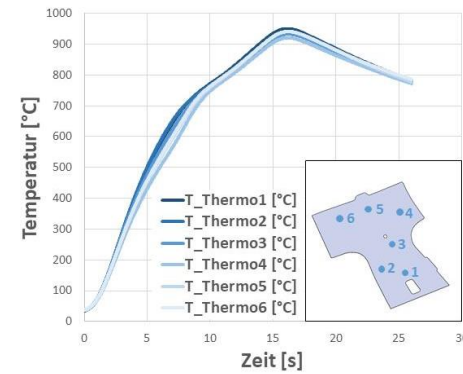


Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.  
Sohnstr. 65  
40237 Düsseldorf

fosta@stahlforschung.de  
www.stahlforschung.de



## Großserientaugliche induktive Platinen- erwärmung für den Warmformprozess

Series-production of inductively heated blanks  
for hot sheet metal forming

Forschung für die Praxis P 1038/ IGF-Nr. 18738 N

## **Forschungsprojekt P 1038 / IGF-Nr. 18738 N**

### **Großserientaugliche induktive Platinenerwärmung für den Warmformprozess**

Series-production of inductively heated blanks for hot sheet metal forming

Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn  
Prof. Dr. rer. nat. Thomas Tröster  
M. Sc. Florian Pfeifer

Institut für Elektroprozesstechnik, Universität Hannover  
Prof. Dr.-Ing. Bernard Nacke  
Dipl.-Ing. André Dietrich

Verantwortlich für die FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.  
Dipl.-Ing. Rainer Salomon

Das IGF-Vorhaben 18738 N der FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Vorhaben wurde vom Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil, Universität Paderborn, und am Institut für Elektroprozesstechnik, Universität Hannover, durchgeführt.

## **Beteiligte am Projektbegleitenden Ausschuss:**

ArcelorMittal Commercial Germany GmbH Niederlassung Stuttgart, Stuttgart  
Benteler Automobiltechnik GmbH, Paderborn  
CADFEM GmbH Geschäftsstelle Hannover, Hannover  
D & S Sandstrahltechnik GmbH & Co.KG, Paderborn  
Daimler AG, Ulm  
DOCERAM GmbH, Dortmund  
DOTHERM Isolierwerkstoffe GmbH & Co. KG, Dortmund  
EMA Indutec GmbH, Meckesheim  
EMAG eldec Induction GmbH, Dornstetten  
EMA-TEC GmbH, Sondershausen  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen  
HIMMELWERK Hoch- und Mittelfrequenzanlagen GmbH, Tübingen  
HoDforming GmbH, Düsseldorf  
IBB Induktorbau Bergel, Stuttgart  
Kirchhoff Automotive Deutschland GmbH, Attendorn  
Megatherm Elektromaschinen GmbH, Hemer  
Mercedes-Benz AG Mercedes-Benz Werk Sindelfingen, Sindelfingen  
NANO-X GmbH, Saarbrücken  
Opel Automobile GmbH, Rüsselsheim  
Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Salzgitter  
SMS Elotherm GmbH, Remscheid  
Tata Steel Europe Limited, IJMUIDEN, Niederlande  
voestalpine Metal Forming GmbH, Linz, Österreich  
voestalpine Stahl GmbH, Linz, Österreich  
Volkswagen AG, Baunatal

© 2021 Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf

Bestell-Nr. P 1038  
ISBN 978-3-96780-002-9

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung in andere Sprachen, bleiben vorbehalten. Ohne schriftliche Genehmigung der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. sind Vervielfältigungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen nicht gestattet.

## Kurzdarstellung

Ziel des Projektes war die Entwicklung eines induktiven Verfahrens zur flexiblen Erwärmung seriennaher Realbauteile für den Presshärteprozess. Im ersten Arbeitsschritt wurden daher die typische Bauteilgeometrien der Platinen pressgehärteter Bauteile vom projektbegleitenden Ausschuss bereitgestellt. Diese wurden von den Forschungsstellen klassifiziert und eingeordnet. Der daraus resultierende Bauteilkatalog diente zum einen als Grundlage für die Wahl des zu fertigenden Demonstratorbauteils und stellte zum anderen die Randbedingungen für die Simulation und Auslegung des Induktionsprozesses. Als repräsentatives Bauteil wurde eine B-Säule für die Fertigung des Demonstratorbauteils gewählt. Aufgrund der geringen Leistung des im Projekt bereitgestellten Umrichters wurde beschlossen die Untersuchungen auf den Kopf der B-Säule zu beschränken.

Während der Entwicklung des Induktionsprozesses wurden zunächst unterschiedliche Induktionskonzepte untersucht und bewertet. Die induktive Einzelteilerwärmung im Längsfeld wurde als vielversprechendstes Konzept für das Projekt ausgewählt. Es wurden im Folgenden diverse Simulationen zum Einfluss der zuvor ermittelten Bauteilgeometrien sowie der Induktorgeometrie durchgeführt, welche ebenfalls anhand experimenteller Untersuchungen validiert wurden. Die Ergebnisse wurden genutzt, um den Induktionsprozess zu optimieren und die Erwärmung des Demonstratorbauteils simulativ zu untersuchen. Es hat sich gezeigt, dass bei seriennahen Realbauteilen mit Temperaturabweichungen von  $\pm 4\%$ , abhängig von der Geometrie, zu rechnen ist. Der Induktor ist allerdings innerhalb dieser Grenzen auch unabhängig von der Bauteilgeometrie, solange ein ausreichend großer Abstand des Bauteils zu den Windungen des Induktors eingehalten wird. Simulative Untersuchungen zur partiellen Erwärmung ergaben, dass sich gezielte Temperaturunterschiede auf globaler Ebene sehr gut durch mehrere Induktoren unterschiedlicher Geometrie oder mit unterschiedlicher Ansteuerung realisieren lassen.

Für experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung des Prozessfensters der induktiven Erwärmung wurde auf Basis der Ergebnisse aus der Simulation ein Versuchsstand im Labormaßstab aufgebaut. Es wurde ein Versuchsprogramm mit unterschiedlichen Temperaturen, Aufheizraten und Haltezeiten aufgestellt und durchgeführt, um den Einfluss der Prozessparameter auf die mechanischen sowie Gefüge- und Beschichtungseigenschaften zu bestimmen. Untersucht wurden die Bor- Mangan-Stähle 22MnB5 mit Beschichtungen aus Aluminium-Silizium (vordiffundiert) und nano-beschichtet sowie 20MnB8 mit einer Zink-Beschichtung. Es ergaben sich für alle gewählten Versuchsparameter ähnliche mit dem konventionellen Prozess vergleichbare mechanische Eigenschaften. Auch bei den Beschichtungen zeigte sich eine ähnliche Ausbildung bei induktiv und im Ofen erwärmten Proben. Leichte Abweichungen im Beschichtungsgefüge resultierten nicht in einer negativen Beeinflussung der Beschichtungseigenschaften. Dies bedeutet zum einen, dass eine induktive Erwärmung mit hohen Aufheizraten und ohne zusätzliche Haltezeiten möglich ist, zum anderen, dass eine potenzielle Temperaturabweichung von  $\pm 4\%$ , wie sie in der simulativen Prozessauslegung ermittelt wurde, nicht zu inhomogenen Bauteileigenschaften führen muss.

Auf Basis der Simulationsergebnisse und der Untersuchungen der Prozessfensterbestimmung wurde dann bei einem Projektpartner eine Anlage zur Fertigung des festgelegten Demonstratorbauteils aufgebaut. Es wurden Bauteile aus der induktiven Erwärmung sowie dem Ofenprozess umgeformt und gehärtet. Eine Überprüfung der Homogenität während der Erwärmung zeigte, dass über das Bauteil ein Temperaturunterschied von ca. 30 K vorliegt. Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften sowie der Beschichtungsausbildung bestätigte die Ergebnisse aus der Prozessfensterbestimmung. Es konnten homogene Bauteil- und Beschichtungseigenschaften mit Hilfe der induktiven Erwärmung erreicht werden. Es konnten außerdem keine signifikanten Unterschiede in den Eigenschaften induktiv und konventionell erwärmter Bauteile festgestellt werden. Eine Erwärmung auf 950°C konnte mittels Induktion innerhalb von 16 s realisiert werden. Untersuchungen zur partiellen Erwärmung bestätigten die Simulationsergebnisse und zeigten, dass eine globale Einstellung der Bauteileigenschaften durch mehrere Induktoren prinzipiell möglich ist. Der in diesen Untersuchungen eingesetzte Aufbau aus Induktor und Umrichter war aufgrund der Leistung nicht für die Fertigung größerer Bauteile geeignet. Eine Erhöhung der Leistung, z. B. durch den Einsatz eines Systems aus mehreren Umrichtern, ist aber denkbar und ermöglicht einerseits die Erwärmung größerer Bauteile bei gleichbleibenden Aufheizzeiten und andererseits die partielle Erwärmung des Bauteils durch einen Multi-Induktor-Aufbau. Selbst bei einem Aufbau aus mehreren Umrichtern ist der benötigte Platzbedarf der Anlage gering. Der Platzbedarf für eine Anlage, welche die Fertigung einer kompletten B-Säule erlaubt, beträgt ca. 8 m<sup>2</sup>, wenn der Umrichterschrank über bzw. unter der Induktionseinheit positioniert wird.

Aufgrund der guten erreichten Bauteileigenschaften, der kurzen Aufheizzeiten, die eine Erwärmung im Pressentakt ermöglichen, und des geringen Platzbedarfs, stellt die induktive Erwärmung im Längsfeld daher eine realistische Alternative zur konventionellen Erwärmung im Rollenherdofen dar.

FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

Januar 2021

## Abstract

The aim of the project was to develop an inductive process for the flexible heating of near-series real components for the press hardening process. In the first work step, the typical component geometries of the blanks of press-hardened components were therefore provided by the committee accompanying the project. These were classified and categorised by the research centres. The resulting component catalogue served on the one hand as the basis for selecting the demonstrator component to be manufactured and on the other hand provided the boundary conditions for the simulation and design of the induction process. A B-pillar was chosen as a representative component to produce the demonstrator component. Due to the low power of the inverter provided in the project, it was decided to limit the investigations to the head of the B-pillar.

During the development of the induction process, different induction concepts were initially investigated and evaluated. The inductive single part heating in the longitudinal field was selected as the most promising concept for the project. In the following, various simulations were carried out on the influence of the previously determined component geometries as well as the inductor geometry, which were also validated by means of experimental investigations. The results were used to optimise the induction process and to simulatively investigate the heating of the demonstrator component. It has been shown that temperature deviations of  $\pm 4\%$ , depending on the geometry, are to be expected for near-series real components. However, within these limits, the inductor is also independent of the component geometry, if a sufficiently large distance of the component to the windings of the inductor is maintained. Simulative investigations on partial heating showed that targeted temperature differences on a global level can be realised very well by several inductors of different geometry or with different control.

For experimental investigations to determine the process window of inductive heating, a laboratory-scale test rig was set up based on the results from the simulation. A test programme with different temperatures, heating rates and holding times was set up and carried out to determine the influence of the process parameters on the mechanical as well as microstructure and coating properties. The boron-manganese steels 22MnB5 with coatings of aluminium-silicon (pre-diffused) and nano-coated as well as 20MnB8 with a zinc coating were investigated. For all selected test parameters, the mechanical properties were comparable to those of the conventional process. The coatings also showed a similar formation for inductively and oven-heated samples. Slight deviations in the coating structure did not result in a negative influence on the coating properties. This means, on the one hand, that inductive heating with high heating rates and without additional holding times is possible, and on the other hand, that a potential temperature deviation of  $\pm 4\%$ , as determined in the simulative process design, does not have to lead to inhomogeneous component properties.

Based on the simulation results and the investigations of the process window determination, a plant for the production of the specified demonstrator component was then set up at a project partner. Components from induction heating and the furnace process were

formed and hardened. A check of the homogeneity during heating showed that there was a temperature difference of about 30 K over the component. The investigation of the mechanical properties and the coating formation confirmed the results from the process window determination. Homogeneous component and coating properties could be achieved with the help of inductive heating. Furthermore, no significant differences in the properties of inductively and conventionally heated components could be determined. Heating up to 950°C could be realised within 16 s by means of induction. Investigations on partial heating confirmed the simulation results and showed that a global adjustment of the component properties by several inductors is possible in principle.

The setup of inductor and converter used in these investigations was not suitable to produce larger components due to the power. However, an increase in power, e.g., by using a system of several inverters, is conceivable and enables, on the one hand, the heating of larger components with constant heating times and, on the other hand, the partial heating of the component by a multi-inductor set-up. Even with a multi-inductor setup, the space required for the system is small. The space requirement for a system that allows the production of a complete B-pillar is approx. 8 m<sup>2</sup> if the inverter cabinet is positioned above or below the induction unit.

Due to the good component properties achieved, the short heating times, which allow heating in the press cycle, and the low space requirement, induction heating in the longitudinal field therefore represents a realistic alternative to conventional heating in the roller hearth furnace.

FOSTA - Research Association for Steel Application

January 2021

## Inhaltsverzeichnis Content

1	Einleitung   Introduction .....	1
1.1	Problemstellung   Problem definition .....	1
1.2	Motivation   Motivation .....	2
1.3	Zielsetzung   Objective .....	3
2	Stand der Technik   State of the art .....	5
2.1	Grundlagen des Presshärtens   Basics of hot sheet metal forming .....	5
2.1.1	Einordnung des Presshärtens   Classification of hot sheet metal forming .....	5
2.1.2	Presshärteprozess   Hot sheet metal forming process .....	7
2.1.3	Platinenwerkstoffe und Zunderschutzsysteme   Sheet materials and scale protection systems .....	10
2.2	Grundlagen der Induktion   Basics of induction .....	16
3	Spezifikations- und Klassifikationsphase   Specification and classification phase .....	22
3.1	Analyse des Bauteilspektrums   Breakdown of component spectrum .....	22
3.2	Auswahl des Demonstratorbauteils   Selection of a sample component .....	23
4	Entwicklung des induktiven Erwärmungsprozesses   Development of the inductive heating process .....	25
4.1	Konzeptentwicklung von Induktionsstrategien   Conceptual design of induction strategies .....	25
4.1.1	Induktionsstrategien   Induction strategies .....	25
4.1.2	Bewertung der Konzepte   Evaluation of concepts .....	26
4.1.3	Gradierte Temperaturprofile   Graded temperature profiles .....	26
4.1.4	Abschätzung des Leistungsbedarfs   Estimation of power requirements .....	28
4.2	Erstellung von angepassten und effizienten Simulationsmodellen   Creation of adapted and efficient simulations .....	29
4.3	Voruntersuchung verschiedener Effekte   Preliminary investigation on various effects .....	31
4.3.1	Kanten und Endeffekte   Edges and end effects .....	31
4.3.2	Variation der Blechlänge   Variation of sheet length .....	32
4.3.3	Horizontaler Koppelspalt   Horizontal air gap .....	33
4.3.4	Vertikaler Koppelspalt   Vertical air gap .....	34
4.3.5	Löcher und Aussparungen   Holes and block outs .....	35



4.3.6	Gradierte Temperaturprofile   Graded temperature profiles.....	41
4.3.7	Elektrischer Wirkungsgrad   Electrical efficiency.....	45
4.4	Optimierte Auslegung des Erwärmungsprozesses   Optimized design of the inductive heating process .....	46
4.5	Erstellen von Konstruktionsrichtlinien   Determination by geometry measurements .....	48
5	Validierung der Simulationsergebnisse   Validation of simulation .....	52
6	Prozessfensterbestimmung   Process window identification .....	59
6.1	Versuchsaufbau und –durchführung   Experimental set-up and procedure ...	59
6.1.1	Versuchsaufbau   Experimental setup .....	59
6.1.2	Untersuchte Materialien   Reviewed materials.....	61
6.1.3	Versuchsdurchführung   Testing procedure.....	62
6.2	Ergebnisse der experimentellen Versuche   Results of the experimental investigation.....	66
6.2.1	Mechanische Eigenschaften   Mechanical properties .....	66
6.2.2	Gefüge- und Beschichtungsausbildung   Material and coating texture	72
6.2.3	Beschichtungseigenschaften   Coating properties .....	77
6.3	Zusammenfassung der Prozessfensterbestimmung   Summary of the process window investigations .....	80
7	Demonstratorherstellung und Test   Sample component production and testing.....	82
7.1	Versuchsaufbau und -durchführung   Experimental set-up and procedure ....	83
7.1.1	Versuchsaufbau und untersuchte Materialien   Experimental setup and reviewed materials.....	83
7.1.2	Versuchsdurchführung   Testing procedure.....	85
7.2	Ergebnisse der experimentellen Versuche   Results of the experimental investigation.....	86
7.2.1	Überprüfung der Homogenität   Examination of homogeneity .....	87
7.2.2	Mechanische Eigenschaften   Mechanical properties .....	89
7.2.3	Beschichtungsausbildung   Coating texture .....	93
7.2.4	Partielle Erwärmung   Partial heating.....	95
7.3	Zusammenfassung der Demonstratorherstellung   Summary of the sample component production .....	96
8	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung   Economic efficiency analysis .....	98
9	Zusammenfassung   Summary .....	99
10	Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen   List of publications related to the project.....	101

