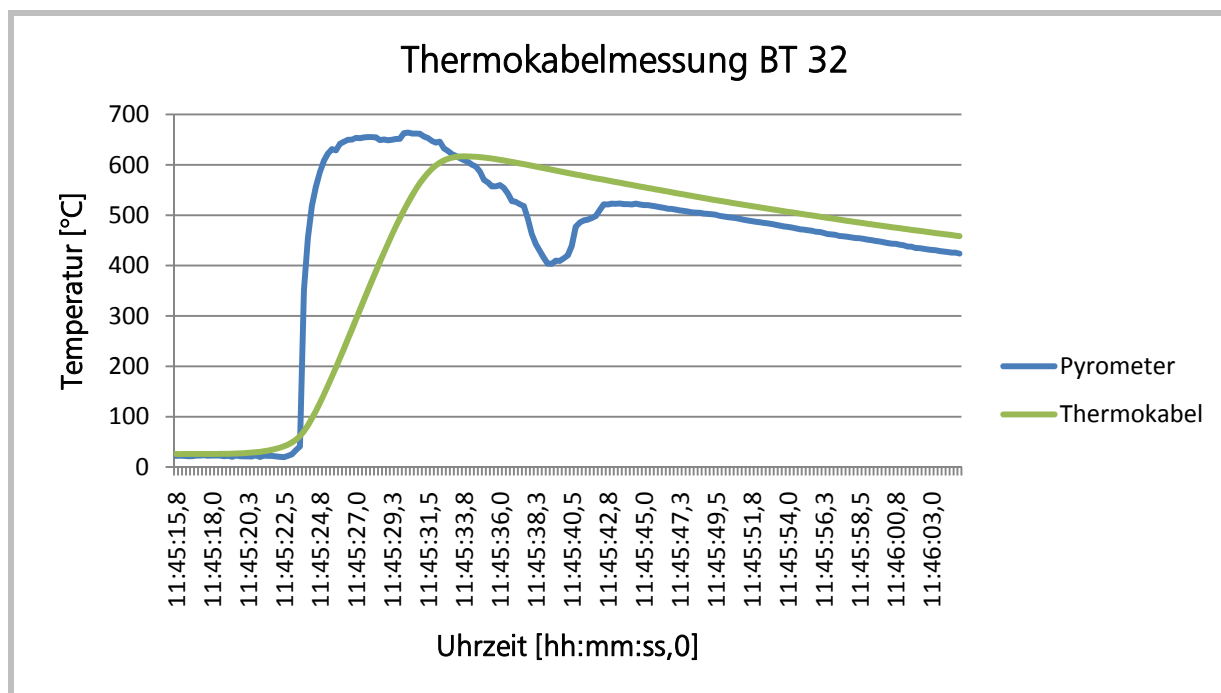
Datum: 16.11.2010	Zieltemperatur: 600°C
Induktor: Längsfeldinduktor	Spannung: 71%
Vorschub: 33mm/s	Max. Temperatur Thermokabel: 616°C
Thermobildnummer.: 40023	Aufnahmezeit Thermobild: 11:45:42,312
Emissionskoeffizient: 0,87	Temperatur am Messpunkt zur Aufnahmezeit: 570°C