11	Ergebnistransfer in die Wirtschaft   Transfer to economy.....	103
12	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts   Estimation of the feasibility of the suggested transfer concept.....	108
13	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten   Presentation of the scientific-technological and economical benefits of the results achieved especially for SME, innovative contribution, and possibilities for application in industry.....	109
14	Literaturverzeichnis   Bibliography .....	111
15	Danksagung   Acknowledgement .....	117

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Einordnung der Fertigungsverfahren nach DIN EN ISO 8580 [DIN8580] .....	6
Abbildung 2-2: Schematischer Ablauf des direkten und indirekten Presshärteprozesses .....	7
Abbildung 2-3: Schematischer Temperatur-Zeit-Verlauf eines Presshärtevorgangs in Anlehnung an Läßle und Bargel [Läß14][Bar12] .....	8
Abbildung 2-4: Eisen-Kohlenstoff Phasendiagramm [Bar12] .....	9
Abbildung 2-5: Schichtaufbau der AlSi-Beschichtung nach Fan und De Cooman [Fan12] .....	12
Abbildung 2-6: Schichtaufbau der Zink-Beschichtung nach Fan und De Cooman [Fan12] .....	14
Abbildung 2-7: Schichtaufbau des nano-Zunderschutzes nach Goedicke et al. [Goe08] .....	16
Abbildung 2-8: (a) Prinzip der induktiven Erwärmung anhand eines Metallzylinders [Fas91] (b) Induktive Erwärmung eines Rohres [Fas91] .....	18
Abbildung 2-9: (a) Prinzipielle Stromdichteverteilung in einem Metallzylinder [Fas91] (b) Elektrischer Wirkungsgrad einer zylindrischen Anordnung [Fas91] .....	18
Abbildung 2-10: (a) Induktive Längsfelderwärmung (b) Induktive Quersfelderwärmung .....	19
Abbildung 2-11: Aufbau der Erwärmungsanlage [Vib16-1] .....	21
Abbildung 3-1: Klassifizierung des Bauteilspektrums .....	22
Abbildung 3-2: Bauteilspektrums [Neu09] .....	23
Abbildung 3-3: (a) Presswerkzeug und (b) B-Säule [Kir16] .....	24
Abbildung 4-1: (a) Prinzip gradierter Temperaturverteilung (b) Gradierte Temperaturverteilung am Beispiel einer B-Säule .....	27
Abbildung 4-2: (a) Mit Magnetfeldkonzentratoren, (b) Unterschiedlicher Koppelabstand .....	27
Abbildung 4-3: (a) Vergrößerung des Windungsabstands, (b) Zwei unterschiedliche elektrische Spannungen .....	28
Abbildung 4-4: Ablauf der elektromagnetisch thermisch gekoppelte numerischen Berechnung .....	29
Abbildung 4-5: Numerisches Modell für das Demonstratorbauteil .....	31
Abbildung 4-6: Auswertungsschema .....	32
Abbildung 4-7: (a) Temperatur in der Blechmitte, (b) Temperatur am Blechende .....	32
Abbildung 4-8: (a) Temperatur in der Blechmitte, (b) Temperatur an der Blechkante .....	33
Abbildung 4-9: (a) Temperatur in der Blechmitte, (b) Temperatur am Blechende .....	33
Abbildung 4-10: (a) Temperatur in der Blechmitte, (b) Temperatur an der Blechkante .....	34
Abbildung 4-11: (a) Temperatur in der Blechmitte, (b) Temperatur am Blechende ...	34
Abbildung 4-12: (a) Temperatur in der Blechmitte, (b) Temperatur an der Blechkante .....	35

Abbildung 4-13: (a) Darstellung der Problematik aus elektrischer Sicht, (b) Mögliche Erklärung.....	35
Abbildung 4-14: (a) Numerisches Modell, (b) Modellparameter .....	36
Abbildung 4-15: Konturdarstellung verschiedener physikalischer Größen an einem Loch .....	37
Abbildung 4-16: Vektorielle Darstellung der Stromdichte .....	38
Abbildung 4-17: (a) Temperaturverteilung in x-Richtung (96x16 mm, r=8 mm), (b) Temperaturverteilung in z-Richtung .....	38
Abbildung 4-18: (a) Temperaturverteilung in x-Richtung (10x24 mm, r=2,4 mm), (b) Temperaturverteilung in z-Richtung .....	39
Abbildung 4-19: (a) Temperaturverteilung in x-Richtung (36x108 mm), (b) Temperaturverteilung in z-Richtung .....	39
Abbildung 4-20: (a) Temperaturverteilung in x-Richtung (r=24 mm, r=8 mm), (b) Temperaturverteilung in z-Richtung .....	40
Abbildung 4-21: (a) Temperaturverteilung in x-Richtung, (b) Temperaturverteilung in z-Richtung.....	41
Abbildung 4-22: (a) Temperaturverteilung in x-Richtung, (b) Temperaturverteilung in z-Richtung.....	41
Abbildung 4-23: Darstellung der gradierten Temperaturverteilung, links der Bereich mit Feldführungselementen.....	42
Abbildung 4-24: (a) Temperaturprofil bei unterschiedlichem Koppelspalt, (b) Skizze des Modells.....	42
Abbildung 4-25: (a) Temperaturprofil bei unterschiedlicher elektrischer Spannung, (b) Skizze des Modells .....	43
Abbildung 4-26: (a) Leistungsdichterverteilung; t=0,4s; U <sub>1</sub> =580 V; U <sub>2</sub> =280V, (b) Temperaturverteilung; t=0,4s; U <sub>1</sub> =580 V; U <sub>2</sub> =280V .....	44
Abbildung 4-27: (a) Leistungsdichterverteilung; t=20 s; U <sub>1</sub> =580 V; U <sub>2</sub> =280V (b) Temperaturverteilung; t=0,4s; U <sub>1</sub> =580 V; U <sub>2</sub> =280V .....	44
Abbildung 4-28: Optimierung der Induktorbreite.....	47
Abbildung 4-29: (a) Leistungsdichterverteilung, 400 kHz, 600 V, (b) Temperaturverteilung .....	47
Abbildung 4-30: Gemessene Temperaturkurve mit Thermoelementen .....	50
Abbildung 5-1: Versuchsanlage für die Verifikation im Durchlauf.....	53
Abbildung 5-2: Vergleich der experimentell ermittelten Ergebnisse mit den numerisch berechneten Ergebnissen .....	54
Abbildung 5-3: (a) CAD-Zeichnung des Versuchsaufbau (b) Versuchsstand.....	54
Abbildung 5-4: Verzug des erwärmten Blechs aufgrund von Zugkräften .....	55
Abbildung 5-5: Experimentelle und numerisch ermittelte Temperaturverteilung .....	56
Abbildung 5-6: (a) Temperaturverteilung parallel zum Stromfluss (b) Temperaturverteilung senkrecht zum Stromfluss .....	56
Abbildung 5-7: Schweißpunkte der Thermoelemente .....	57
Abbildung 5-8: Vergleich der numerischen Berechnung mit den experimentellen Messdaten .....	58
Abbildung 6-1: Aufbau Versuchsstand zur Prozessfensterbestimmung .....	60
Abbildung 6-2: Schichtaufbau (a) AlSi-Lack nach Vordiffusion (REM) und (b) nach Aushärten (REM) .....	61

Abbildung 6-3: Versuchsparameter induktive Erwärmung Prozessfensterbestimmung .....	62
Abbildung 6-4: Temperaturkurven 22MnB5+AlSi mit (a) unterschiedlichen Zieltemperaturen bei 100% Leistung und (b) Zieltemperatur 900°C bei unterschiedlichen Leistungen .....	64
Abbildung 6-5: Temperaturverteilung Probe Prozessfensterbestimmung in (a) Querrichtung und (b) Längsrichtung .....	64
Abbildung 6-6: Temperaturkurven der Referenzproben aus 22MnB5 und 20MnB8 ..	65
Abbildung 6-7: Spannungs-Dehnungs-Kurven für (a) 22MnB5 und (b) 20MnB8 .....	66
Abbildung 6-8: Mittelwerte der Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Prozessparameter für (a) 22MnB5 und (b) 20MnB8 .....	67
Abbildung 6-9: Mittelwerte der Härte in Abhängigkeit der Prozessparameter für (a) 22MnB5 und (b) 20MnB8 .....	68
Abbildung 6-10: Mittelwerte des Biegewinkels für 22MnB5+AlSi in Abhängigkeit der Prozessparameter .....	69
Abbildung 6-11: Mittelwerte des Biegewinkels für 20MnB8+ZnFe in Abhängigkeit der Prozessparameter .....	70
Abbildung 6-12: Mittelwerte des Biegewinkels für 22MnB5+nano in Abhängigkeit der Prozessparameter .....	70
Abbildung 6-13: 22MnB5 ZTA-Diagramm nach Guk et al. mit induktiven Temperaturkurven [Guk17].....	71
Abbildung 6-14: Gefüge von 22MnB5 nach induktiver Erwärmung mit 100% Leistung, 0 s Haltezeit und (a) 850°C, (b) 900°C, (c) 950°C, (d) 1000°C, (e) 1050°C .....	73
Abbildung 6-15: Gefüge von 22MnB5 nach induktiver Erwärmung mit (a) 900°C und 0 s Haltezeit, (b) 900°C und 20 s Haltezeit, (c) 950°C und 0 s Haltezeit, (d) 950°C und 20 s Haltezeit.....	73
Abbildung 6-16: Gefüge der Al-Si-Beschichtung nach induktiver Erwärmung und Presshärten: (a) 950°C, 10 s Haltezeit, 85% Leistung (REM); (b) 850°C, 10 s Haltezeit, 100% Leistung; (c) 950°C, 10 s Haltezeit, 100% Leistung; (d) 950°C, 0 s Haltezeit, 100% Leistung .....	74
Abbildung 6-17: Gefüge der Fe-Zn-Beschichtung: (a) 850°C, 0 s Haltezeit, 92% Leistung (REM); (b) 850°C, 0 s Haltezeit, 100% Leistung; (c) 850°C, 10 s Haltezeit, 100% Leistung; (d) 920°C, 0 s Haltezeit, 100% Leistung .....	75
Abbildung 6-18: Gefüge der nano-Beschichtung nach Ätzung: (a) Erwärmung im Ofen, (b) induktive Erwärmung .....	76
Abbildung 6-19: Durchgangswiderstand induktiv und konventionell erwärmter Proben: (a) 22MnB5+AlSi, (b) 20MnB8+ZnFe (gestrahlt) .....	78
Abbildung 6-20: Ergebnisse der linearen Voltametrie Untersuchung: (a) 22MnB5+AlSi, (b) 20MnB8+ZnFe.....	79
Abbildung 7-1: (a) Versuchsaufbau der Induktionseinheit und (b) Bauteil der Demonstratorerstellung .....	83
Abbildung 7-2: Abmessungen der Versuchsanlage und einer Anlage zur Herstellung größerer Bauteile.....	84
Abbildung 7-3: Temperaturkurven der Referenzproben des Demonstratorbauteils für (a) 22MnB5 und (b) 20MnB8 .....	85

Abbildung 7-4: Temperaturkurven der induktiven Erwärmung des Demonstratorbauteils für (a) 22MnB5 und (b) 20MnB8.....	86
Abbildung 7-6: Homogenität der Temperaturverteilung bei induktiver Erwärmung: (a) Thermoelementmessung, (b) Aufnahme Thermographie-Kamera.....	87
Abbildung 7-7: Temperaturverteilung entlang kritischen Geometrien anhand unterschiedlicher Muster (a, b).....	88
Abbildung 7-8: Homogenität der aktiven Abkühlung von 20MnB8+ZF-Proben .....	88
Abbildung 7-9: Prüfkörperentnahme Demonstratorbauteil: (a) Übersicht, (b) Aufteilung Härtemessung.....	89
Abbildung 7-10: Zugversuche Demonstrator induktiv und konventionell.....	90
Abbildung 7-11: Mittelwerte Zugfestigkeit und Bruchdehnung Demonstrator induktiv und konventionell .....	91
Abbildung 7-12: Ergebnis Härtemessung Demonstrator induktiv und konventionell: 22MnB5+AlSi Bereich 1 .....	92
Abbildung 7-13: Ergebnis Härtemessung Demonstrator induktiv und konventionell: 22MnB5+AlSi Bereich 2 .....	92
Abbildung 7-14: Ausbildung Beschichtung Demonstrator 22MnB5+AlSi: (a) Vergleich Fertigungsverfahren, (b) Bereiche mit hoher Belastung.....	94
Abbildung 7-15: Ausbildung Beschichtung Demonstrator 22MnB5+nano: (a) Vergleich Fertigungsverfahren, (b) Bereiche mit hoher Belastung.....	94
Abbildung 7-16: Ausbildung Beschichtung Demonstrator 20MnB8+ZF: (a) Vergleich Fertigungsverfahren, (b) Bereiche mit hoher Belastung, (c) Überprüfung LMIE (EDX) .....	95
Abbildung 7-18: Partielle induktive Erwärmung: (a) Thermographie Aufnahme, (b) Härteverlauf im Übergangsbereich.....	96

## List of figures

Figure 2-1: Classification of manufacturing methods according to DIN EN ISO 8580 [DIN8580] .....	6
Figure 2-2: Schematic sequence of direct and indirect hot sheet metal forming.....	7
Figure 2-3: Schematic temperature-time curve of a hot sheet metal forming process inspired by Laple and Bargel [Lap14][Bar12].....	8
Figure 2-4: Iron-carbon phase diagram [Bar12].....	9
Figure 2-5: AlSi-coating layer composition according to Fan and De Cooman [Fan12] .....	12
Figure 2-6: Zn-coating layer composition according to Fan and De Cooman [Fan12]14	
Figure 2-7: nano scale protection layer composition according to Goedicke et al. [Goe08].....	16
Figure 2-8: (a) Principle of induction heating [Fas91] (b) Inductive heating of a tube [Fas91] .....	18
Figure 2-9: (a) Current density distribution [Fas91] (b) Electrical efficiency of a cylindrical induction coil with workpiece [Fas91].....	18
Figure 2-10: (a) Longitudinal flux induction heating (b) Transverse flux induction heating.....	19
Figure 2-11: Construction of induction heating system [Vib16-1].....	21
Figure 3-1: Classification of component spectrum .....	22
Figure 3-2: Component spectrum [Neu09].....	23
Figure 3-3: (a) Press tool and (b) B-pillar [Kir16] .....	24
Figure 4-1: (a) Principle of graded temperature distribution (b) Graded temperature of a B-pillar .....	27
Figure 4-2: (a) With magnetic flux concentrators, (b) Different air gap .....	27
Figure 4-3: (a) Enlargement of the distance of the windings, (b) Two different voltages .....	28
Figure 4-4: calculation procedure of the electromagnetic thermal coupled numerical calculation .....	29
Figure 4-5: Numerical model of the demonstrator component.....	31
Figure 4-6: Pattern of evaluation .....	32
Figure 4-7: (a) Temperature in middle of the sheet, (b) Temperature at the end of the sheet.....	32
Figure 4-8: (a) Temperature in middle of the sheet, (b) Temperature at the edge of the sheet.....	33
Figure 4-9: (a) Temperature in middle of the sheet, (b) Temperature at the end of the sheet.....	33
Figure 4-10: (a) Temperature in middle of the sheet, (b) Temperature at the edge of the sheet.....	34
Figure 4-11: (a) Temperature in middle of the sheet, (b) Temperature at the end of the sheet.....	34
Figure 4-12: (a) Temperature in middle of the sheet, (b) Temperature at the edge of the sheet.....	35
Figure 4-13: (a) Problem from an electrical point of view, (b) Possible explanation ..	35

Figure 4-14: (a) Numerical model, (b) Parameter of the model .....	36
Figure 4-15: Contour plot of physical values on a hole .....	37
Figure 4-16: Vector plot of current density .....	38
Figure 4-17: (a) Temperature profile in x-direction, (b) Temperature profile in z- direction .....	38
Figure 4-18: (a) Temperature profile in x-direction, (b) Temperature profile in z- direction .....	39
Figure 4-19: (a) Temperature profile in x-direction, (b) Temperature profile in z- direction .....	39
Figure 4-20: (a) Temperature profile in x-direction, (b) Temperature profile in z- direction .....	40
Figure 4-21: (a) Temperature profile in x-direction, (b) Temperature profile in z- direction .....	41
Figure 4-22: (a) Temperature profile in x-direction, (b) Temperature profile in z- direction .....	41
Figure 4-23: Graded temperature distribution, left with magnetic flux concentrators..	42
Figure 4-24: (a) Temperature profile with different air gap, (b) Sketch of the model ..	42
Figure 4-25: (a) Temperature profile with different voltage, (b) Sketch of the model..	43
Figure 4-26: (a) Power density distribution, t=0,4 s, (b) Temperature distribution, t=0,4 s .....	44
Figure 4-27: (a) Power density distribution, t=20 s (b) Temperature distribution, t=0,4 s .....	44
Figure 4-28: Optimization of the width of the inductor coil.....	47
Figure 4-29: (a) Power density distribution, (b) Temperature distribution.....	47
Figure 4-30: Measured temperature curve with thermocouples .....	50
Figure 5-1: Test facility for in-line verification .....	53
Figure 5-2: Comparison of the experimentally determined results with the numerical calculated results .....	54
Figure 5-3: (a) CAD drawing (b) Experimental equipment.....	54
Figure 5-4: Warping of the heated sheet due to tensile forces .....	55
Figure 5-5: Experimental and numerical determined temperature profile.....	56
Figure 5-6: (a) Temperature distribution parallel to the current flow (b) Temperature distribution perpendicular to the current flow.....	56
Figure 5-7: Welding points of the thermocouples .....	57
Figure 5-8: Comparison of numerical and experimental results .....	58
Figure 6-1: Experimental setup process window identification .....	60
Figure 6-2: Coating structure (a) AISi-Coating after pre-diffusion (SEM) and (b) after thermal curing (SEM) .....	61
Figure 6-3: Testing parameters inductive heating process window identification .....	62
Figure 6-4: Temperature curves of 22MnB5+AlSi with (a) varying target temperatures at 100% power and (b) target temperature 900°C at different power percentages .....	64
Figure 6-5: Temperature distribution process window identification sample in (a) transversal and (b) lateral direction.....	64
Figure 6-6: Temperature curves of 22MnB5 and 20MnB8 reference samples .....	65
Figure 6-7: Stress-strain-curves of (a) 22MnB5 and (b) 20MnB8.....	66



Figure 6-8: Average tensile strength values in dependence on process parameters of (a) 22MnB5 and (b) 20MnB8 .....	67
Figure 6-9: Average hardness values in dependence on process parameters of (a) 22MnB5 and (b) 20MnB8 .....	68
Figure 6-10: Average bending angle values of 22MnB5+AlSi in dependence on process parameters.....	69
Figure 6-11: Average bending angle values of 20MnB8+ZnFe in dependence on process parameters.....	70
Figure 6-12: Average bending angle values of 22MnB5+nano in dependence on process parameters.....	70
Figure 6-13: 22MnB5 TTA-diagram according to Guk et al. with inductive temperature curves [Guk17] .....	71
Figure 6-14: Microstructure of 22MnB5 after inductive heating with 100% power, 0 s dwell time and (a) 850°C, (b) 900°C, (c) 950°C, (d) 1000°C, (e) 1050°C .....	73
Figure 6-15: Microstructure of 22MnB5 after inductive heating at (a) 900°C and 0 s dwell time, (b) 900°C and 20 s dwell time, (c) 950°C and 0 s dwell time, (d) 950°C und 20 s dwell time.....	73
Figure 6-16: Microstructure of Al-Si-Coating after inductive heating and press hardening: (a) 950°C, 10 s dwell time, 85% power (SEM); (b) 850°C, 10 s dwell time, 100% power; (c) 950°C, 10 s dwell time, 100% power; (d) 950°C, 0 s dwell time, 100% power.....	74
Figure 6-17: Microstructure of Zn-Fe-Coating: (a) 850°C, 0 s dwell time, 92% power (SEM); (b) 850°C, 0 s dwell time, 100% power; (c) 850°C, 10 s dwell time, 92% power; (d) 920°C, 0 s dwell time, 100% power.....	75
Figure 6-18: Microstructure of nano-coating after etching: (a) furnace heating, (b) inductive heating.....	76
Figure 6-19: Transition resistance of inductive and conventional samples: (a) 22MnB5+AlSi, (b) 20MnB8+ZnFe (blasted).....	78
Figure 6-20: Results of linear sweep voltammetry: (a) 22MnB5+AlSi, (b) 20MnB8+ZnFe.....	79
Figure 7-1: (a) Experimental setup of the induction unit and (b) component of sample part production.....	83
Figure 7-2: Dimensions of the experimental setup and a process layout for the production of bigger parts.....	84
Figure 7-3: Temperature curve for reference parts of sample component production for (a) 22MnB5 and (b) 20MnB8 .....	85
Figure 7-4: Temperature curves for inductive heated of the sample component for (a) 22MnB5 and (b) 20MnB8 .....	86
Figure 7-6: Homogeneity of temperature distribution during inductive heating: (a) Thermocouple measurement, (b) recording thermal imaging camera .....	87
Figure 7-7: Temperature distribution along critical geometries by means of different patterns (a, b) .....	88
Figure 7-8: Homogeneity of active cooling of 20MnB8+ZF samples.....	88
Figure 7-9: Specimen extraction sample component: (a) Overview, (b) partition hardness measurement.....	89
Figure 7-10: Tensile strength tests sample component inductive and conventional ..	90

Figure 7-11: Average values tensile strength and elongation at fracture sample component inductive and conventional .....	91
Figure 7-12: Results hardness measurement sample component inductive and conventional: 22MnB5+AlSi Area 1.....	92
Figure 7-13: Results hardness measurement sample component inductive and conventional: 22MnB5+AlSi Area 2.....	92
Figure 7-14: Coating development sample component 22MnB5+AlSi: (a) Comparison of different production processes, (b) areas of high strain .....	94
Figure 7-15: Coating development sample component 22MnB5+nano: (a) Comparison of different production processes, (b) areas of high strain .....	94
Figure 7-16: Coating development sample component 20MnB8+ZF: (a) Comparison of different production processes, (b) areas of high strain. (c) examination of LMIE (EDS).....	95
Figure 7-18: Partial inductive heating: (a) Thermographic recording, (b) hardness development over transition zone .....	96

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Chemische Zusammensetzung von 22MnB5 [Sal19][Arc16][Thy19] .....	11
Tabelle 2-2: Fe-Zn Phasen nach Marder [Mar00] .....	13
Tabelle 2-3: Chemische Zusammensetzung von 20MnB8 [Voe18-2] .....	15
Tabelle 4-1: Einfluss verschiedener Parameter auf den elektrischen Wirkungsgrad .	46
Tabelle 4-2: Berechnung der Energie für die Erwärmung des Demonstratorbauteil ..	51
Tabelle 4-3: Berechnung des Gesamtwirkungsgrad für das Demonstratorbauteil .....	51
Tabelle 6-1: Versuchsplan Prozessfensterbestimmung .....	63
Tabelle 6-2: Chemische Zusammensetzung Al-Si-Beschichtung nach induktiver Erwärmung auf 950°C mit 10 s Haltezeit und 85% Leistung und Presshärten ...	75
Tabelle 6-3: Chemische Zusammensetzung Zn-Fe-Beschichtung nach induktiver Erwärmung auf 850°C mit 0 s Haltezeit und 92% Leistung .....	76
Tabelle 6-4: Durchgangswiderstand unbehandelter 20MnB8+ZnFe Proben nach induktiver Erwärmung .....	78
Tabelle 7-1: Mittlere Härte HV5 induktiv und konventionell pro Bereich und Beschichtung .....	93

## List of tables

Table 2-1: Chemical composition of 22MnB5 [Sal19][Arc16][Thy19] .....	11
Table 2-2: Fe-Zn phases according to Marder [Mar00] .....	13
Table 2-3: Chemical composition of 20MnB8 [Voe18-2] .....	15
Table 4-1: Influence of various parameters on the electrical efficiency .....	46
Table 4-2: Calculation of the energy for heating of the demonstrator component .....	51
Table 4-3: Calculation of the overall efficiency for the demonstrator component .....	51
Table 6-1: Experimental Design process window identification .....	63
Table 6-2: Chemical composition of Al-Si coating after inductive heating to 950°C with 10 s dwell time and a power of 85% and press hardening .....	75
Table 6-3: Chemical composition of Zn-Fe coating after inductive heating to 850°C, with 0 s dwell time and a power of 92% and press hardening .....	76
Table 6-4: Transition resistance of untreated 20MnB8+ZnFe samples after inductive heating .....	78
Table 7-1: Average Hardness HV5 inductive and conventional for each area and coating .....	93

**Abkürzungsverzeichnis / Abbreviations and symbols**

%	Prozent
°	Grad
°C	Grad Celsius
µm	Mikrometer
AlSi/Al-Si	Aluminium-Silizium
arcsin	Arcussinusfunktion
arctan	Arcustangensfunktion
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cos	Kosinusfunktion
c <sub>p</sub>	Spezifische Wärmekapazität [J/kgK]
DIN	Deutsches Institut für Normung
DVS	Deutscher Verband für Schweißen
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
et al.	et alii / et aliae; und andere
etc.	et cetera
f	Frequenz
GA	galvannealed (galvanisiert und wärmebehandelt)
GI	galvanisiert
HV5	Härte nach Vickers bei einem Prüfgewicht von 5 pond
IR	infrarot
kfz	kubisch-flächenzentriert
krz	kubisch-raumzentriert
LMIE	Flüssigversprödung (eng. Liquid Metal Induced Embrittlement)
ln	Logarithmusfunktion
LSV	Lineare Voltametrie (eng. Linear Sweep Voltammetry)
m	Meter
min	Minute
m/min	Meter pro Minute
mm	Millimeter
mm/s	Millimeter pro Sekunde
MPa	Megapascal
N	Newton
Q	Energie
R <sub>e</sub>	Streckgrenze
R <sub>m</sub>	Zugfestigkeit

REM	Rasterelektronenmikroskop
s	Sekunde
$\Delta T$	Temperaturdifferenz [K]
tan	Tangensfunktion
u.a.	unter anderem
V	Volumen
VDA	Verband der Automobilindustrie
ZF/Zn-Fe	Zink-Eisen
ZTA	Zeit-Temperatur-Austenitisierungsdiagramm
ZTU	Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramm
$\delta$	Elektromagnetisches Eindringmaß [m]
$\kappa$	Spezifische elektrische Leitfähigkeit [S/m]
$\rho_d$	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\pi$	Kreiszahl
$\mu_0$	Magnetische Feldkonstante [N/A <sup>2</sup> ]
$\mu_r$	Permeabilitätszahl



# 1 Einleitung Introduction

## *Kurzfassung*

*Die induktive Erwärmung ist eine vielversprechende Alternative zum üblicherweise eingesetzten Rollenherdofen, welche dabei helfen kann die Aufheizzeit und den Platzbedarf bei der Erwärmung von Platinen zu verringern. Trotz vieler Vorteile bietet sie auch Herausforderungen vor allem in Bezug auf die homogene Erwärmung von Bauteilen. Ziel des Projektes ist es daher ein seriennahes Bauteil mit homogenen Eigenschaften, vergleichbar mit dem Ofenprozess, mittels Induktion zu fertigen.*

## *Abstract*

*Inductive heating is a promising alternative to the typically used roller hearth furnaces, which can be used to reduce heating times and space requirements for the heating of sheet metal. Despite many advantages, inductive heating also provides new challenges especially in regard to homogeneous heating of parts. Therefore, this project aims at the fabrication of a close to series production part with homogeneous properties, comparable to the furnace process, by means of induction heating.*

## 1.1 Problemstellung Problem definition

Presshärtbare Stähle werden seit Mitte der 80er Jahre zur Herstellung hochfester Strukturbauteile im Automobilen Leichtbau verwendet [Ber08]. Seitdem spielen sie eine wichtige Rolle bei der Einhaltung immer strenger werdender Sicherheitsvorschriften und Klimaziele. Die Anzahl der gefertigten Bauteile pro Jahr steigt seit der Einführung des Verfahrens stetig an. Während im Jahr 1987 noch 3 Millionen Teile pro Jahr gefertigt wurden, wird die Anzahl der gefertigten Teile im Jahr 2017 auf bereits 300 Millionen geschätzt [Kar10][Pal17]. Moderne Automobilkarosserien weisen einen Anteil pressgehärteter Bauteile an der Gesamtmasse des BIW von bis zu 40% auf [Sjö18]. Dies verdeutlicht die Relevanz des Verfahrens für die Automobilindustrie.

Im industriellen Presshärteprozess erfolgt die Erwärmung der Platinen üblicherweise in einem Durchlaufofen, wie z.B. dem Rollenherdofen. Aufgrund der Wärmeübertragung im Ofen in Form von Strahlung und Konvektion werden Aufheizzeiten von bis zu 5 Minuten benötigt, um die Platinen auf eine Temperatur von 950°C zu erwärmen [Kar10][Kol11]. Damit genügend Platinen zur Einhaltung des Pressentaktes zur Verfügung stehen, müssen die Öfen entsprechend lang ausgelegt werden [Kol11][Mor17]. Dies führt dazu, dass typische Ofenlängen von mehr als 40m erreicht werden [Kol11]. Motiviert durch die Reduktion der Kosten pro gefertigten Bauteil, wird stetig versucht die Taktzeiten des Presshärteprozesses weiter zu reduzieren. Dies führt im Gegenzug zu einer Erhöhung des benötigten Ofendurchsatzes und damit zu immer länger werdenden Rollenherdöfen [Kol11][Mor17].



Alternative Erwärmungsmethoden, wie z.B. die induktive oder die konduktive Erwärmung, können helfen den benötigten Platzbedarf zu reduzieren und bieten zusätzlich weitere Vorteile, wie geringere Investitionskosten, eine höhere Prozessflexibilität sowie eine bessere Energieeffizienz.

## 1.2 Motivation Motivation

Die Induktion ermöglicht das Erwärmen mit hohen Heizraten. Sie findet bisher hauptsächlich beim Schmelzen, Schmieden und bei der Wärmebehandlung industrielle Anwendung [Mor17][Kol09]. In den letzten Jahren wurde aber auch vermehrt der Einsatz für die Erwärmung von Platinen im Warmformprozess untersucht [Kol09][Opi15][Trö14]. Dabei wurden unterschiedliche Induktionskonzepte erforscht. Kollek et al. verwendeten eine Kombination aus Längsfeldinduktor und Flächeninduktor zur Erwärmung von Platinen im Durchlauf [Kol09]. Die Erwärmung auf Curie-Temperatur erfolgte dabei über den Längsfeldinduktor. Der Flächeninduktor wurde verwendet, um die Platine oberhalb der Curie-Temperatur zu erwärmen. Es gelang ihnen Platinen mit einer Abmessung von 200x300x1,5 mm innerhalb von 35 s homogen auf 950°C zu erwärmen. In einem späteren Konzept wurde der Aufbau durch einen Ofen ergänzt, um ein Aufschmelzen und Abtragen der Aluminium-Silizium-Beschichtung durch die induktive Erwärmung zu vermeiden [Vei11-2]. Niewel und Tröster verwendeten zur Erwärmung einen Flächeninduktor, der relativ zur Platine bewegt wurde, um eine homogene Temperaturverteilung einzustellen [Trö14]. Es konnte eine homogene Erwärmung von Rechteckplatinen mit einer Abmessung von 300x210x1,5 mm auf 950°C innerhalb von 22 s erreicht werden. Es wurde ebenfalls beobachtet, dass der Einsatz eines Flächeninduktors zu Überhitzungen an Bohrungen und Langlöchern in der Platine führt. Opitz und Vibrans nutzten in ihrem Aufbau einen Längsfeldinduktor zur Vorerwärmung um die benötigte Ofenhaltedauer zu reduzieren [Opi15]. Es gelang ihnen dadurch die benötigte Erwärmungszeit auf 170 s zu halbieren. Es wurde außerdem festgestellt, dass der Einsatz eines Quersfeldinduktors zu einer inhomogenen Erwärmung unregelmäßiger Platinengeometrien führt.