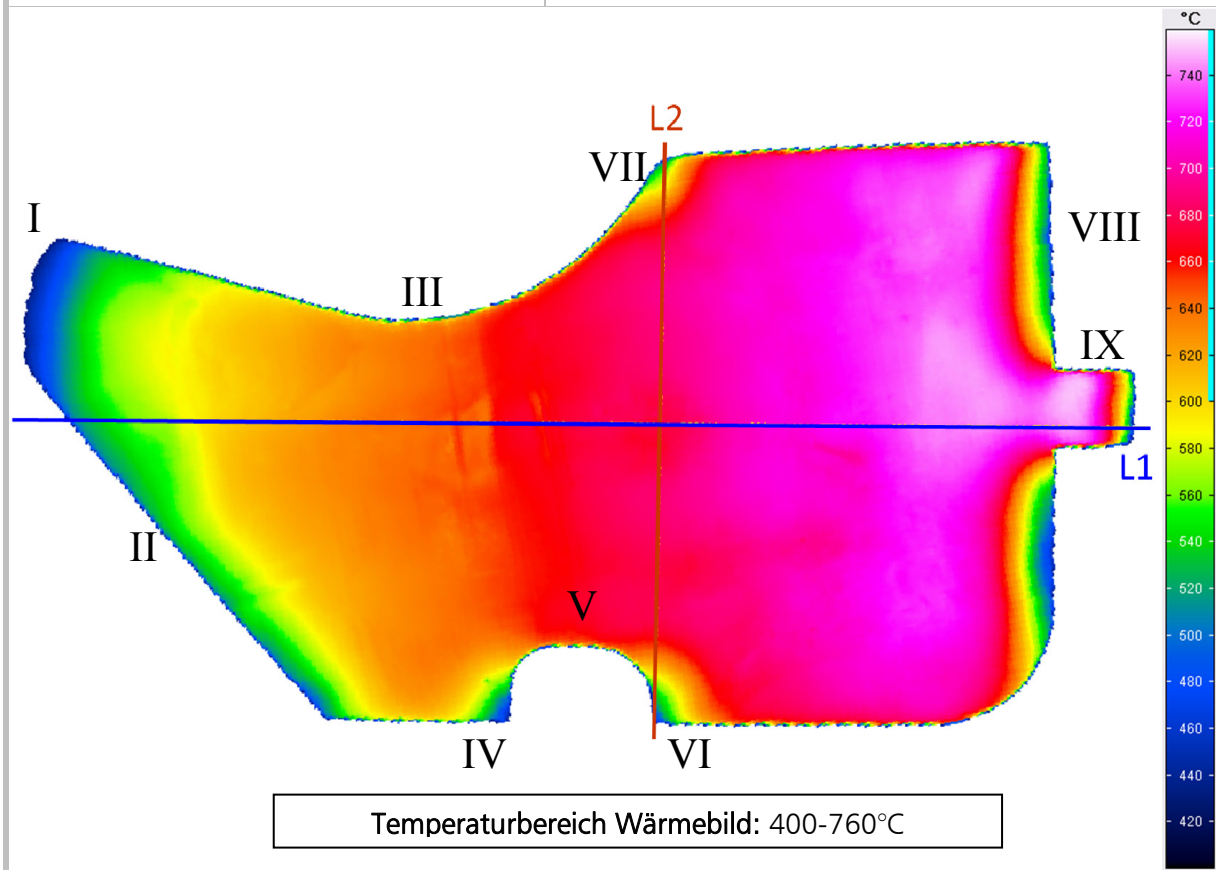
Profildiagramm BT 32



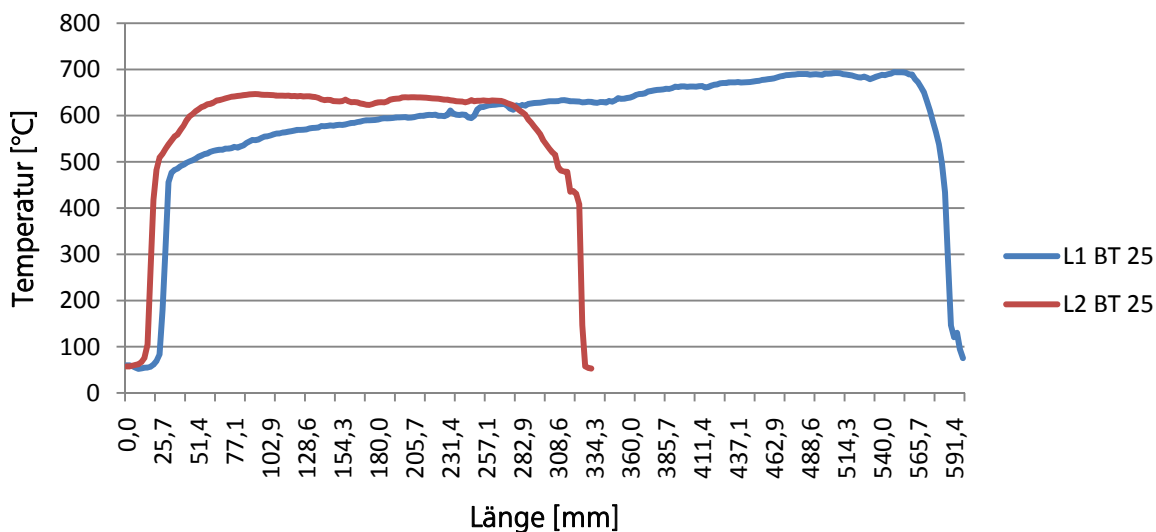


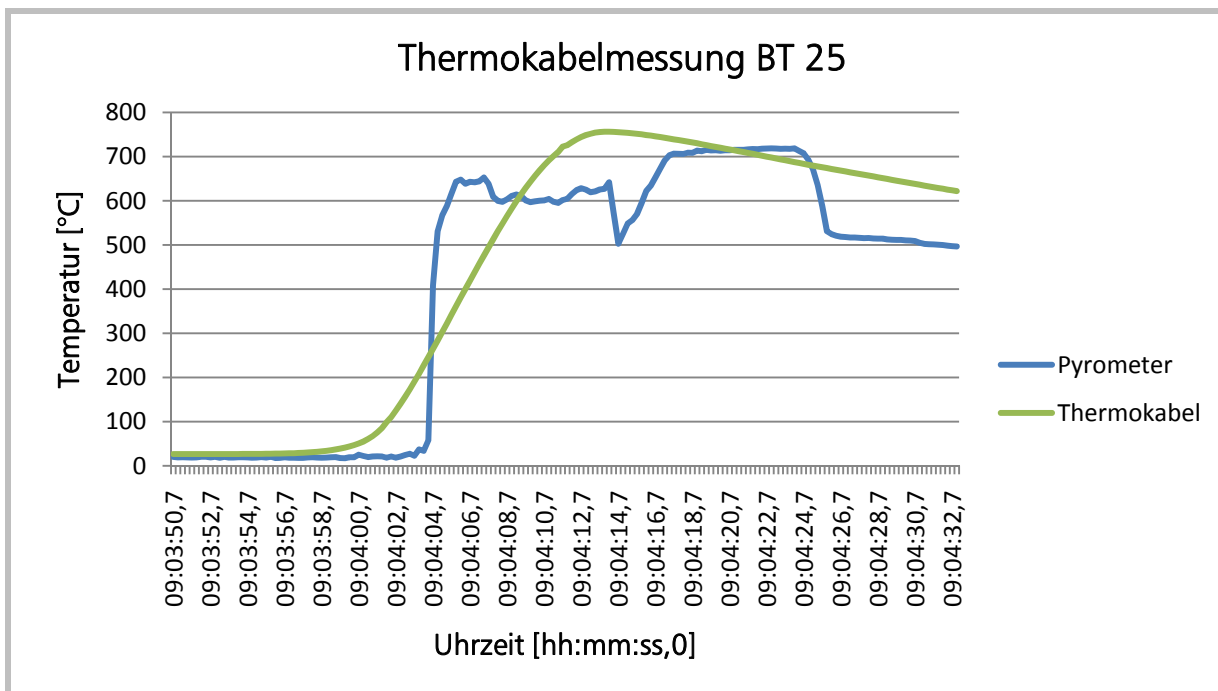
Bauteil 25

Datum: 16.11.2010	Zieltemperatur: Curie-Temperatur
Induktor: Längsfeldinduktor	Spannung: 73%
Vorschub: 25mm/s	Max. Temperatur Thermokabel: 756°C
Thermobildnummer.: 40025	Aufnahmezeit Thermobild: 09:04:26,046
Emissionskoeffizient: 0,9	Temperatur am Messpunkt zur Aufnahmezeit: 672°C