Während diese Untersuchungen gezeigt haben, dass das homogene Aufheizen von Platinen mittels Induktion erreichbar ist, führen die gewählten Prozesse dazu, dass der Einsatz aus industrieller Sicht nicht sinnvoll ist bzw. das volle Potential der Induktionstechnik nicht ausgenutzt werden kann. Kollek et al. setzen in ihrem finalen Konzept auf einen vierstufigen Aufbau, was einerseits eine komplexe Anlagentechnik bedingt, andererseits aber sowohl die erreichbaren Aufheizzeiten als auch den Platzbedarf erhöht. Wie Opitz und Vibrans kombinieren sie die induktive Erwärmung mit der Erwärmung im Ofen. Durch die zusätzliche Ofenhaltedauer erhöht sich die Durchlaufzeit einer Platine und es ist nicht mehr möglich den Pressentakt zu halten. Daher müssen ähnlich wie im konventionellen Ofenprozess mehrere Platinen gleichzeitig im Ofen erwärmt werden. Dadurch erhöht sich der benötigte Platzbedarf und die Energieeffizienz nimmt ab, da Ofen und Induktor parallel betrieben werden müssen. Sowohl Niewel und Tröster als auch Kollek et al. setzen in ihrem Aufbau auf einen Flächeninduktor. Während dieser gute Heizraten über Curie-Temperatur ermöglicht, führt er auch zu inhomogener Erwärmung bei unregelmäßigen

Platinengeometrien. Dies macht ihn für den industriellen Einsatz ohne zusätzliche Homogenisierungsmaßnahmen, wie z.B. einen nachgeschalteten Ofen, unattraktiv.

Es wird daher nach einem Verfahren gesucht, welches es erlaubt das Potential der induktiven Erwärmung möglichst gut auszunutzen, indem es eine homogene induktive Erwärmung mit Hilfe eines einzelnen Induktors ermöglicht. Dabei soll die benötigte Aufheizzeit so gering sein, dass der Durchsatz aus einem Induktor reicht, um den Platinenbedarf einer Presse in der Taktzeit zu decken. Ein solcher Aufbau ermöglicht eine deutliche Reduzierung des Energie- und Platzbedarfes sowie der Investitionskosten gegenüber einer mehrteiligen Anlage.

### **1.3 Zielsetzung Objective**

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollen die erforderlichen Erkenntnisse generiert werden, um seriennahe Bauteile mittels einer induktiven Erwärmung im Presshärteprozess anforderungskonform herstellen zu können. Für dieses Projekt können drei wesentliche Ziele formuliert werden:

#### 1. Forschungsziel:

Mit Hilfe der induktiven Erwärmung soll ein reales bzw. seriennahes Warmformbauteil hergestellt werden. Hierfür ist der induktive Erwärmungsprozess auf die Anforderungen der Platine anzupassen. Dies beinhaltet auch die Berücksichtigung der Herstellung einer belastungsangepassten Struktur durch die gezielte Einstellung von Zonen mit unterschiedlichen Festigkeiten.

#### 2. Forschungsziel:

Da warmgeformte Bauteile eine große Bandbreite aufweisen (Blechdicke, geometrische Unstetigkeiten, generelle Abmessungen und Masse), muss der Flexibilisierungsgrad der induktiven Erwärmung hinsichtlich der Variantenvielfalt überprüft werden. Das wesentliche Ziel ist eine Richtlinie für die Prozessgestaltung der induktiven Erwärmung im Warmformprozess. Dies beinhaltet Vorschläge für die Auslegung von Induktoren und Erwärmungsprozessen, aber auch von Unstetigkeitsstellen in Bauteilen (äußere Form, Gestaltung Löcher, Aussparungen) selbst.

#### 3. Forschungsziel:

Ein überwiegender Anteil der Platinen im Warmformprozess wird mit einer Oberflächenbeschichtung eingesetzt. Zur Verwendungsmöglichkeit der Beschichtungen unter induktiver Erwärmung sollen Prozessparameter für die Beschichtungen (Aluminium-Silizium (vorlegiert), Zink-Eisen und nano-Beschichtung) bestimmt werden.

Um die Ziele zu erreichen, müssen in bisherigen Projekten gemachte Vereinfachungen aufgehoben werden. Gegenüber einfachen Rechteckformen werden daher in einem ersten Schritt reale Platinen mit entsprechend großen Querschnittsänderungen untersucht, anschließend werden Gradierungen, Löcher und Aussparungen sowie

Beschichtungen der Platinen berücksichtigt. Parallel werden die Grundlagen zur Simulation des Erwärmungsprozesses erarbeitet, um den Wirkungsgrad und die Gleichförmigkeit der Erwärmung zu optimieren.

Bei der Durchführung dieses Forschungsvorhabens ist eine deutliche Erweiterung des Wissenstandes zu erwarten. Dazu gehören:

- Durch die Erwärmung und Untersuchung eines Serienbauteils bzw. eines seriennahen Bauteils wird im Rahmen dieses Forschungsprojektes eine konkrete Anwendungsmöglichkeit der induktiven Erwärmung im Warmformprozess nachgewiesen.
- Die Simulation des Erwärmungsprozesses ermöglicht die Auslegung der Erwärmungsanlage für beliebige Geometrien.
- Bei der Verwendung der beschichteten Werkstoffe fehlen noch Aussagen über Prozessgrenzen bzgl. der Erwärmungszeiten, Haltezeiten und Maximaltemperaturen. Als Forschungsergebnis sind die Prozessparameter zu bestimmen, die den Einsatz der Beschichtungen im Warmformprozess mit induktiver Erwärmung ermöglichen.
- Für einen nachhaltigen Nutzen dieses Forschungsprojektes ist eine Richtlinie für die induktive Erwärmung im Warmformprozess zu erstellen. Diese beinhaltet Vorschläge für Induktorgeometrien und für die Prozessgestaltung, aber auch Hinweise für die induktionsgerechte Gestaltung von Platinen. Anhand der Richtlinie wird für den Anwender ersichtlich, wie der induktive Erwärmungsprozess in Abhängigkeit der zu erwärmenden Platine zu gestalten ist und inwieweit eine spezielle Anpassung des Erwärmungsprozesses an die jeweilige Platine zu erfolgen hat.
- Hinsichtlich der belastungsgerechten Gestaltung von Produkten ist ein Trend zur Herstellung von Bauteilen mit gradierten Eigenschaften ersichtlich, welche u. a. durch eine Teilaustenitisierung der Platine erreicht werden können. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist ein Teilziel die partielle induktive Erwärmung sowohl von tragenden Strukturanteilen wie auch von lokalen Funktionsbereichen (z.B. weicher Fügeflansch).
- Die gewonnenen Erkenntnisse des Forschungsvorhabens bezüglich der Prozessgestaltung und -auslegung werden abschließend in einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendet.

## 2 Stand der Technik State of the art

### *Kurzfassung*

*Die induktive Erwärmung ist seit Jahrzehnten fester Bestandteil der Industrie. Bei Erwärmungsprozess, die hohe Temperaturen benötigen und eine schneller Erwärmung erwünscht ist, bietet die Induktion Vorteile. Neben guter Steuerbarkeit, Flexibilität und der Erzeugung der Wärme direkt im Gut, ist eine sehr hohe Leistungsübertragung ausschlaggebend für hohe Heizraten.*

*In Hinblick auf die Erwärmung von Platinen für den Warmformprozess stellen die hohen erreichbaren Heizraten allerdings auch eine Herausforderung dar. Sowohl die Austenitisierung des Grundwerkstoffes als auch die Beschichtungsausbildung typischer Zunderschutzsysteme sind diffusionsgesteuert. Es ist daher denkbar, dass die kurzen Aufheizzeiten der induktiven Erwärmung einen Einfluss auf die Bauteileigenschaften nehmen.*

### *Abstract*

*Inductive heating has been an integral part of industry for decades. Induction offers advantages for heating processes that require high temperatures and fast heating. In addition to good controllability, flexibility and the generation of heat directly in the work piece, a very high power transfer is crucial for high heating rates.*

*Regarding heating of sheets for hot sheet metal forming high heating rates also pose a challenge. The austenitization of the base material as well as the coating formation of typical scale protection systems are diffusion dependent. Therefore, short heating times during inductive heating might influence the resulting part properties.*

## 2.1 Grundlagen des Presshärtens Basics of hot sheet metal forming

### 2.1.1 Einordnung des Presshärtens Classification of hot sheet metal forming

Nach DIN EN ISO 8580 ist das Presshärten als Verfahrenskombination aus den Hauptgruppen „Umformen“ und „Stoffeigenschaften ändern“ zu verstehen [DIN8580]. Die Unterteilung der Fertigungsverfahren in Hauptformgruppen ist in Abbildung 2-1 gezeigt. Innerhalb der Hauptgruppe „Umformen“ wird es dem „Tiefziehen“ zugeordnet, welches Teil der Gruppe „Zugdruckumformen“ ist und in DIN 8584-3 genauer behandelt wird [DIN8580]. In der Hauptgruppe „Stoffeigenschaften ändern“ fällt es unter die Kategorie „Härten“, die zur Gruppe „Wärmebehandeln“ gehört [DIN8580]. Die Methoden der Wärmebehandlung werden in DIN EN ISO 4885 betrachtet [DIN8580].

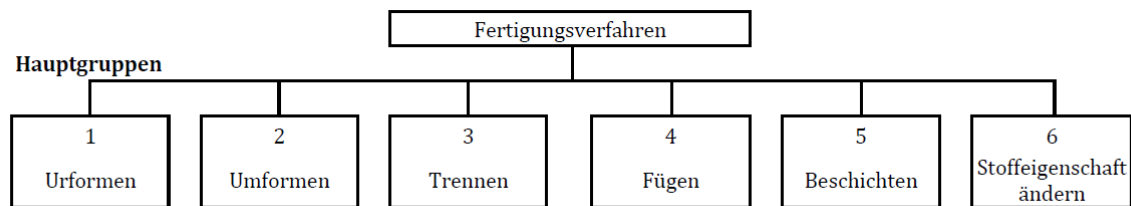


Abbildung 2-1: Einordnung der Fertigungsverfahren nach DIN EN ISO 8580 [DIN8580]

Figure 2-1: Classification of manufacturing methods according to DIN EN ISO 8580 [DIN8580]

Der Prozess der Härtung wird in DIN EN ISO 4885 als Wärmebehandlung mit nachfolgender Abkühlung definiert, wobei die Erwärmung zu einer Austenitisierung des Grundwerkstoffes führt und die Abkühlung unter Bedingungen stattfindet, die eine nahezu vollständige Umwandlung in Martensit oder ggf. Bainit ermöglichen [DIN4885].

Als Tiefziehen wird nach DIN 8584-3 das „Zugumformen eines Blechzuschnittes [...] zu einem Hohlkörper oder Zugdruckumformen eines Hohlkörpers u einem Hohlkörper mit kleinerem Umfang ohne beabsichtigte Veränderung der Blechdicke“ bezeichnet [DIN8584-3]. Es wird zwischen Tiefziehen mit Werkzeugen, Tiefziehen mit Wirkmedien und Tiefziehen mit Wirkenergie unterschieden [DIN8584-3]. In der industriellen Herstellung von pressgehärteten automobilen Strukturbauteilen kommt hauptsächlich das Tiefziehen mit Werkzeugen zur Anwendung.

In der deutschsprachigen Literatur finden sich für das Presshärten außerdem die Bezeichnungen „Formhärten“ [Beh12] und „Warmumformung“ [Trö04], welche im Folgenden als gleichbedeutend gebraucht werden.

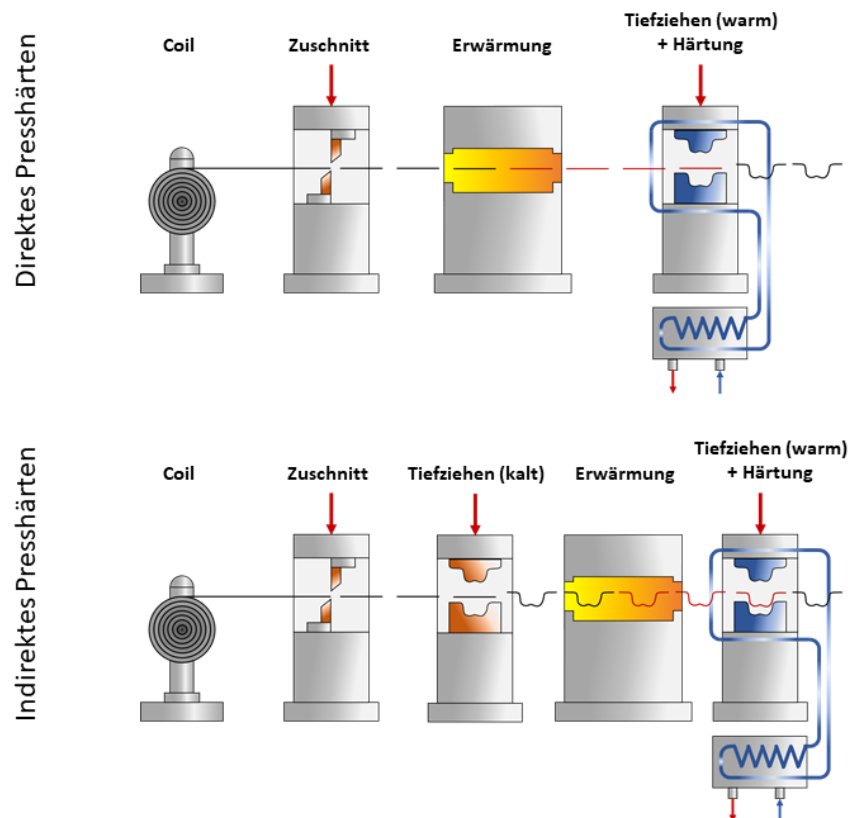


Abbildung 2-2: Schematischer Ablauf des direkten und indirekten Presshärteprozesses

Figure 2-2: Schematic sequence of direct and indirect hot sheet metal forming

Es wird zwischen dem direkten und dem indirekten Presshärten unterschieden [Kar10]. Beide Verfahren werden schematisch in Abbildung 2-2 dargestellt. Beim direkten Presshärten erfolgt die Umformung durch Tiefziehen und das Härten durch Abkühlung des Bauteils in einem Schritt nach der Erwärmung. Im Gegensatz dazu wird das Bauteil beim indirekten Warmformen zunächst auf Raumtemperatur durch Tiefziehen vorgeformt, bevor es erwärmt wird und in einem weiteren Umformschritt seine finalen Eigenschaften erhält [Kar10]. Das Bauteil wird dabei bei der Kaltumformung schon auf bis zu 95% seiner Endgeometrie vorgeformt [Nad07]. Dadurch ist es möglich einerseits komplexere Bauteile zu fertigen und andererseits die Belastung des Presshärtewerkzeuges durch einen geringen Umformgrad während der Warmumformung zu reduzieren [Nad07][Feu12]. Durch den zusätzlichen Prozessschritt und den erhöhten Werkzeugeinsatz werden die Bauteilkosten allerdings erhöht, wodurch indirekt gefertigte Bauteile häufig teurer sind als direkt gefertigte [Feu12]. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wird hauptsächlich das direkte Presshärten betrachtet.

## 2.1.2 Presshärteprozess Hot sheet metal forming process

Wie bereits in Kapitel 2.1.1. erwähnt setzt sich das Presshärten aus einem Erwärmungs- und einem Abkühlvorgang zusammen. Der Zeit-Temperaturverlauf

während des Presshärtens ist schematisch in Abbildung 2-3 zu sehen. Die Vorteile des Presshärtens sind die durch die Umformung bei hohen Temperaturen implizierte hohe Formgenauigkeit und geringe Rückfederung der Platinen sowie die hohe erreichbare Festigkeit im umgeformten Bauteil [Mor17][Nad07]. Das Verfahren eignet sich damit sehr gut zur Herstellung crashrelevanter Strukturbauteile mit hoher Festigkeit für Automobile, wie z.B. B-Säule, Schweller, Tunnel oder Stoßstange [Kar10][Nad07].