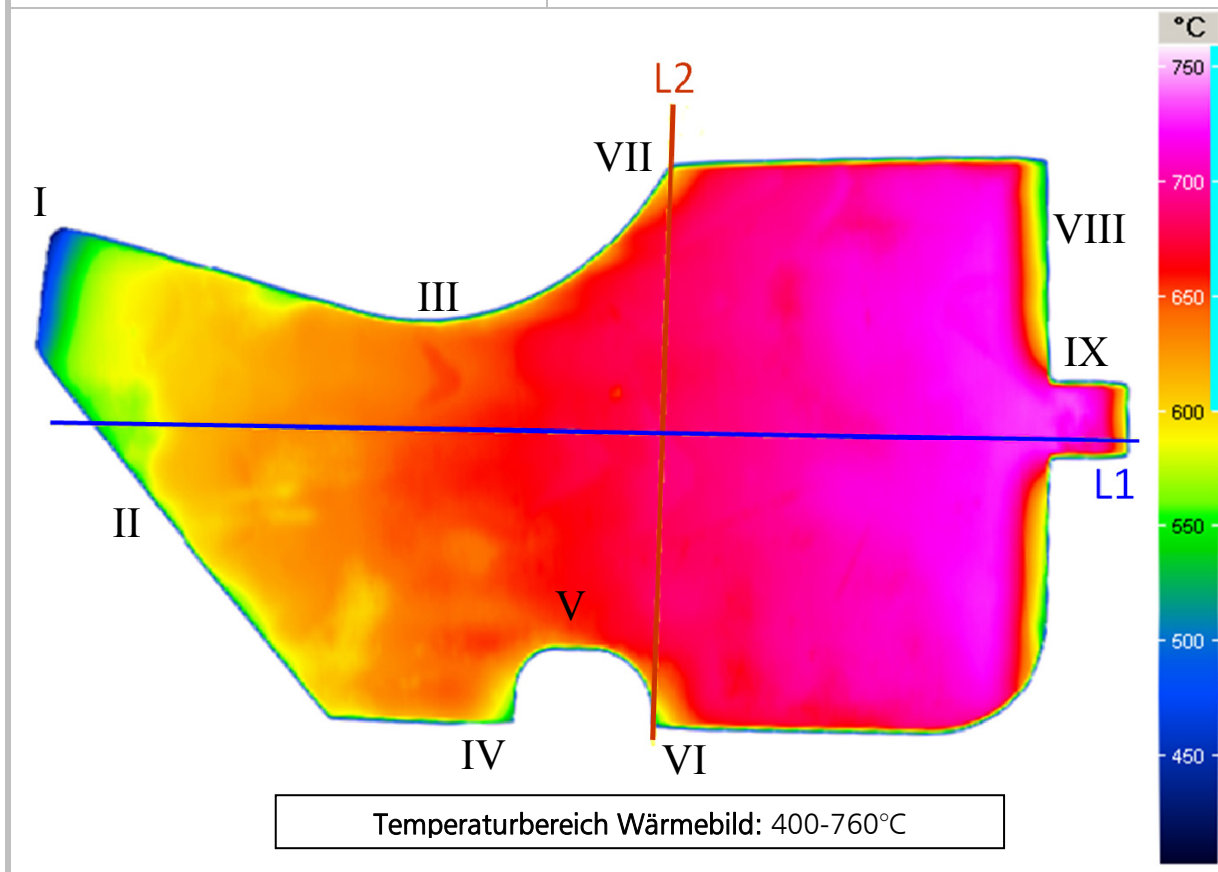
Profildiagramm BT 25

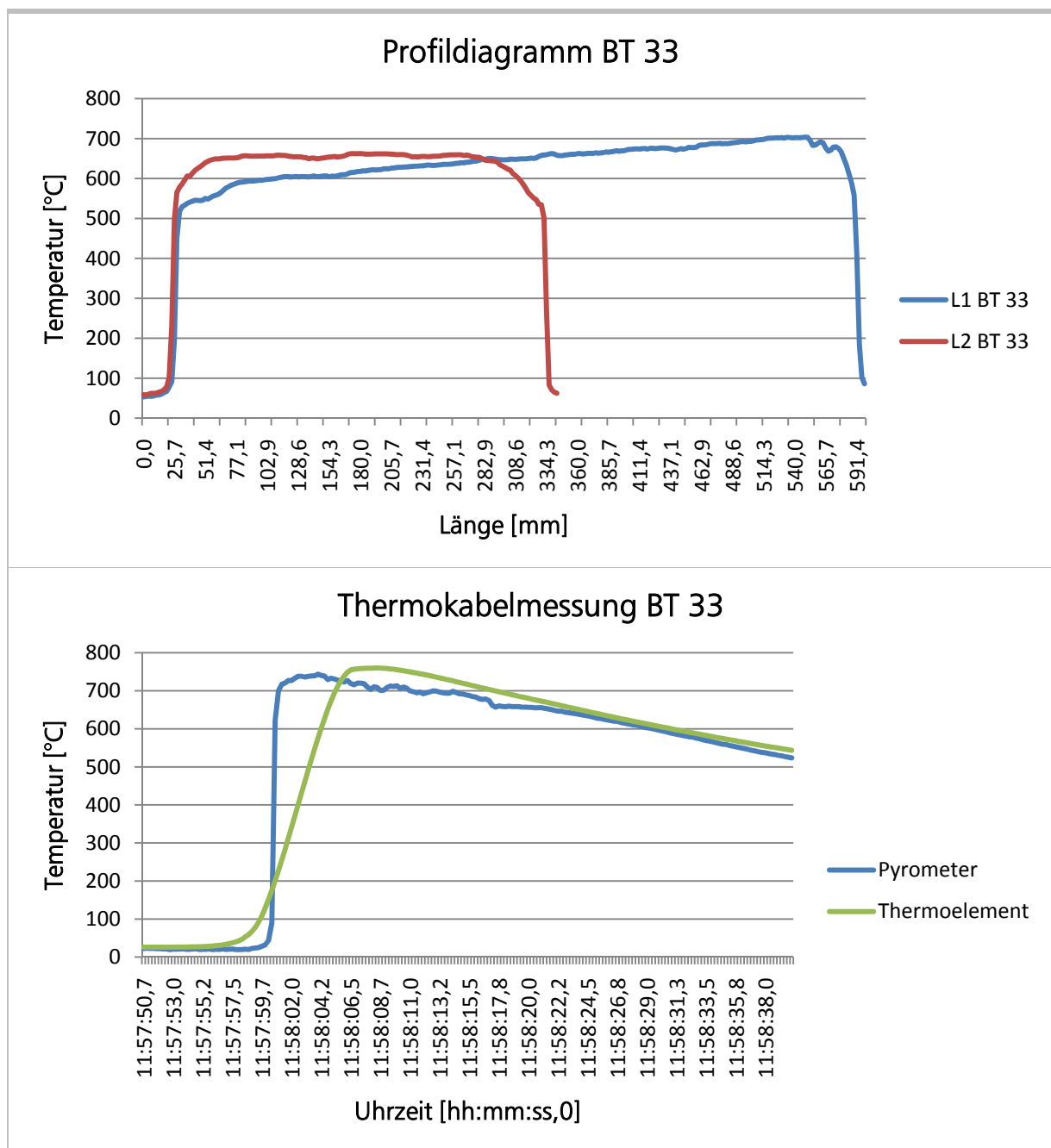




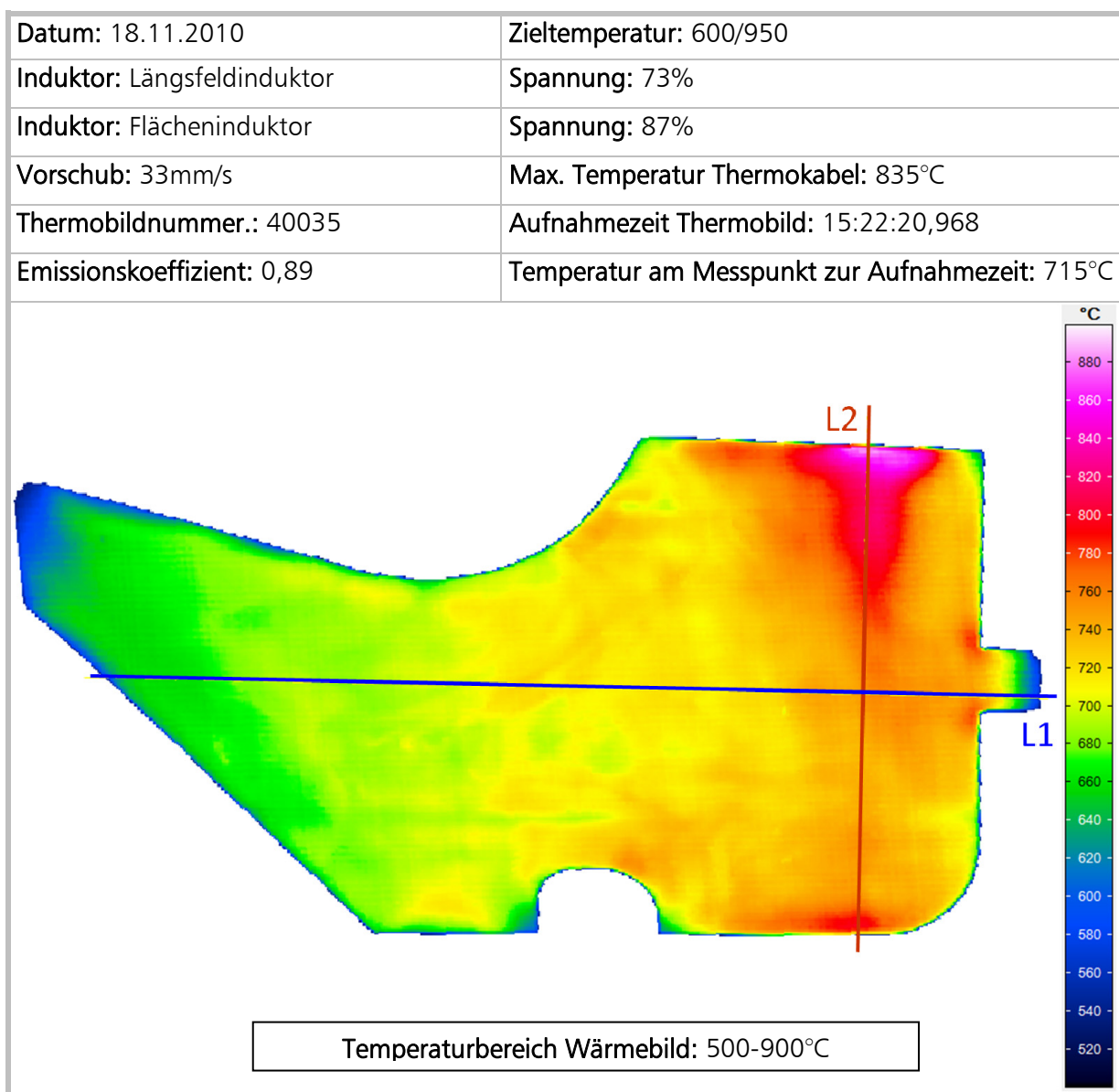
**Bauteil 33**

Datum: 16.11.2010	Zieltemperatur: Curie-Temperatur
Induktor: Längsfeldinduktor	Spannung: 100%
Vorschub: 33mm/s	Max. Temperatur Thermokabel: 758°C
Thermobildnummer.: 40021	Aufnahmezeit Thermobild: 11:58:18,296
Emissionskoeffizient: 0,93	Temperatur am Messpunkt zur Aufnahmezeit: 694°C

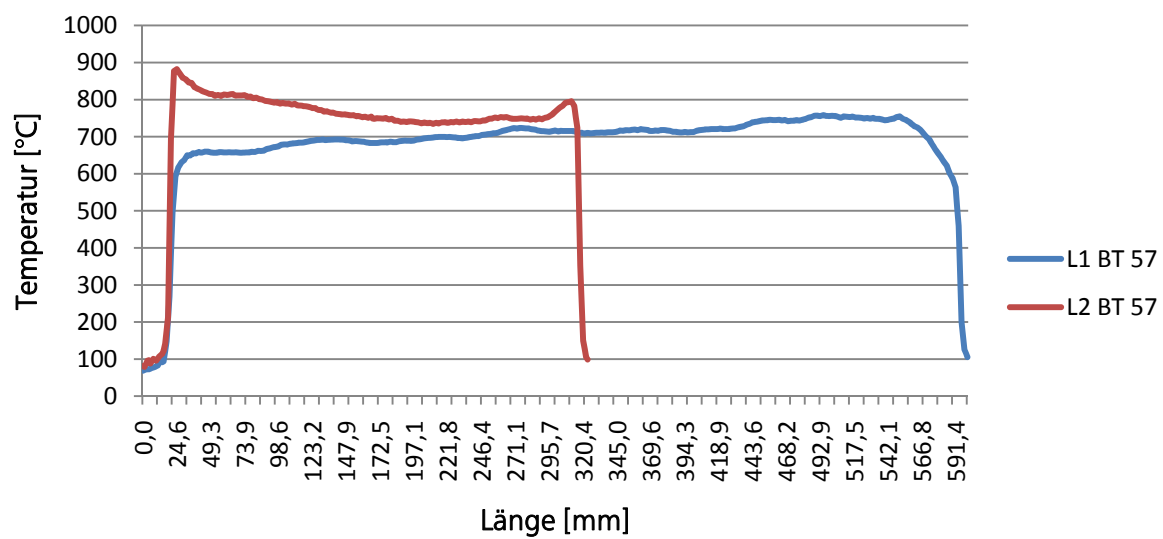




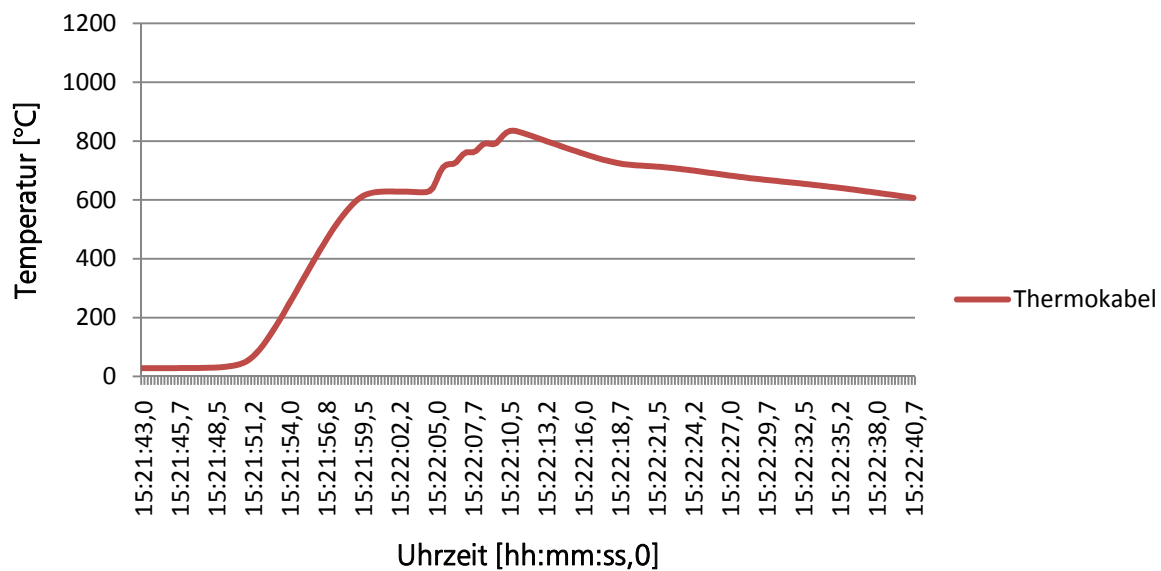
## Bauteil 57 – Platine im Flächeninduktor nach unten durchgebogen