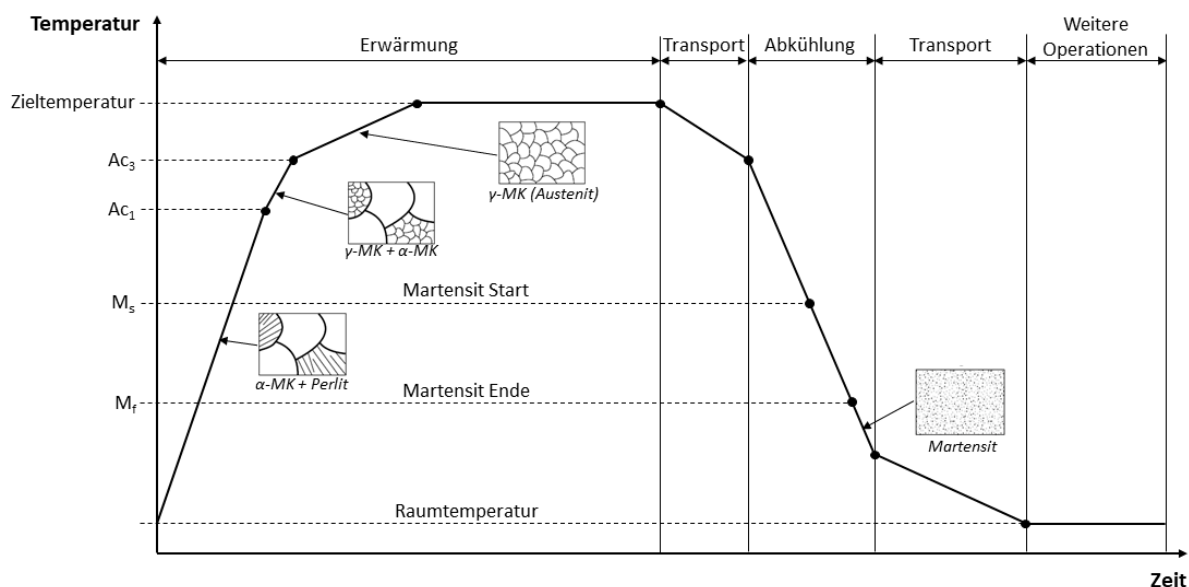


Abbildung 2-3: Schematischer Temperatur-Zeit-Verlauf eines Presshärtevorgangs in Anlehnung an Laple und Bargel [Lap14][Bar12]

Figure 2-3: Schematic temperature-time curve of a hot sheet metal forming process inspired by Laple and Bargel [Lap14][Bar12]

Während der Erwärmung wird der zu härtende Werkstoff über seine Austenitisierungstemperatur  $Ac_3$  erhitzt. Durch den Temperatureinfluss findet eine Gefügeumwandlung statt. Im Ausgangszustand weisen für das Presshärten typische Werkstoffe ein ferritisch-perlitisches Gefüge auf. Sie bestehen aus dem kubisch-raumzentrierten (krz)  $\alpha$ -Ferrit und Perlit, einem lamellar angeordneten Phasengemisch aus Ferrit und Karbiden. Ab Erreichen der  $Ac_1$ -Temperatur beginnt die Umwandlung von  $\alpha$ -Ferrit in kubisch-flächenzentriertes (kfz)  $\gamma$ -Ferrit, welches als Austenit bezeichnet wird. Bei Erreichen der  $Ac_3$ -Temperatur ist diese Umwandlung abgeschlossen. Die Lage der  $Ac_1$  und  $Ac_3$ -Temperatur ist unter anderem abhängig von der Werkstoffzusammensetzung. Abbildung 2-4 zeigt ein Eisen-Kohlenstoff-Diagramm, welches Aufschluss über die Abhängigkeit der Austenitisierungstemperatur und Gefügeausbildung vom Kohlenstoffgehalt des Stahls gibt. Aber auch Art und Menge anderer eventuell vorhandener anderer Legierungselemente beeinflussen das Verhalten des Stahls. [Lap14][Bar12]

Neben der Werkstoffzusammensetzung haben auch die Aufheizparameter einen Einfluss auf die Lage der Austenitisierungstemperatur. Sowohl die Erhöhung der Aufheizrate als auch die Reduzierung der Haltezeit auf der Zieltemperatur führen zu einer Erhöhung der  $Ac_1$ - und  $Ac_3$ -Temperatur [Lap14][Bar12]. Da technische Prozesse

häufig mit erhöhten Geschwindigkeiten ablaufen und technische Werkstoffe weitere Legierungselemente außer Kohlenstoff enthalten, ist das Eisen-Kohlenstoff Phasendiagramm nur selten zur Bewertung der Umwandlungsvorgänge geeignet [Löp14][Bar12]. Es werden daher Zeit-Temperatur-Austenitisierungsdiagramme (ZTA-Diagramme), welche das Verhalten abhängig vom betrachteten Werkstoff und den gewählten Aufheizparametern beschreiben, herangezogen [Löp14][Bar12]. Die Abhängigkeit der  $Ac_1$ - und  $Ac_3$ -Temperatur von den Prozessparametern ist vor allem vor dem Hintergrund der hohen erreichbaren Heizraten der induktiven Erwärmung für die Bestimmung des Prozessfensters von Bedeutung.

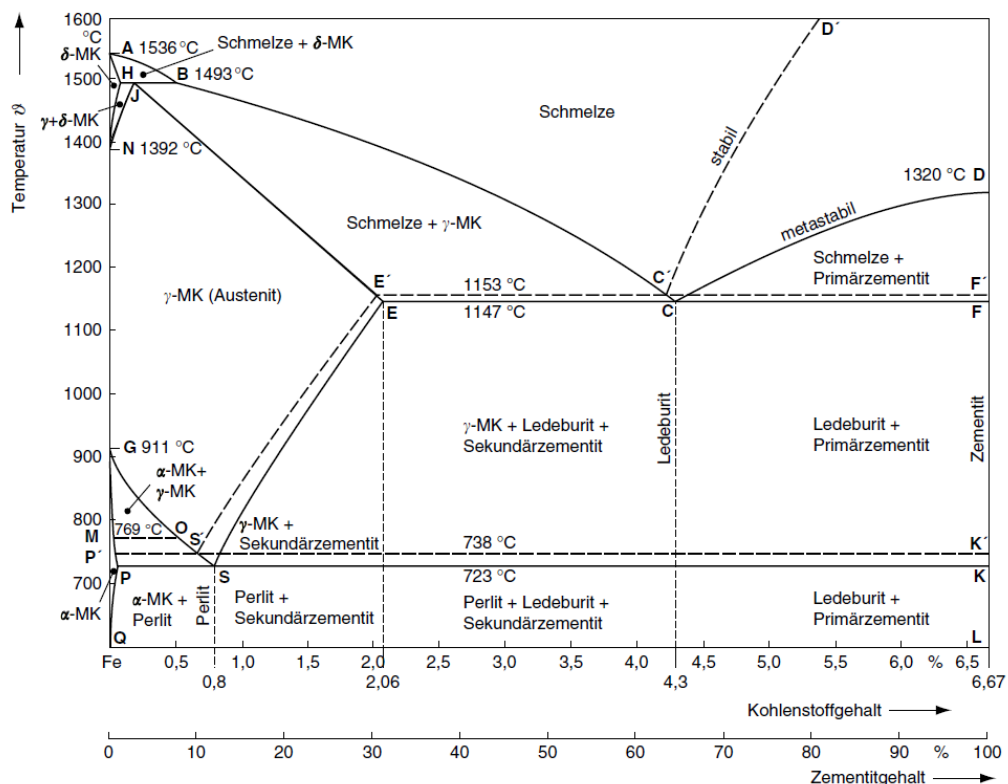


Abbildung 2-4: Eisen-Kohlenstoff Phasendiagramm [Bar12]

Figure 2-4: Iron-carbon phase diagram [Bar12]

Ab Erreichen der  $Ac_1$ -Temperatur beginnt die Auflösung des ferritisch-perlitischen Gefüges zu Austenit. Die Umwandlung beginnt im Perlit, durch Entstehung von Austenitkeimen an der Grenzfläche zwischen Ferrit und Karbid, und setzt sich durch Kohlenstoffdiffusion im Ferrit fort. Bei Erreichen der  $Ac_3$ -Temperatur ist die Umwandlung in Austenit vollständig abgeschlossen. Der zuvor in Karbiden gebundene Kohlenstoff ist auf den Zwischenatomplätzen des kfz-Gitters des  $\gamma$ -Ferrit eingelagert. Es liegt allerdings noch eine ungleichmäßige Verteilung des eingelagerten Kohlenstoffs vor, welche zusätzliche Diffusionsvorgänge zur Homogenisierung benötigt. Es wird daher zwischen homogenen und inhomogenen Austenit unterschieden. [Löp14][Bar12] Das sich bei der Abkühlung einstellende Gefüge ist stark von der Abkühlgeschwindigkeit abhängig. Bei langsamer Abkühlung zerfällt der Austenit wieder



zu Perlit und Ferrit. Wird die Abkühlgeschwindigkeit erhöht, verschiebt sich die der Umwandlungsbeginn  $A_{r3}$  zu tieferen Temperaturen. Es entsteht eine Unterkühlung des Austenits. Außerdem wird die Diffusionszeit für Eisen- und Kohlenstoffatome zunehmend reduziert. Wird eine kritische Abkühlrate überschritten verbleibt nicht mehr genug Zeit für die Diffusion der Atome. Die Kohlenstoffatome bleiben daher im Austenit gelöst. Die sinkende Temperatur führt zu einer immer stärkeren Unterkühlung des Austenits, bis ein Punkt erreicht wird an dem die treibende Kraft zur Umwandlung von kfz-Kristallgitter zu krz-Kristallgitter so groß wird, dass diese trotz gelöster Kohlenstoffatome erfolgt. Es kommt zu einem diffusionslosen Umklappen des Gitters, welches zu einer verzerrten tetragonal-raumzentrierten Gitterstruktur, dem Martensit, führt. Die dadurch induzierten Gitterverspannungen und –fehlerdichten führen zu der für den Martensit typischen hohen Festigkeit und Härte sowie einer geringen Zähigkeit. Die Bildung von Martensit beginnt mit Erreichen der Martensit-Starttemperatur und endet mit der Martensit-Endtemperatur. Die Martensit-Start- und –Endtemperatur sowie die kritische Abkühlrate sind abhängig von der chemischen Zusammensetzung des Stahls. Das Abkühlverhalten eines Stahls in Abhängigkeit seiner Zusammensetzung und Erwärmung wird in Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagrammen (ZTU-Diagramme) angegeben. [Läp14][Bar12]

Aufgrund der zuvor erläuterten Zusammenhänge hat allerdings nicht nur die Abkühlung einen Einfluss auf das sich einstellende Gefüge. Auch Heizrate und Temperaturhaltezeit können dieses beeinflussen. Wird die  $A_{c3}$ -Temperatur nicht erreicht, weil sie, z.B. durch hohe Heizraten und kurze Haltezeiten, über die Zieltemperatur verschoben wurde, findet keine vollständige Austenitisierung statt. Dies führt zum Verbleib ferritischer Bereiche im Martensit, welche die mechanischen Eigenschaften beeinflussen können [Gei12][Sun14][Stö09]. Eine inhomogene Kohlenstoffverteilung nach vollständiger Austenitisierung, z.B. aufgrund kurzer Haltezeiten, kann, je nach Kohlenstoffkonzentration, zu Bereichen aus Restaustenit [Läp14][Ost08] oder Bainit [And16] führen.

### **2.1.3 Platinenwerkstoffe und Zunderschutzsysteme** **Sheet materials and scale protection systems**

Beim Presshärten kommen hauptsächlich niedriglegierte Bor-Mangan-Stähle zum Einsatz, vor allem dann, wenn große Bauteilfestigkeiten und resultierend daraus ein großer Intrusionswiderstand bei Crashbelastung gewünscht sind [Feu12]. Durch Zugabe der Legierungselemente Bor und Mangan wird zum einen die Härte durch Senken der kritischen Abkühlgeschwindigkeit verbessert und zum anderen die erreichbare Festigkeit des Werkstoffes erhöht [Nad07][Feu12][Läp14]. Die Stahlsorten 20MnB5, 27MnCrB5 und 37MnB4 werden typischerweise im Presshärteprozess verwendet, da sie beim Einsatz wassergekühlter Werkzeuge ein vollständig martensitisches Gefüge ausbilden können [Kar10]. Von diesen ist der 22MnB5, der am häufigsten verwendete Stahl [Kar10][Mor17][Feu12]. Andere Bezeichnungen für diesen sind BTR165, Usibor1500 oder MBW1500 [Mor17][Sal19]. Tabelle 2-1 zeigt die chemische Zusammensetzung des 22MnB5. Stähle mit höherem Kohlenstoffgehalt

ermöglichen zwar höhere erreichbare Festigkeiten, neigen aber auch eher zu einer wasserstoffinduzierten Rissbildung, weshalb sie seltener zum Einsatz kommen [Feu13]

Tabelle 2-1: Chemische Zusammensetzung von 22MnB5 (1.5528) [Sal19][Arc16]  
[Thy19] Table 2-1: Chemical composition of 22MnB5 (1.5528) [Sal19][Arc16][Thy19]

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	B	Al
Gew. % (max)	0,27	0,40	1,40	0,025	0,010	0,25	0,05	0,005	0,1

Im unvergüteten Zustand erreicht 22MnB5 Zugfestigkeiten  $R_m$  von 500 – 700 MPa bei Bruchdehnungen  $A_{80}$  von über 12% [Sal19][Thy19]. Durch das Härten erhält der Stahl bei der Warmumformung seine hohen Festigkeiten von mehr als 1400 MPa [Arc16][Thy19]. Allerdings verringert sich auch seine Duktilität, was zu einer reduzierten Bruchdehnung von ca. 5% führt [Arc16][Thy19]. Um diese Materialeigenschaften zu erreichen, wird das Material üblicherweise im Ofen auf Temperaturen von 880°C bis 950°C bei Ofenhaltezeiten von mindestens fünf Minuten erwärmt [Kar10][Mor17][Arc16]. Danach erfolgt die Abkühlung während des Umformprozesses für 5 – 15 s in einem gekühlten Pressenwerkzeug [Kar10][Nad07]. Dabei wird das Bauteil auf eine Temperatur unterhalb der Martensit-Endtemperatur abgekühlt. Somani et al. ermittelten eine Martensit-Starttemperatur von 425°C und eine Martensit-Endtemperatur von 280°C für einen vergleichbaren Mangan-Bor-Stahl [Som01]. Bei Abkühlraten von mehr als 25 K/s wird bei ausreichender Erwärmung ein vollständig martensitisches Gefüge erreicht [Kar10][Mor17][Nad07].

Die für die Austenitisierung benötigten hohen Temperaturen führen bei Erwärmung von unbeschichteten Bauteilen unter Sauerstoffatmosphäre zu Oxidation und Randentkohlung [Kar10][Fan12]. Die bei der Oxidation entstehende Eisenoxidschicht (Zunder) wirkt sich nachteilig auf die nachfolgenden Prozesse aus. Sie führt zu einer Änderung der tribologischen Eigenschaften der Stahloberfläche, was zu einer Schädigung der Werkzeugoberfläche führen kann und die Wärmeübertragung zwischen Stahl und Werkzeug verschlechtert [Feu12][Fan12]. Außerdem beeinflusst sie die Lackierbarkeit und Schweißbarkeit des Bauteils negativ, was es nötig macht diese nach dem Presshärteprozess zu entfernen [Mor17]. Dies kann z.B. durch einen nachgeschalteten Kugelstrahlprozess erfolgen [Mor17][Fan12]. Es wird daher versucht die Entstehung von Zunder zu unterbinden. Dies erfolgt mit Hilfe von Zunderschutzsystemen in Form von Beschichtungen auf dem Grundmaterial.