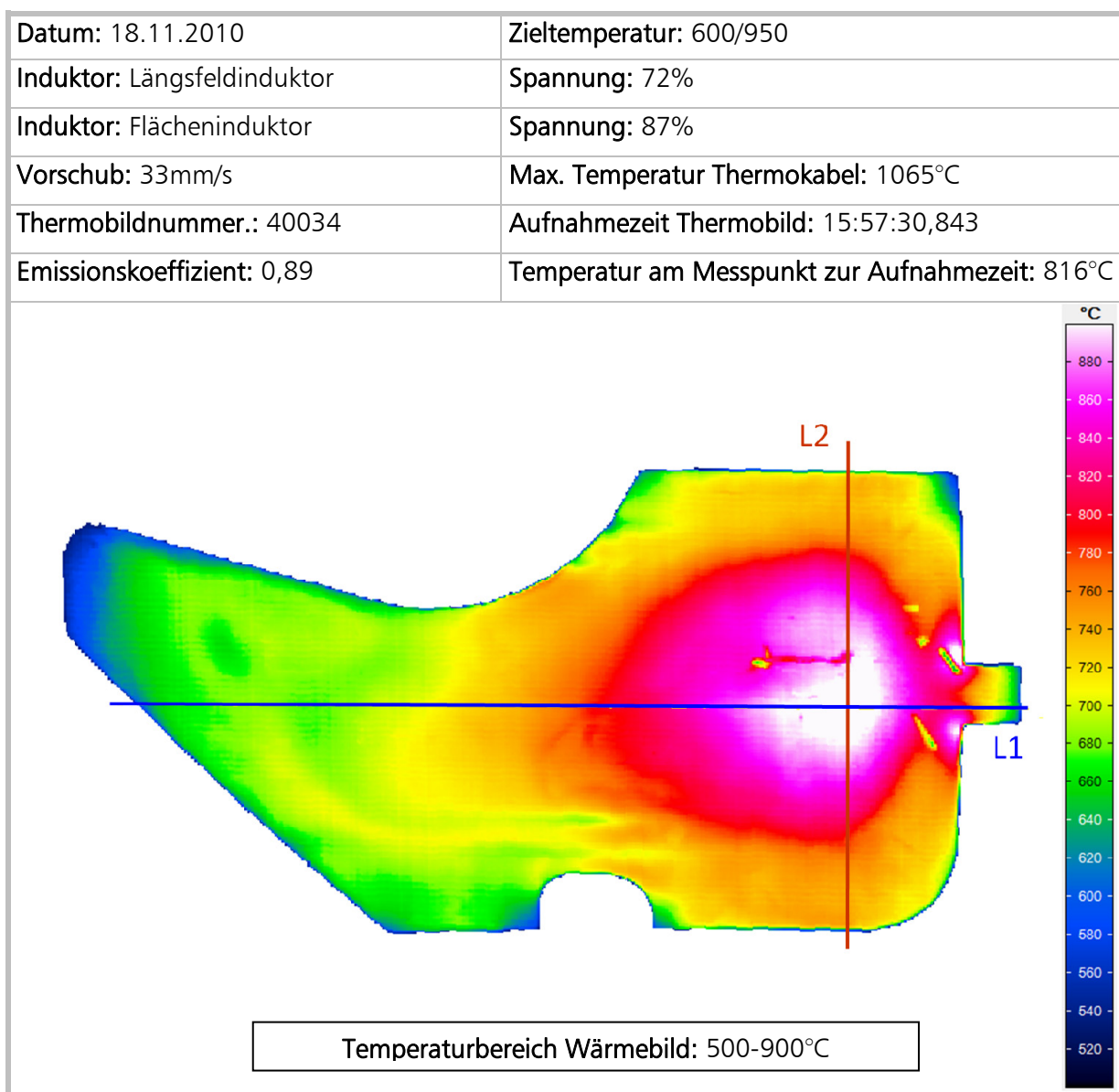
Profildiagramm BT 57



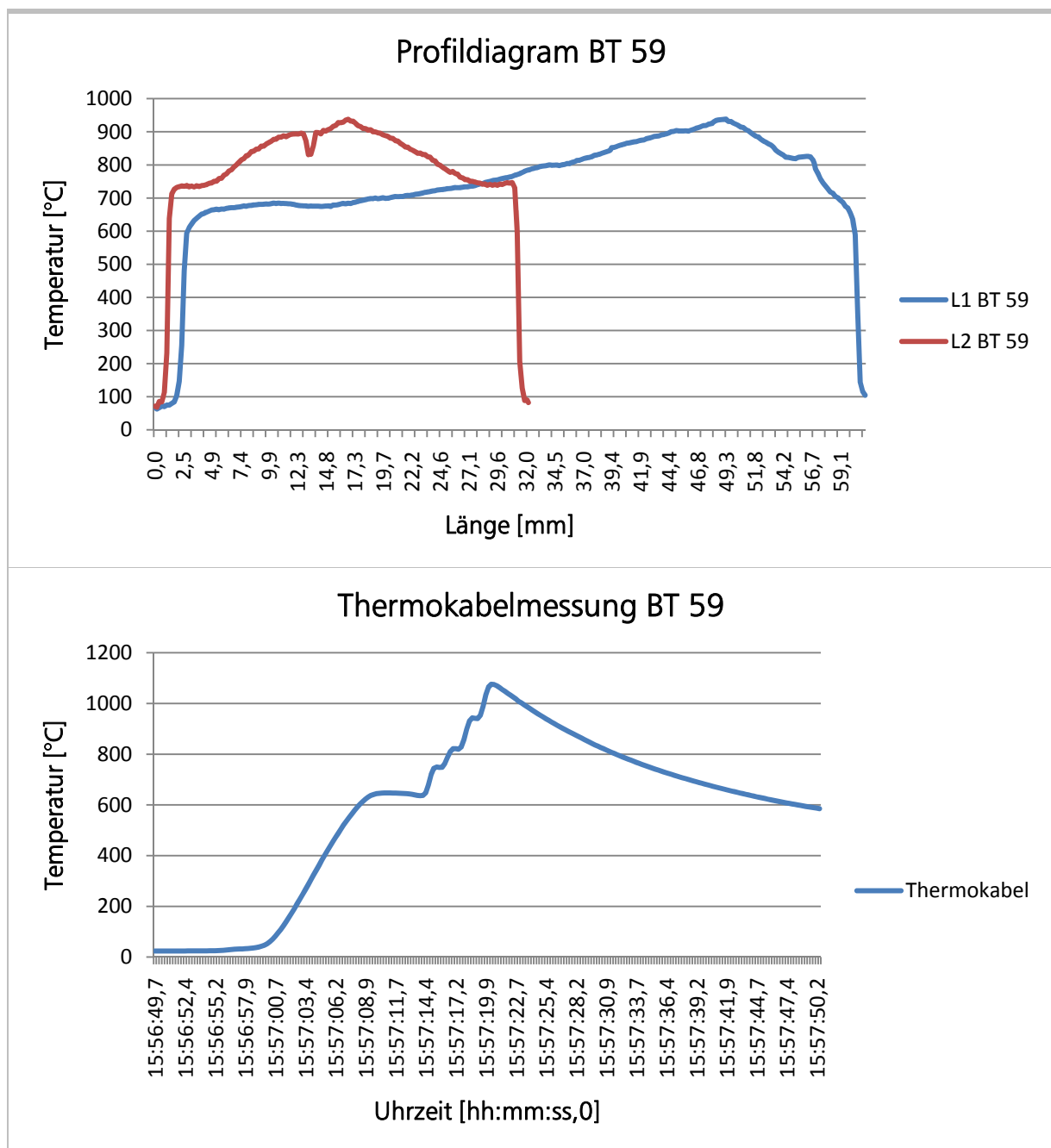
Thermokabelmessung BT 57



## Bauteil 59 – Platine im Flächeninduktor nach oben aufgebogen

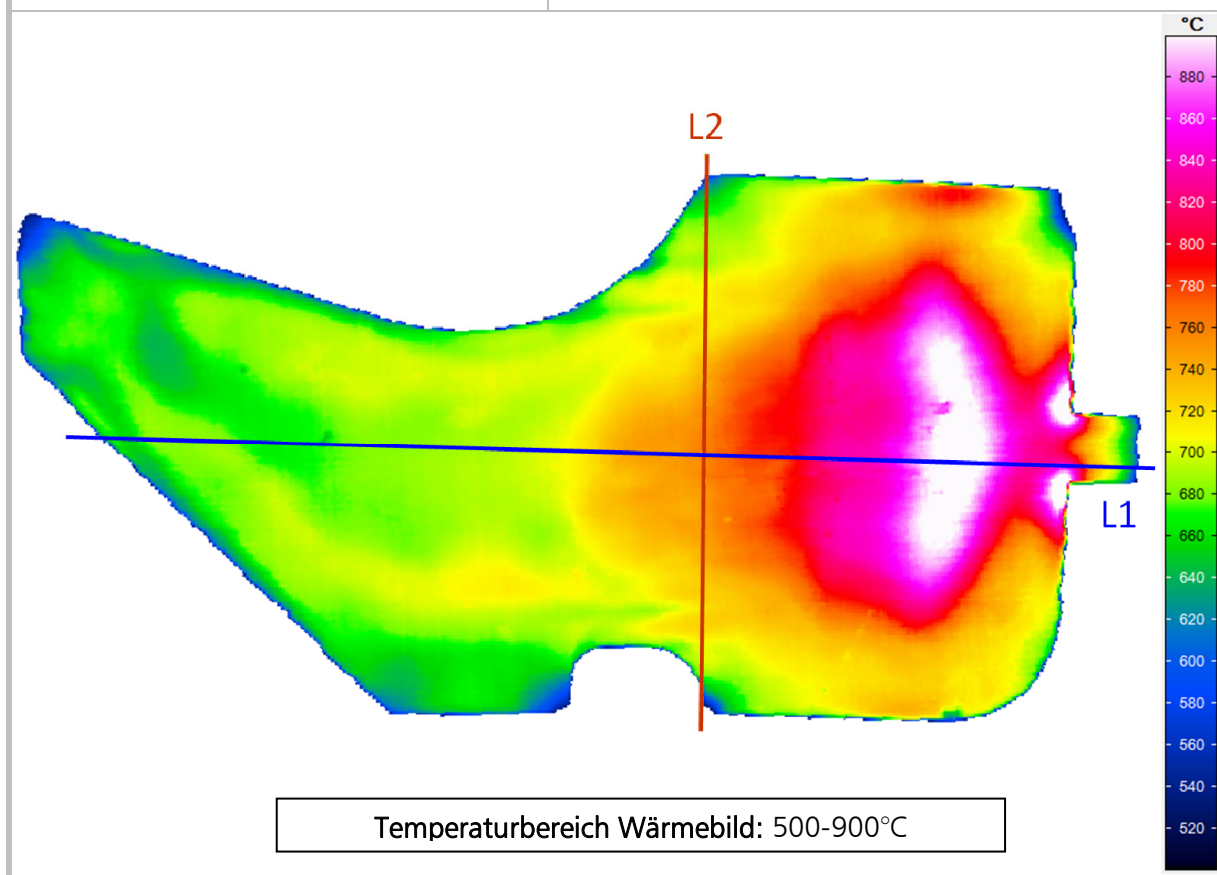


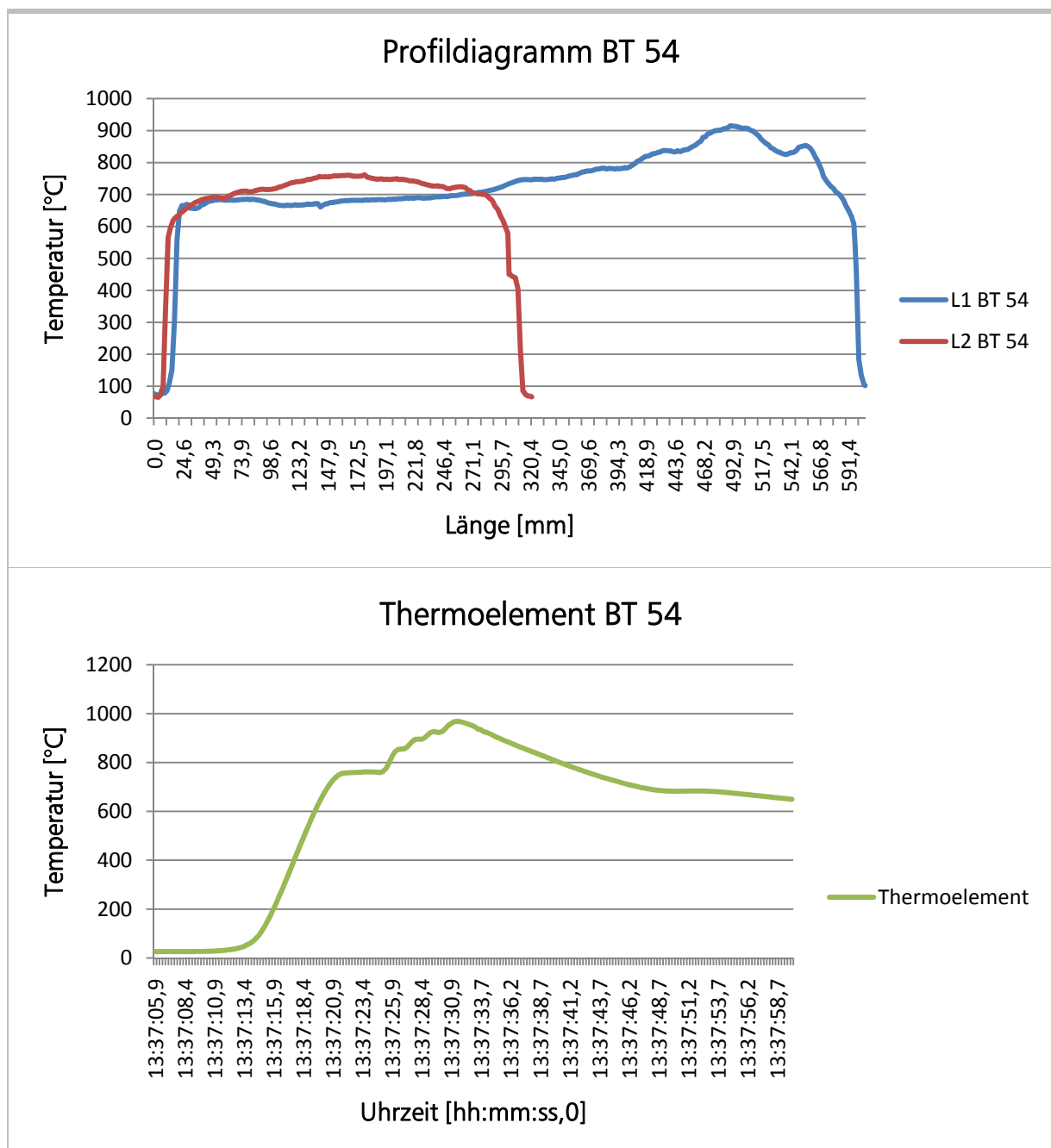




## Bauteil 54 – Platine im Flächeninduktor nach oben aufgebogen

Datum: 18.11.2010	Zieltemperatur: Curie/950
Induktor: Längsfeldinduktor	Spannung: 100%
Induktor: Flächeninduktor	Spannung: 83%
Vorschub: 33mm/s	Max. Temperatur Thermokabel: 968°C
Thermobildnummer.: 40030	Aufnahmezeit Thermobild: 13:37:42,671
Emissionskoeffizient: 0,88	Temperatur am Messpunkt zur Aufnahmezeit: 759°C





## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Umwandlung der Eigenschaften von 22MnB5 (1) .....	6
Abbildung 2	ZTU-Schaubild von 22MnB5 [10] S.145 .....	7
Abbildung 3	Direktes Presshärten [11] S. 6.....	7
Abbildung 4	Indirektes Presshärten [11] S. 7 .....	8
Abbildung 5	Karosserie Passat Variant [12] S. 31.....	8
Abbildung 6	Realer Kontakt bei konduktiver Erwärmung [15] S. 317 .....	13
Abbildung 7	Keramischer Infrarotstrahler [15] S. 486 .....	14
Abbildung 8	Magnetisches Wechselfeld einer Spule [22] S. 8 .....	16
Abbildung 9	Leiter im magnetischen Wechselfeld [22] S. 8.....	17
Abbildung 10	Induktive Erwärmung eines Metallzylinders [22] S. 10 .....	18
Abbildung 11	Spezifischer Widerstand und Permeabilität verschiedener Werkstoffe in Abhängigkeit von der Temperatur [20] S. 15 .....	20
Abbildung 12	Stromdichte und Volumenleistungsdichte in Abhängigkeit des Abstandes von der Oberfläche. [22] S. 13 .....	20
Abbildung 13	Widerstandsfunktion als Funktion von $d/\delta$ [22] S. 17.....	21
Abbildung 14	Stromeindringmaß in Metallzylinder [15] S: 314 .....	22
Abbildung 15	Eindringmaß in Abhängigkeit von der Frequenz [22] S. 14 .....	23
Abbildung 16	Weißsche Bezirke [24] S. 284.....	24
Abbildung 17	Magentisierungskurve [24] S. 284.....	24
Abbildung 18:	Hysteres- und Wirbelstromverluste als Funktion der Frequenz. [20] S. 12 .....	25
Abbildung 19	Mindestfrequenz in Abhängigkeit des Werkstück-durchmessers oder der Werkstückdicke [20] S. 17.....	27
Abbildung 20	Induzierte Volumenleistungsdichte über das Verhältnis $d/\delta$ [22] S. 18 .....	27
Abbildung 21	Induktorwirkungsgrad für ein ebenes Werkstück [20] S. 59 .....	28
Abbildung 22	Schematischer Aufbau des Induktorleiters [22] S. 27 .....	29
Abbildung 23	Längsfeldinduktor.....	30
Abbildung 24	Querfeldinduktor.....	31
Abbildung 25	Flächeninduktor.....	31
Abbildung 26	Prinzipieller Aufbau eines Umrichters [25] S. 9 .....	33
Abbildung 27	Verwendeter Längsfeldinduktor .....	34
Abbildung 28	Verwendeter Flächeninduktor .....	35
Abbildung 29	Verwendeter Querfeldinduktor .....	35

---

Abbildung 30	Formplatine für Versuchszwecke.....	38
Abbildung 31	Herstellverfahren Thermoelement [27] .....	39
Abbildung 32	Elektronik-Box [29] S. 3.....	40
Abbildung 33	Messfleckdurchmesser in Abhängigkeit der Entfernung [29] S. 6 .....	40
Abbildung 34	Formplatine für die Vorversuche .....	42
Abbildung 35	Gemessene Spannung am Thermokabel.....	43
Abbildung 36	Gemessene Spannung am Thermokabel - Platine geerdet.....	44
Abbildung 37	Position Pyrometer und Befestigungspunkt Thermokabel.....	46
Abbildung 38	Temperatureinbringung des Flächeninduktors .....	55
Abbildung 39	Flächeninduktor mit Edelstahlkette.....	57
Abbildung 40	Abstandseinfluss auf die Endtemperatur bei Erwärmung mittels Flächeninduktor.....	60
Abbildung 41	Aufgebauter Quersfeldinduktor.....	61
Abbildung 42	Platine steckt im Quersfeldinduktor fest.....	62
Abbildung 43	Unterschiedliche Temperatureinbringung aufgrund des Abstandes .....	74
Abbildung 44	Einlauf der Platine in den Quersfeldinduktor .....	77
Abbildung 45	Platine mit Randüberhitzung.....	78
Abbildung 46	Formplatine nach kombinierter Erwärmung .....	78
Abbildung 47	Zwei Flächeninduktoren hintereinander angeordnet.....	85

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Verhältnis Treibstoffeinsparung zu Gewichtsreduktion [1] .....	4
Tabelle 2	Einteilung der Stähle [4] S. 438.....	5
Tabelle 3	Hersteller und Handelsnamen von 22MnB5 [9] .....	6
Tabelle 4	Übertragbare Leistung [20] S. 12 .....	15
Tabelle 5	Einteilung der Frequenzbereiche [22] S. 20 .....	16
Tabelle 6	Wirkungsgrad der unterschiedlichen Induktoren [20] S. 59.....	29
Tabelle 7	Beschreibung der Einflussgrößen .....	41
Tabelle 8	Versuchsablauf Längsfeldinduktion .....	48
Tabelle 9	Versuchsablauf Kombination Längsfeld- & Flächeninduktor .....	63