Das häufigste eingesetzte Zunderschutzsystem ist die Aluminium-Silizium-Beschichtung (AlSi-Beschichtung) [Fan12][Kar10][Mor17]. Sie wird üblicherweise durch Schmelztauchen in einem Aluminiumbad (feualuminieren) mit Anteilen von ca. 10% Silicium und 3% Eisen aufgebracht [Fan12][Mor17][Tod15]. In der industriellen Anwendung besitzt die Beschichtung einen Siliziumanteil von 7-11% welcher vor der Ausbildung spröder  $Fe_2Al_5$ -Phasen während des Schmelztauchens schützt und so eine mangelhafte Anbindung der Beschichtung an das Grundmaterial verhindert [Fan12]. Den finalen Schichtaufbau erhält die Beschichtung erst während der Erwärmung im

Ofen, durch Diffusion von Eisen. Durch die Diffusion erhöht sich der Schmelzpunkt der Beschichtung von 570°C auf oberhalb der Ofentemperatur und es bildet sich ein charakteristischer Aufbau aus fünf Phasen aus [Fan12][Kar10][Mor17]. Die Zusammensetzung der Phasen ist nicht eindeutig geklärt und ist abhängig von der Aufheizrate, der Haltezeit und der ursprünglichen Schichtdicke [Fan12]. Der typische Schichtaufbau ist schematisch in Abbildung 2-5 dargestellt.

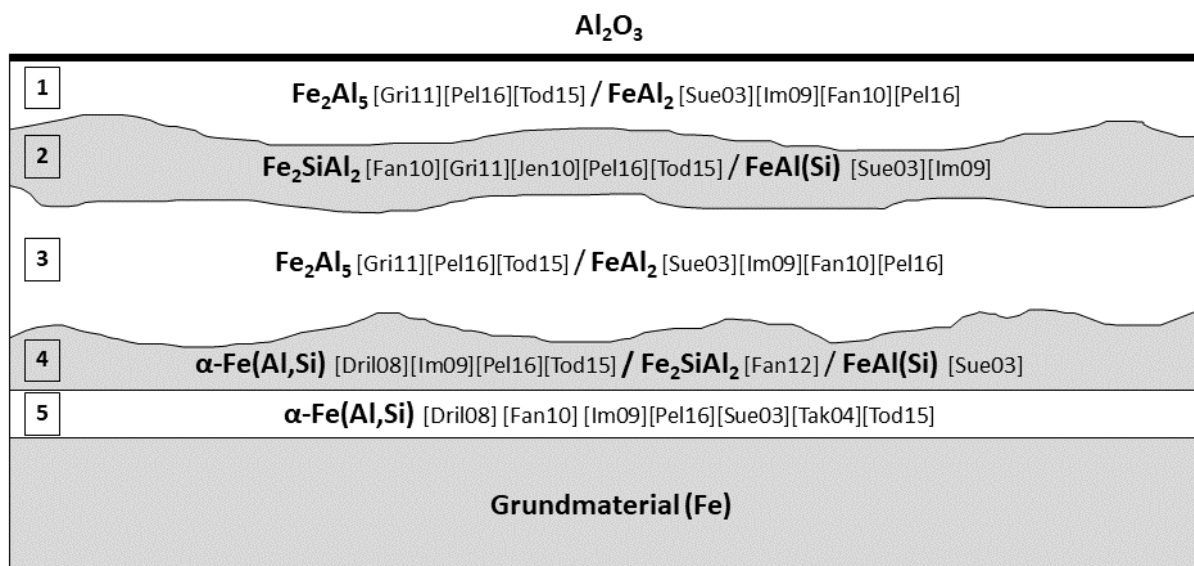


Abbildung 2-5: Schichtaufbau der AlSi-Beschichtung nach Fan und De Cooman [Fan12]

Figure 2-5: AlSi-coating layer composition according to Fan and De Cooman [Fan12]

Schicht eins und drei werden in der Literatur als  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  [Gri11][Pel16][Tod15] oder  $\text{FeAl}_2$  [Sue03][Im09][Fan19][Pel16] bezeichnet. Schicht zwei gilt generell als reich an Silicium und wurde als  $\text{Fe}_2\text{SiAl}_2$  [Fan10][Gri11][Jen10][Pel16][Tod15] oder  $\text{FeAl}(\text{Si})$  [Sue03][Im09] identifiziert. Der Schichtaufbau der zweiten Schicht kann als kontinuierlicher Streifen vorliegen [Dril08][Im09][Mak11][Sue03] oder inselförmig ausfallen [Fan10][Jen10]. Fan und De Cooman vermuten, dass die Ausbildung der zweiten Schicht abhängig von der Aufheizrate bei der Erwärmung sein könnte [Fan12]. Schicht vier und fünf werden entweder als ähnliche Diffusionsschichten aus  $\alpha\text{-Fe}(\text{Al},\text{Si})$  angenommen [Dril08][Im09][Pel16][Tod15] oder als zweischichtiger Aufbau aus  $\text{Fe}_2\text{SiAl}_2/\text{FeAl}(\text{Si})$  und  $\alpha\text{-Fe}(\text{Al},\text{Si})$  [Fan12][Sue03].

Nach heutigem Standard wird hauptsächlich eine Beschichtungsmasse von 150 g/m<sup>2</sup> verwendet, welche im Lieferzustand eine Schichtdicke von ca. 25 µm besitzt. Im Vergleich zu unbeschichtetem Material weisen feueraluminierte Bleche einen guten Korrosionsschutz, eine verbesserte Schweißbarkeit und Lackierbarkeit auf [Mor17]. Aufgrund des ähnlichen elektrochemischen Potentials der Beschichtung zum Grundmaterial kann die Beschichtung allerdings nur einen passiven Korrosionsschutz bieten [Mak11][Fan12].

Der niedrige Schmelzpunkt der Beschichtung im Lieferzustand erweist sich vor allem bei der induktiven Erwärmung als problematisch. Die bei der Erwärmung aufgeschmolzene Beschichtung wird durch die elektromagnetischen Kräfte des

Induktors verdrängt [Tod15][Vei11-1]. Dies führt zu einer ungleichmäßigen Erstarrung der Schicht, welche aufgrund der hohen Heizraten erst nach dem Induktionsprozess erfolgt [Tod15][Vei11-1]. Diese Schädigung der Beschichtung macht sie im Lieferzustand für den induktiven Erwärmungsprozess unbrauchbar [Tod15][Vei11-1]. Todzy hat daher in seinen Arbeiten die Vordiffusion der AlSi-Beschichtung durch eine dem Induktionsprozess vorgeschaltete Erwärmung untersucht. Es wurde ermittelt, dass eine Vordiffusion bei 650°C mit einer Minute Haltezeit ausreichend ist, um bei einer induktiven Erwärmung auf 975°C mit einer Aufheizrate von 60 K/S und einer Haltezeit von 20 s sowohl einen Beschichtungsaufbau als auch Beschichtungseigenschaften zu erhalten, die mit dem konventionellen Ofenprozess vergleichbar sind [Tod15]. Wird während der Vordiffusion eine Haltezeit von mindestens fünf Minuten vorgesehen, ist eine Induktion komplett ohne Haltezeit möglich [Tod15].

Tabelle 2-2: Fe-Zn Phasen nach Marder [Mar00]

Table 2-2: Fe-Zn phases according to Marder [Mar00]

Phase	Formel	Kristallstruktur
$\alpha$ -Fe	Fe(Zn)	kubisch-raumzentriert
$\Gamma$	Fe <sub>3</sub> Zn <sub>10</sub>	kubisch-raumzentriert
$\Gamma$ 1	Fe <sub>5</sub> Zn <sub>21</sub>	kubisch-flächenzentriert
$\delta$	FeZn <sub>10</sub>	hexagonal
$\zeta$	FeZn <sub>13</sub>	monoklin
$\eta$ -Zn	Zn(Fe)	Hexagonal-dichteste Packung

Eine weitere Möglichkeit das Grundmaterial vor Verzunderung zu schützen bieten Zinkbeschichtungen. Zink basierte Beschichtungen weisen aufgrund des niedrigen elektrochemischen Potentials gegenüber dem Grundmaterial einen aktiven Korrosionsschutz auf, was ein Vorteil gegenüber der Aluminium-Silizium-Beschichtung ist [Fad09][Fan12][Kur15]. Außerdem besitzen Zinkbeschichtungen eine gute Umformbarkeit, was auf ihren verhältnismäßig geringen Reibungskoeffizienten zurückzuführen ist [Fan12][Rad16]. Es wird zwischen galvanisierten (GI) und galvannealed (GA) Beschichtungen unterschieden [Fan12]. GI-Beschichtungen werden durch Schmelztauchen in ein 450 - 490°C heißes Zinkbad mit einem Gewichtsanteil von bis zu 0,20% Aluminium aufgebracht [Fan12][Mar00]. Dies wird auch als Feuerverzinken bezeichnet. Der Aluminiumanteil sorgt beim Schmelztauchen für die Ausbildung einer Fe<sub>2</sub>Al<sub>5-x</sub>Zn<sub>x</sub> Sperrschicht, welche die Ausbildung spröder intermetallischer Fe-Zn Phasen behindert, wodurch die Kaltumformbarkeit der Beschichtung gewährleistet bleibt [Fan12][Mar00]. Eine Auflistung der Fe-Zn-Phasen ist in Tabelle 2-2 aufgeführt. GA-Beschichtungen durchlaufen nach dem Galvanisieren noch eine zusätzliche Wärmebehandlung bei 480 - 520°C und enthalten mit ca. 0,13 – 0,14% einen geringeren Anteil an Aluminium [Fan12][Mar00]. Durch den verringerten Aluminiumgehalt und die zusätzliche Erwärmung kommt es zu einer vermehrten

Ausbildung von Fe-Zn-Phasen und einem höheren Eisengehalt in der Beschichtung [Fan12][Mar00].

Sowohl GI- als auch GA-Beschichtungen sind für das Presshärten prinzipiell geeignet, weisen allerdings werkstoffbedingte Eigenheiten auf. Zink schmilzt bei ca. 420°C und verdampft bei Temperaturen knapp über 900°C, was vor allem vor dem Hintergrund der hohen benötigten Austenitisierungstemperaturen problematisch ist [Fad08][Fad09]. Hinzu kommt, dass Zink bei hohen Temperaturen unter Flammen-Bildung stark oxidiert [Fad08][Fad09]. Das in der Beschichtung enthaltene Aluminium bildet während der Erwärmung im Presshärteprozess eine Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schicht aus an der sich auch Zinkoxide anreichern [Fad09][Fan12][Rad16]. Diese Oxidschicht stabilisiert die Beschichtung und verhindert so Verdampfen und Oxidation [Fad09][Fan12][Rad16]. Sie sorgt außerdem in Verbindung mit der wachsenden Fe-Zn-Diffusionsschicht dafür, dass die flüssig Zinkschmelze nicht abfließt [Fad08][Rad16]. Um Hochtemperaturoxidation zu vermeiden werden für die Austenitisierung von Zink beschichtetem Material Ofentemperaturen von unter 910°C vorgesehen [Fad09][Fan12][Voe18].

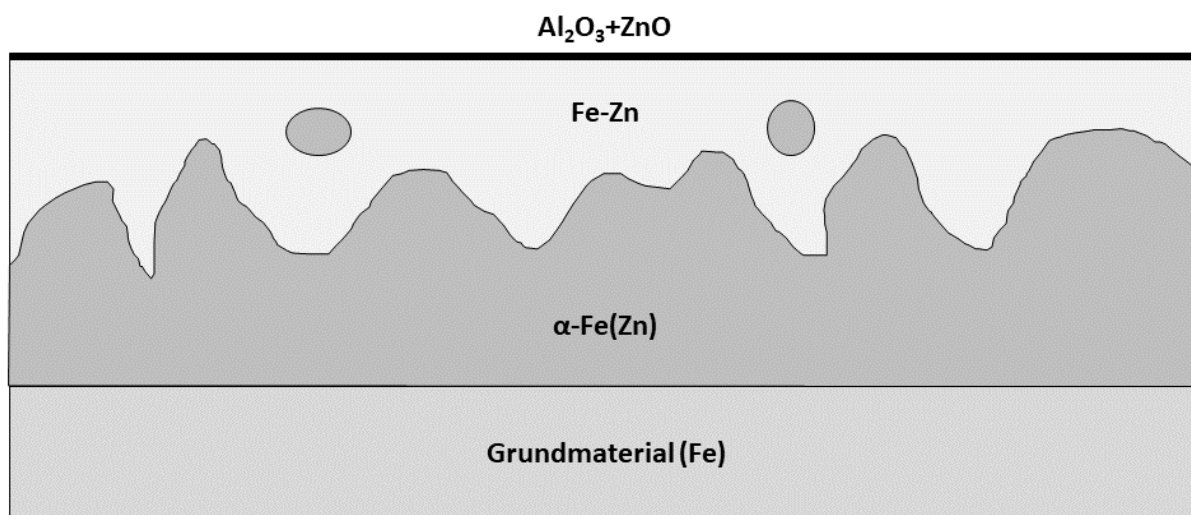


Abbildung 2-6: Schichtaufbau der Zink-Beschichtung nach Fan und De Cooman [Fan12]

Figure 2-6: Zn-coating layer composition according to Fan and De Cooman [Fan12]

Nach dem Presshärten weisen Zinkbeschichtungen eine wie in Abbildung 2-6 schematisch dargestellte Struktur auf. Größe und Zusammensetzung der sich einstellenden Fe-Zn Phasen ist dabei abhängig von der Schichtdicke, der Beschichtungsmethode und den Erwärmungsparametern [Fan12]. GI-Beschichtungen können neben der  $\alpha\text{-Fe}$  Diffusionsschicht noch  $\Gamma$ -,  $\Gamma_1$ -,  $\delta$ - und  $\zeta$ -Phasen aufweisen [Fad09][Fan12][Kur15][Lee12]. GA-Beschichtungen bestehen nach dem Härteprozess entweder vollständig aus  $\alpha\text{-Fe}(\text{Zn})$  oder weisen noch einen Restanteil an  $\Gamma$ -Phase auf [Fan12][Kur15]. Eine Zunahme der Dicke der Oxidschicht in Abhängigkeit der Ofenverweilzeit kann eine Nachbehandlung zur Entfernung der Oxide nötig machen, um eine gute Schweißbarkeit und Lackierbarkeit zu erzielen [Fad09][Fan12].

Der zuvor erwähnte niedrige Schmelzpunkt von Zink bzw. der intermetallischen Zink-Eisen-Phasen sorgt nicht nur bei der Erwärmung für Probleme. Bei der Umformung

liegt die Temperatur der Platine im typischen Presshärteprozess oberhalb der Schmelztemperatur der zinkreichen Fe-Zn-Phasen [Lee12][Sch13]. Dies führt zu Flüssigmetallversprödung (engl. Liquid Metal Induced Embrittlement (LMIE)) an Stellen mit großer Umformung durch flüssige Zinkphasen [Hen13][Sch13]. Die dadurch entstehenden Mikrorisse verschlechtern die mechanischen Eigenschaften des Bauteils [Lee12][Sch13][Tak13]. Es existieren daher unterschiedliche Ansätze, um LMIE zu vermeiden. Ein erster Ansatz ist die Reduktion der Umformung der Platine beim Presshärten, was durch den Einsatz beim indirekten Warmformen erreicht werden kann, da hier ein Großteil der Verformung schon während der Kaltumformung erfolgt [Fad09][Fan12][Kur15]. Eine weitere Möglichkeit ist die Vermeidung flüssiger Zinkphasen durch anheben des Schmelzpunktes. Dies kann z.B. über die Umwandlung aller Beschichtungsphasen in  $\alpha$ -Fe(Zn) durch eine Erhöhung der Diffusionszeit oder eine Verringerung der Schichtdicke erreicht werden [Fan12][Sch13][Tak13]. Alternativ können schmelzpunktsteigernde Legierungselemente, wie z.B. Nickel, hinzugefügt werden [Fan12][Kon11]. Eine dritte Variante ist die Umformung unterhalb der Schmelztemperatur der Beschichtung [Fan12][Kur15]. Die zusätzliche Vorkühlung und die damit einhergehenden verlängerten Prozesszeiten führen allerdings dazu, dass ein vollständig martensitisches Gefüge bei Verwendung von 22MnB5 nicht mehr erreicht werden kann [Fan12][Rad16]. Um dies zu vermeiden, greift ein anderer Hersteller bei einem Zink beschichteten Material für den direkten Presshärteprozess, auf einen anderen Grundwerkstoff, den Bor-Mangan-Stahl 20MnB8, zusammen mit einer GA-Beschichtung zurück [Rad16][Voe18-2]. Die chemische Zusammensetzung des 20MnB8 ist in Tabelle 2-3 gezeigt.

Tabelle 2-3: Chemische Zusammensetzung von 20MnB8 [Voe18-2]

Table 2-3: Chemical composition of 20MnB8 [Voe18-2]

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti+Nb	B	Al	Mo
Gew. % (max)	0,23	0,50	2,50	0,02	0,005	0,05	0,1	0,005	0,3	0,2

Der höhere Mangan-Gehalt des 20MnB8 verringert die kritische Abkühlgeschwindigkeit und ermöglicht so eine Vorkühlung des Materials [Rad16]. Die Beschichtung hat im Lieferzustand eine Schichtdicke von 11-18  $\mu\text{m}$  [Voe18-2]. Für die Austenitisierung ist eine Temperatur von über 870°C und eine Haltezeit von mindestens 45 s nach Erreichen von 870°C empfohlen [Voe18-2]. Vor dem Umformen erfolgt eine umformungslose Abkühlung des Bauteils auf bis zu 500°C [Voe18-2]. So kann nach der Umformung ein martensitisches Gefüge ohne LMIE erreicht werden [Kur15][Rad16][Voe18-2].

Eine dritte Art des Zunderschutzes liefern Nanopartickellackierungen, wie das anorganisch-organische Zunderschutzsystem (22MnB5+nano). Aluminium- und Graphitnanopartikel werden dabei zusammen mit Wachspartikeln in einer anorganisch-organischen Netzwerk mit Siloxanen eingelagert [Ste07][Nan16]. Der Beschichtungsaufbau wird in Abbildung 2-7 gezeigt. Die Aluminiumpartikel ermöglichen den Zunderschutzschutz während des Warmformens, während Graphit-

und Wachspartikel die Warm- bzw. Kaltumformbarkeit der Beschichtung verbessern [Ste07].

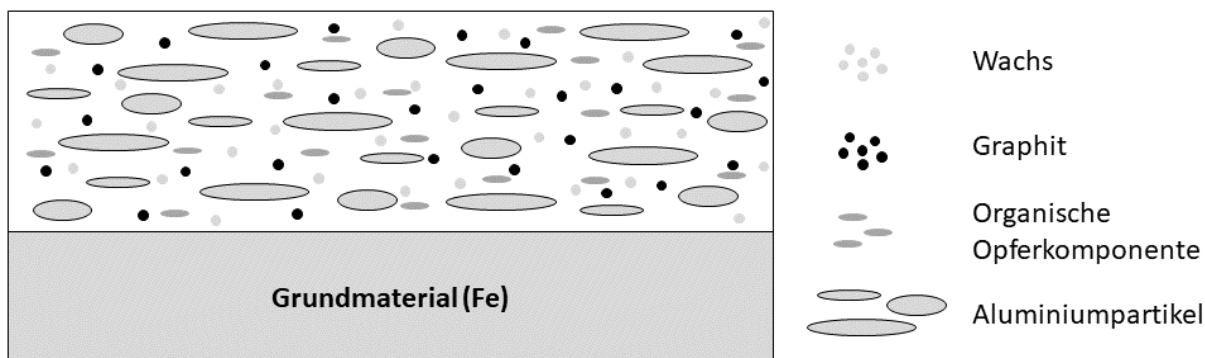


Abbildung 2-7: Schichtaufbau des nano-Zunderschutzes nach Goedicke et al. [Goe08]

Figure 2-7: nano scale protection layer composition according to Goedicke et al. [Goe08]

Das Beschichtungssystem hat mehrere Entwicklungsstufen durchlaufen, in denen die Eigenschaften verbessert wurden. Während in der ersten Generation gute Zunderschutz Eigenschaften erreicht werden konnten, verhinderte der hohe elektrische Durchgangswiderstand von 300 m $\Omega$  das Fügen der beschichteten Bauteile, was ein Sandstrahlen der beschichteten Proben nach dem Härten notwendig machte [Goe08][Len08]. Das Matrixsystem wurde daher in der zweiten Generation um organische Opferkomponenten erweitert, welche die Aluminiumpartikel vor Oxidation schützen soll [Goe08]. Dadurch ließ sich der Durchgangswiderstand bei einer Schichtdicke von 5 – 7  $\mu\text{m}$  und Erwärmung unter Sauerstoffatmosphäre auf 10 m $\Omega$  reduzieren [Goe08]. Bei der Erwärmung unter Argonatmosphäre konnte sogar ein Durchgangswiderstand von 2 m $\Omega$  erreicht werden [Goe08]. Da 10 m $\Omega$  über dem Grenzwert der Punktschweißbarkeit liegt, empfiehlt der Hersteller bei der aktuell vermarkteten Variante, dem AlSi Coat 4001, eine Schichtdicke von 2 – 3  $\mu\text{m}$  zur Einstellung einer guten Punktschweißbarkeit [Goe08][Nan16]. Eine dritte Generation des nano-Systems, welche Zink- und Magnesiumpartikel zur Verbesserung des Korrosionsschutzes und der Schweißbarkeit enthalten sollte, wurde untersucht aber bisher nicht zur Marktreife gebracht [Goe08][Goe09].

Die Beschichtung nano-AlSi-Coat, welche auf der zweiten Generation des Zunderschutzes aufbaut, wird in der industriellen Anwendung per Walzauftrag auf den Stahl aufgebracht, kann aber auch gesprüht werden [Nan16]. Nach der Aushärtung der Schicht für mindestens 50 s bei 200 – 250°C nach Walzauftrag ist die Beschichtung temperaturstabil bis 1000°C und kann im Presshärteprozess verwendet werden [Nan16].

## 2.2 Grundlagen der Induktion Basics of induction

Erwärmungsverfahren werden in direkte und indirekte Verfahren unterschieden. Bei den indirekten Verfahren wird die Wärme von außen über die Oberfläche dem Gut

zugeführt. Dabei treten die Wärmeübertragungsmechanismen Konvektion, Wärmeleitung und -strahlung auf. Die Durcherwärmung des Guts ist von der spezifischen Wärmeleitfähigkeit abhängig. Da die Erwärmung durch eine äußere Wärmequelle stattfindet, muss diese mindestens die Zieltemperatur des Guts haben. Dieser Umstand begrenzt die maximale Temperatur und die Heizrate. Insbesondere wenn die Temperaturdifferenz zwischen Quelle und Gut kleiner wird, kann weniger Leistung durch Strahlung übertragen werden. Geringe Heizraten gehen einher mit längeren Heizzeiten und somit auch größeren thermischen Verlusten [Ben90].

Bei der induktiven Erwärmung handelt es sich um ein direktes Erwärmungsverfahren. Die Wärme wird im Gut erzeugt. Sie wird nicht über die Oberfläche zugeführt. Verantwortlich für die Erwärmung sind die induzierten Wirbelströme. Damit stellt sich auch eine Anforderung an das Gut. Es muss elektrisch leitfähig sein, da sonst kein elektrischer Strom induziert werden kann. Da die Wärme direkt im Gut erzeugt wird, gibt es keine Wärmequelle im klassischen Sinn. Physikalisch gesehen gibt es keine Grenze der induzierten Leistung. Auf der technischen Seite – der Frequenzumrichtertechnik – schon. Bei Frequenzen von mehreren 100 kHz lassen sich Leistungen im Bereich von bis zu 500 kW mit der Umrichtertechnik erzeugen. Im zweistelligen kHz-Bereich sind Leistungen im MW-Bereich üblich [Rud17].

Auf der Abbildung 2-8 ist die Anordnung einer induktiven Erwärmung dargestellt. Wie bereits erwähnt, werden Wirbelströme  $I_k$  im Gut induziert. Dazu wird eine Spule benötigt, die in der Regel aus Kupfer gefertigt wird. Diese Spule wird durch einen Frequenzumrichter mit einem Wechselstrom  $I_1$  versorgt. Der Wechselstrom erzeugt ein elektromagnetisches Feld, welches die Wirbelströme induziert. Die induzierten Ströme erzeugen aufgrund des elektrischen Widerstands des Guts Wärme. Auf Abbildung 2-8 (b) ist zu erkennen, dass das Gut nur dort erwärmt wird, wo sich der äußere Induktor befindet. Der Induktor ist meistens wassergekühlt, da dort natürlich auch Wärme aufgrund des Stroms  $I_1$  entsteht [Fas91].

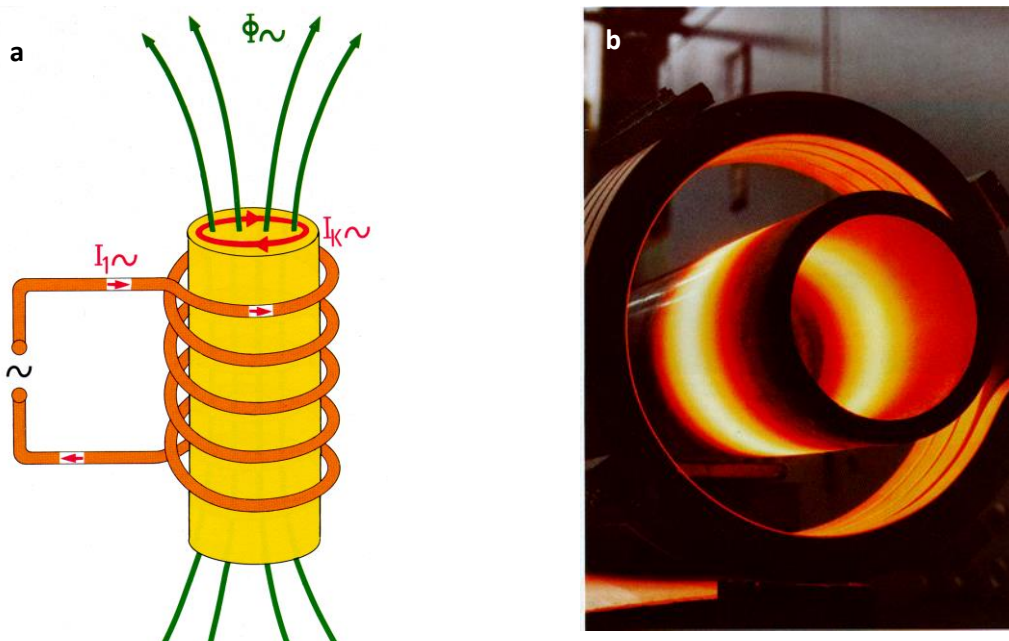




Abbildung 2-8: (a) Prinzip der induktiven Erwärmung anhand eines Metallzylinders [Fas91] (b) Induktive Erwärmung eines Rohres [Fas91]

Figure 2-8: (a) Principle of induction heating [Fas91] (b) Inductive heating of a tube [Fas91]

Da hier ein Wechselstrom vorliegt, ist die Stromdichteverteilung im Querschnitt des Zylinders (Abbildung 2-9 b(a)) nicht gleichmäßig. Ein mit Gleichstrom durchflossener elektrischer Leiter hat eine konstante Stromdichte über den Querschnitt. Bei Wechselstrom tritt der Skin-Effekt auf. Der elektrische Strom hat an der Oberfläche den größten Wert und nimmt annähernd exponentiell zum Inneren des Guts hin ab. Der Effekt wird auch als Stromverdrängung bezeichnet. Die maximale Stromdichte an der Oberfläche wird mit  $J_0$  bezeichnet. Eine weitere wichtige Größe ist das elektromagnetische Eindringmaß  $\delta$ . Es spiegelt die Dämpfung des elektromagnetischen Feldes in einem Material wieder [Zok12]. An der Stelle  $\delta$  ist die Stromdichte auf 37 % ihres Maximalwerts abgesunken. Das Eindringmaß ist von der Frequenz und Materialeigenschaften abhängig und berechnet sich nach:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \kappa \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (2.1)$$

Nach der Formel ist das Eindringmaß  $\delta$  von der Frequenz  $f$ , der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit  $\kappa$  und der relativen Permeabilität  $\mu$  abhängig. Da bei einer Erwärmungsaufgabe das Material vorgegeben ist, kann nur über die Frequenz gezielt Einfluss auf das Eindringmaß genommen werden. Vom Eindringmaß ist auch der elektrische Wirkungsgrad abhängig.

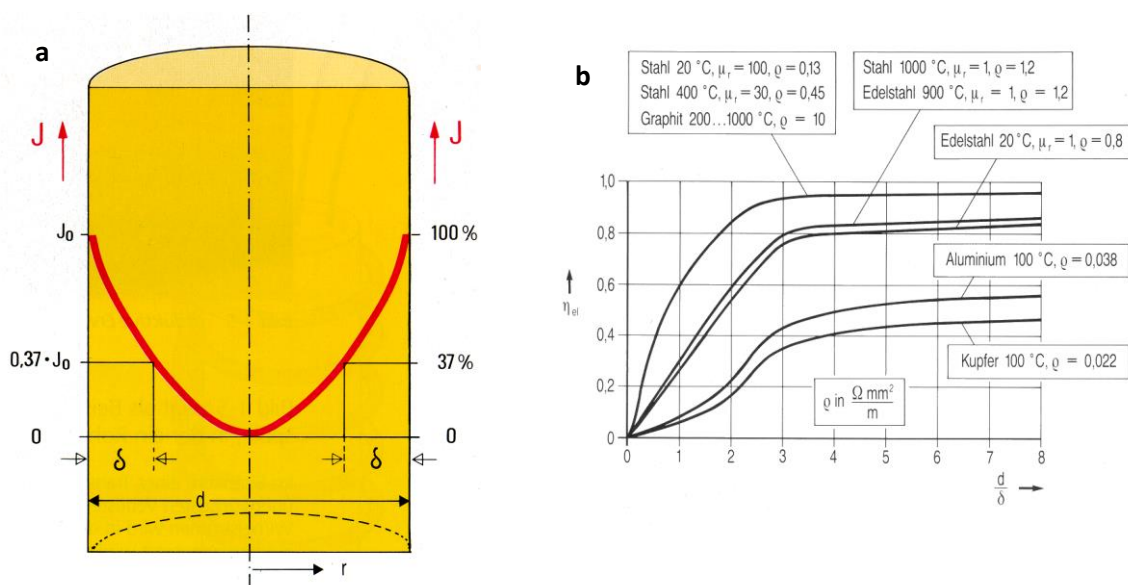


Abbildung 2-9: (a) Prinzipielle Stromdichteverteilung in einem Metallzylinder [Fas91] (b) Elektrischer Wirkungsgrad einer zylindrischen Anordnung [Fas91]

Figure 2-9: (a) Current density distribution [Fas91] (b) Electrical efficiency of a cylindrical induction coil with workpiece [Fas91]

Der elektrische Wirkungsgrad (Abbildung 2-9 (b)) bestimmt sich aus dem Verhältnis  $d/\delta$ . Dabei wird von einer idealen magnetischen Kopplung zwischen Induktor und Werkstück ausgegangen. Ein  $d/\delta \leq 3$  wirkt sich negativ auf den elektrischen Wirkungsgrad aus. In einer Querschnittsfläche haben die induzierten elektrischen Ströme gegensätzliches Vorzeichen. Ist das Verhältnis  $d/\delta \leq 3$ , so löschen sich diese Ströme teilweise gegenseitig aus. Umso kleiner  $d/\delta$  desto größer ist die gegenseitige Auslöschung und der Wirkungsgrad sinkt. Bei  $d/\delta \geq 3$  wird der höchste Wirkungsgrad erzielt [Nac14].

Je nach Erwärmungsaufgabe muss nur eine sehr dünne Schicht erwärmt werden (Randschichthärten) oder das Werkstück wird durcherwärmt (Schmieden). Ob nur eine dünne Schicht oder das ganze Werkstück erwärmt wird, kann über die Frequenz eingestellt werden. Wie bereits oben erwähnt wird darüber die Stromdichteverteilung im Werkstück eingestellt. Damit ist auch die Leistungsdichteverteilung direkt verbunden. Im Bereich des Eindringmaß werden 83 % der Leistung umgesetzt [Ben90].

Für die Erwärmung von Blechen oder Bändern eignet sich die induktive Längsfelder- und Quersfelderwärmung. Bei der induktiven Längsfelderwärmung (Abbildung 2-10 (a)) ist das Werkstück von einer flachen Kupferspule umgeben. Das vom Induktorstrom erzeugte Magnetfeld verläuft parallel zur Oberfläche des Werkstücks und induziert einen Wirbelstrom in der Querschnittsfläche des Blechs. Die Dicke und die Materialeigenschaften des Blechs geben vor, welche Frequenz für eine effektive Erwärmung benötigt wird. Bei einem Blech von 1 mm Dicke wird eine Frequenz von ca. 700 kHz benötigt.