---

## Literaturverzeichnis

- [1] **Casadei A., Broda R.** *Impact of Vehicle Weight Reduction on Fuel Economy for Various Vehicle Architectures*,. Research Report Conducted by Ricardo Inc. , The Aluminum Association, Inc. 2008-04. S. 58. Project FB769.
- [2] **Kämpfer, S.** Leichtbau aus der Hitze. *INDUSTRIE anzeiger*. 2009, 7, S. 28.
- [3] **OG, Porsche Austria GmbH & Co, [Hrsg.]**. Der Passat, Der Passat Variant, Preise - Ausstattung - Technische Daten. [Prospekt]. Februar 2010, S. 24.
- [4] **Doege, E., Behrens, B.-A.** *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*. Berlin [u.a] : Springer, 2006. S. 438.
- [5] **Kim N.-H., Kwon K.-Y., Kang C.-G.** The effect of cooling rate on mechanical properties in hot press forming of AL-Si coated 22MnB5 sheet and it theoretical temperature prediction. *2nd International Conference HOT SHEET METAL FORMING OF HIGH-PERFORMANCE STEEL CHS<sup>2</sup>*. Luleå, Sweden : Verlag Wissenschaftliche Scripten, Kaiserstraße 32, 08209 Auerbach, Germany, June 15-17, 2009, S. 17-28.
- [6] **Faderl J., Radlmayer KM.** ultraform und ultraform-PHS - Innovation made by voestalpine. *1. Erlanger Workshop Warmblechumformung*. Erlangen : Meisenbach GmbH, Franz-Ludwig Straße 7a, D-96047 Bamberg, 2006, S. 130-149.
- [7] **Kolleck R., Aspacher J., Veit R.** Efficiency of hot forming processes. *2nd International Conference HOT SHEET METAL FORMING OF HIGH-PERFORMANCE STEEL CHS<sup>2</sup>*. Luleå, Sweden : Verlag Wissenschaftliche Scripten, Kaiserstraße 32, 08209 Auerbach, Germany, June 15-17, 2009, S. 173-180.
- [8] **Glatzer M., Stöhr T., Merklein M. Sikora S., Lamprecht K., Deinzer G.** Einfluss unterschiedlicher Wärmebehandlungsrouten auf die Robustheit der mechanischen Eigenschaften des Stahls 22MnB5. *4. Erlanger Workshop Warmblechumformung*. Erlangen, Germany : Meisenbach GmbH, Franz-Ludwig-Straße 7a, D-96047 Bamberg, 2009, S. 85-105.
- [9] Presshärten im Trend. *BLECH*. 2008, Vol. 02, März.
- [10] **Merklein M., Lechler J., Svsec T.** Verformungsabhängiges Umwandlungsverhalten von presshärtbaren Bor-Mangan-Stählen. *4. Erlanger Workshop Warmblechumformung*. Erlangen, Germany : Meisenbach GmbH, Franz-Ludwig-Straße 7a, D-96047 Bamberg, 2009, pp. 143-162.

- 
- [11] **Burkhardt, Lukas.** Eine Methodik zur virtuellen Beherrschung thermo-mechanischer Produktionsprozesse bei der Karosserieherstellung. Zürich : s.n., 2008. Diss. ETH Nr. 17545.
- [12] **OG, Porsche Austria GmbH & Co, [Hrsg.].** Der Passat und Passat Variant. [Prospekt]. April 2010. S. 30.
- [13] **Eriksson K., Lindman M.** *Press hardening - opportunity or limitation?, HOT SHEET METAL FORMING OF HIGH-PERFORMANCE STEEL, 2nd International Conference HOT SHEET METAL FORMING OF HIGH-PERFORMANCE STEEL CHS<sup>2</sup>.* Luleå : Wissenschaftliche Scripten, Kaiserstraße 32, 08209 Auerbach, Germany, June 15-17,2009. S. 199-204.
- [14] ThyssenKrupp Hotform Blanks, Neue Lösungen für die Automobilindustrie. [Online] [Zitat vom: 09. November 2010.] <http://www.tailored-blanks.com/produkte/tailored-products/thyssenkrupp-hotform-blanks.html>.
- [15] **Kramer C., Mühlbauer A.** *Praxishandbuch Thermoprozess-Technik, Grundlagen, Verfahren.* Essen : Vulkan-Verlag GmbH, 2002. S. 81-86. Bd. I.
- [16] **Riehle M., Simmchen E.** *Grundlagen der Werkstofftechnik, 2. aktualisierte Auflage.* Stuttgart : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Rüdigerstraße 14, 70469 Stuttgart, 2000. S. 197-200.
- [17] **Lehmann H., Schwartz R.** *Rollenherdöfen für das Presshärten, 3. Erlanger Workshop Warmblechumformung.* Erlangen : Meisenbach GmbH, Franz-Ludwig-Straße 7a, D-96047 Bamberg, 19. November 2009. S. 57-64.
- [18] **H., Lehmann.** *Roller Hearth Furnaces for Hot-Form Hardening, TOOLS AND TECHNOLOGIES FOR THE PROCESSING OF ULTRA HIGH STRENGTH STEELS.* Graz : Verlag der Technischen Universität Graz, May 31 - June 02, 2010. S. 131-140.
- [19] **Mühlbauer, A.** *Industrielle Elektrowärmetechnik.* Essen : Vulkan-Verlag, Essen, 1992. S. 238-242.
- [20] **Benkowski, G.** *Induktionserwärmung. Härten, Glühen, Schmelzen, Löten, Schweißen.* Berlin : Verlag Technik, 1990. S. 58-76.
- [21] **Schülbe H., Nacke B.** *Potentials of Induction Heating used in Industrial Applications for HSS-Material, TOOLS AND TECHNOLOGIES FOR THE PROCESSING OF ULTRA HIGH STRENGTH STEELS.* Graz : Verlag der Technischen Universität Graz, May 31 - June 02, 2010. S. 141-150.



- 
- [22] **Becker N., Hadick J.** *Induktive Erwärmung, 4. vollständig überarbeitete Auflage.* Essen : RWE Energie Aktiengesellschaft, Abt. Anwendungstechnik, Kruppstraße 5, 4300 Essen 1, 1991. S. 7-27.
- [23] **Prechtl, A.** *Vorlesung über die Grundlagen der Elektrotechnik Band 2.* Wien : Springer Verlag Wien [u.a], 1995. S. 25-28.
- [24] **Böge W., Plaßmann W.** *Vieweg Handbuch Elektrotechnik.* Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2007. S. 90-93.
- [25] **GmbH, ITG Induktionsanlagen, [ed.].** *Bedienungsanleitung Umrichter ITP 2x 10K80.* ITG Induktionsanlagen GmbH, Neckarsteinacher Straße 88, 69434 Hirschhorn/Neckar, 2009.
- [26] Thermocoax. *Temperaturmessung, Auswahl und Anwendung.* [Online] [Zitat vom: 22. 10 2010.] [http://www.thermocoax.com/doc-Temperature\\_sensors/D193-0-TE-Auswahl-Anwendungen.pdf](http://www.thermocoax.com/doc-Temperature_sensors/D193-0-TE-Auswahl-Anwendungen.pdf).
- [27] Therm-Cable GmbH Herstellverfahren. [Online] [Zitat vom: 20. 09 2010.] <http://thermcable.com/herstellverfahren.php>.
- [28] InfraTec, VarioCAM, Mobile Thermografiekamera für Forschung und Entwicklung. [Online] 2010. [Zitat vom: 27. September 2010.] [http://www.infratec.de/fileadmin/downloads/pdf/VC\\_hr/VC\\_hr\\_research\\_de.pdf](http://www.infratec.de/fileadmin/downloads/pdf/VC_hr/VC_hr_research_de.pdf).
- [29] Infrarot-Temperaturmessgerät DP. *Bedienungsanleitung.* s.l. : KELLER HCW GmbH Messen - Steuern - Regeln, Carl - Keller - Str. 2 - 10, 49479 Ibbenbüren, 2008.
- [30] **Poprawe, R.** Fraunhofer ILT. [Online] 11 2009. [Cited: 08 31, 2010.] [www.ilt.fraunhofer.de](http://www.ilt.fraunhofer.de).
- [31] **Heyde M., Rol K., Kawalla R., Bergweiler G., Kaiser J.** *Local heat treatment of ultra- high-strength steels - an opportunity to extend the range of car body components, TOOLS AND TECHNOLOGIES FOR THE PROCESSING OF ULTRA HIGH STRENGTH STEELS.* Graz : Verlag der Technischen Universität Graz, May 31 - June 02, 2010. S. 225-234.