Der Aufbau der induktiven Quersfelderwärmung zeigt Abbildung 2-10 (b). Bei der Quersfelderwärmung werden Flächeninduktoren eingesetzt. Sie sind entweder auf der oberen Seite montiert oder auf der oberen und unteren Seite, wie auf der Abbildung 2-10 (b). Im Gegensatz zur induktiven Längsfelderwärmung steht daher das magnetische Feld senkrecht auf der Blechoberfläche. Dadurch können sehr dünne Bleche mit niedrigen Frequenzen sehr effektiv erwärmt werden. Auch die Temperatur an den Kanten kann sehr gut eingestellt werden [Nau00].

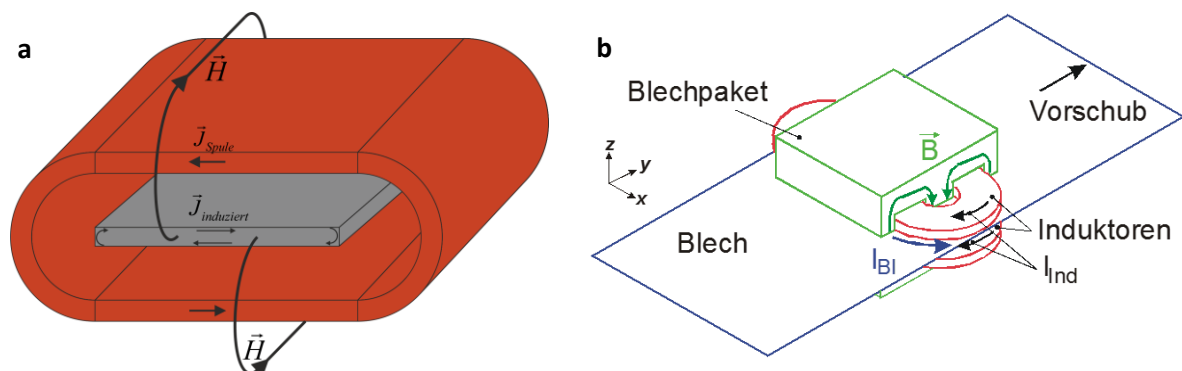


Abbildung 2-10: (a) Induktive Längsfelderwärmung (b) Induktive Quersfelderwärmung  
Figure 2-10: (a) Longitudinal flux induction heating (b) Transverse flux induction heating

### **Stand der Technik**

Eine induktive Erwärmungsanlage für Formplatinen im Durchlaufbetrieb wurde in Zusammenarbeit zwischen der Volkswagen AG und SMS Elotherm GmbH entwickelt [Vib16-1]. Dabei stand die zeitliche Verkürzung des Erwärmungsprozesses als auch die Verkürzung der bisherigen Erwärmungseinrichtung (Rollenherdofen) im Vordergrund. Die fertige Anlage konnte in den Produktionsprozess integriert werden und ermöglicht eine Erwärmung bis 700 °C [Vib16-2]. Der Aufbau der Anlage kann der Abbildung 2-11 entnommen werden. Die Formplatinen werden über eine Transporteinheit (6) dem Induktor zugeführt. Der Aufbau der Induktionseinheit besteht im Wesentlichen aus den Komponenten Umrichter (1) und Schwingkreis (2, 3, 4, 5). Der Umrichter hat eine Leistung von 800 kW und wird mit einer Frequenz von 23 bis 110 kHz betrieben. Die Induktoren (4, 5) können zu einem Längsfeld- oder Querfelderwärmer verschaltet werden, da sie getrennt ansteuerbar sind. Über eine Pneumatik kann die Gesamtkapazität (2) der Induktionseinheit eingestellt werden. Zur Anpassung der Last (Induktor und Werkstück) an den Schwingkreis wird ein Transformator verwendet. Nach der Induktionsstrecke wird die Platine in den Rollenherdofen transferiert und weiter auf ca. 920 °C erwärmt. Die Kühleinheit für die Induktionsanlage ist nicht auf der Abbildung 26 dargestellt. Mit der induktiven Erwärmungseinheit konnte ein B-Säule auf 700 °C erwärmt werden. Durch die anschließende Ofeneinheit wird die Formplatte homogen auf 950 °C erwärmt. Die induktive Querfelderwärmung einer Formplatte hat deutliche Temperaturunterschiede hervorgebracht [Vib16a].

Daneben wurde ähnlich Konzepte der induktiven Erwärmung untersucht [Vei11-2][Kat11][Sch11][Trö14]. Außerdem wurde in einem Forschungsvorhaben die Machbarkeit einer konduktiven Erwärmung [Beh14] und einer Wirbelbetterwärmung [Trö12] untersucht.

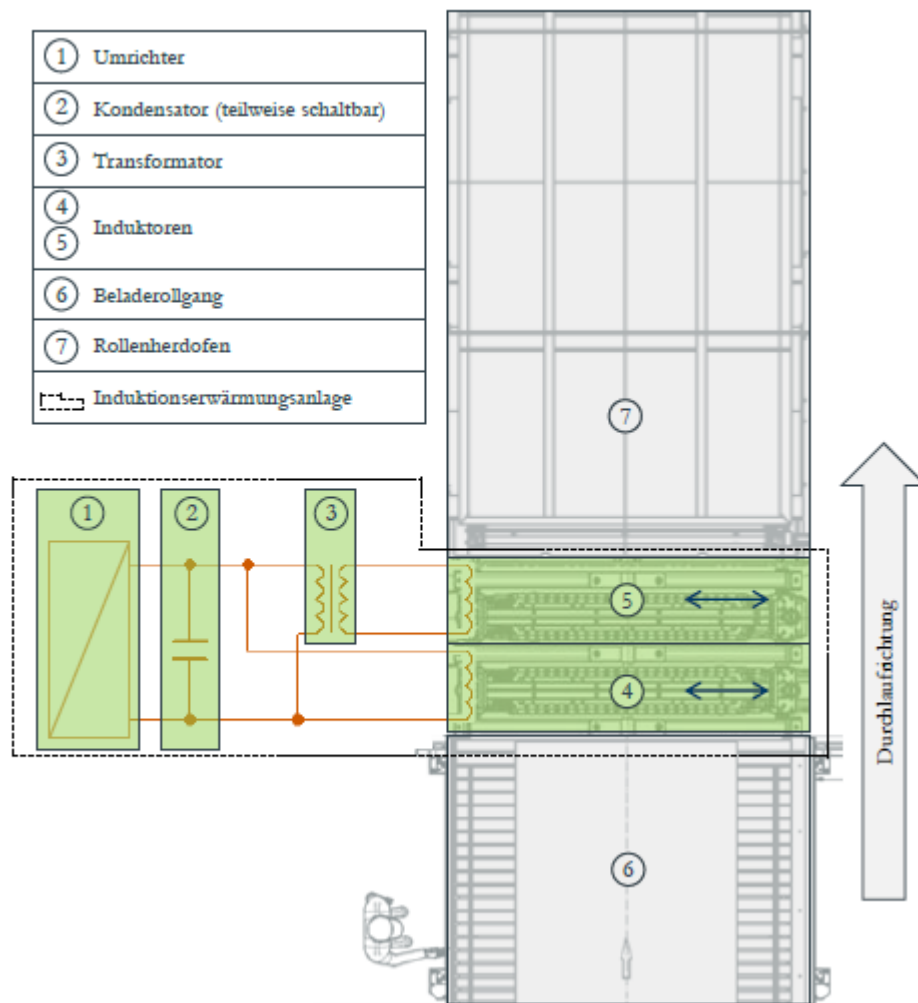


Abbildung 2-11: Aufbau der Erwärmungsanlage [Vib16-1]  
Figure 2-11: Construction of induction heating system [Vib16-1]

### 3 Spezifikations- und Klassifikationsphase Specification and classification phase

#### *Kurzfassung*

*Formplatinen weisen unterschiedliche geometrische Formen auf. Im ersten Schritt werden diese Formen analysiert und klassifiziert. Die Klassifizierung ermöglicht später die gezielte numerische Untersuchung kritischer geometrischer Formen und die aussagekräftige Wahl des Demonstratorbauteils. Außerdem können aus der Analyse des Bauteilspektrums mögliche induktive Erwärmungskonzepte abgeleitet werden.*

#### *Abstract*

*Sheet metals in hot forming process have different geometrical forms. In the first step the component spectrum is analyzed and afterward classified. With the classification a specific numerical investigation of critical geometries is possible and a close to production component can be chosen as demonstrator. Furthermore, induction heating concepts can be derived.*

#### 3.1 Analyse des Bauteilspektrums Breakdown of component spectrum

Für die Analyse des Bauteilspektrums wurden durch die Projektpartner CAD-Zeichnungen unterschiedlicher Bauteile aus dem Presshärteprozess bereitgestellt. Die Bauteile können zum einen nach ihrer äußeren Form unterschieden werden. In der äußeren Form treten Bauteile mit Querschnittsänderung, gekrümmter und gebogener Form auf.

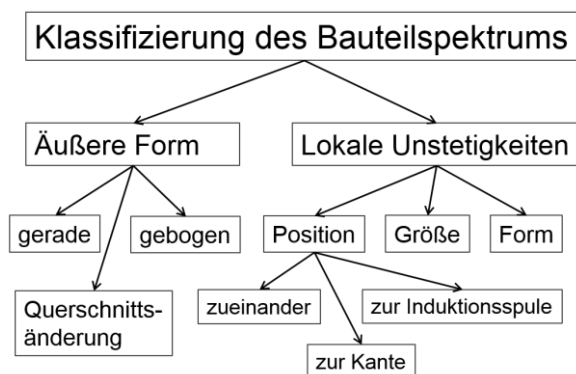


Abbildung 3-1: Klassifizierung des Bauteilspektrums

Figure 3-1: Classification of component spectrum

Zum anderen findet eine Unterscheidung in lokale geometrische Unstetigkeiten statt. Diese sind weiter unterteilt in Form, Position und Lage zueinander. Aus den

bereitgestellten CAD-Zeichnungen konnte entnommen werden, dass runde, rechteckige, längliche und trapezförmige Löcher den Großteil der lokalen Unstetigkeiten ausmachen.

Abbildung 3-1 zeigt eine Übersicht der Klassifizierung. Die Analyse und anschließende Klassifizierung des Bauteilspektrums unterstützt die Entwicklung von Erwärmungsstrategien, weil sowohl die äußere Form als auch lokale Unstetigkeiten Einfluss auf die Temperaturverteilung haben können.

### 3.2 Auswahl des Demonstratorbauteils Selection of a sample component

Das Bauteilspektrum im Warmformprozess besteht aus unterschiedlichen Bauteilen wie A-, B- und C-Säule, Achskomponenten usw. (Abbildung 3-2). Im Folgenden werden die Gründe für die Wahl des Demonstratorbauteils ausgeführt.

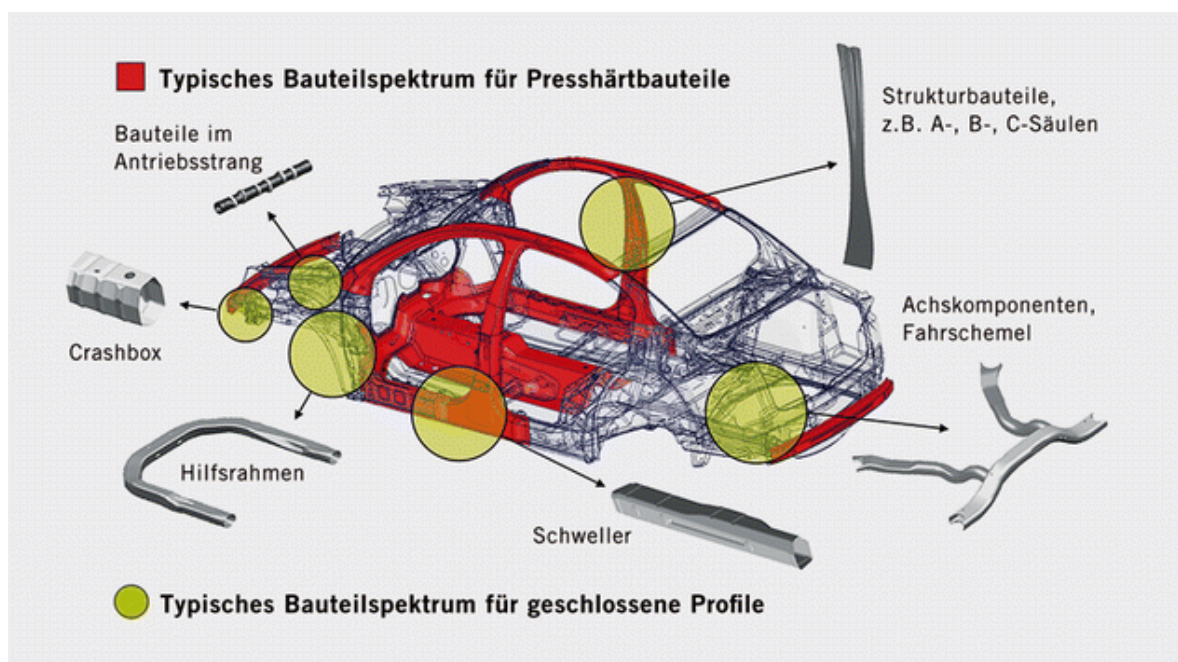


Abbildung 3-2: Bauteilspektrums [Neu09]

Figure 3-2: Component spectrum [Neu09]

Aus dem Spektrum wird als Demonstratorbauteil eine B-Säule ausgewählt, weil das Unternehmen Kirchhoff Automotive GmbH für dieses Bauteil eine Pressform (Abbildung 3-3 (a)) bereitstellen kann. Die Pressform kann eine Platine der Größe 1000 mm x 550 mm (Abbildung 3-3 (b)) aufnehmen. Außerdem stellt eine B-Säule erhöhte Anforderungen an eine homogene Erwärmung. Aus dem analysierten Bauteilspektrum treffen die Merkmale Querschnittsänderung, schräge Form und Löcher unterschiedlicher Lage und Form zu. Dadurch kann später gezeigt werden, welchen Einfluss diese Merkmale auf die Temperaturverteilung haben.

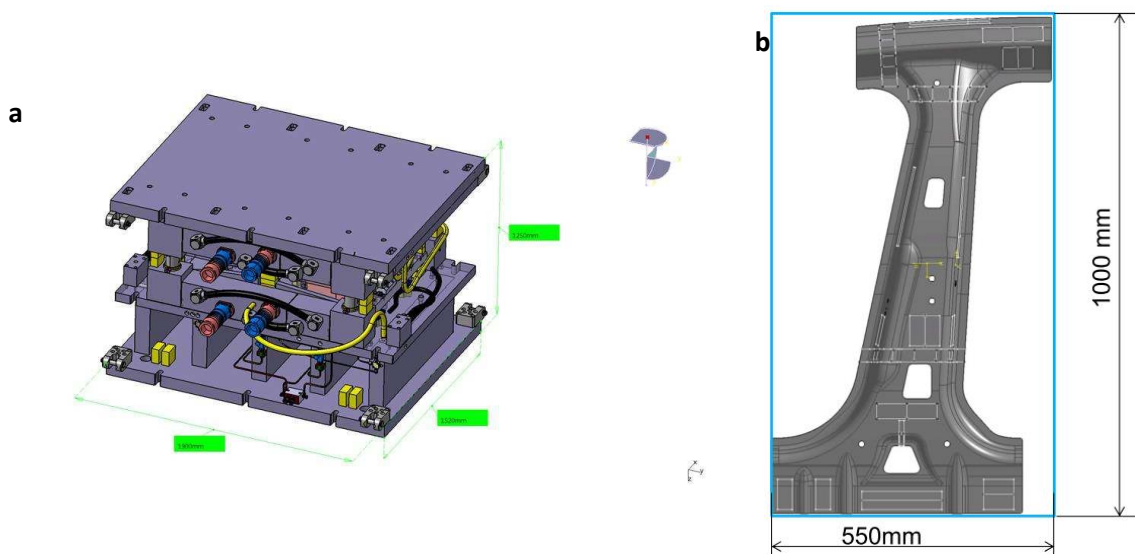


Abbildung 3-3: (a) Presswerkzeug und (b) B-Säule [Kir16]

Figure 3-3: (a) Press tool and (b) B-pillar [Kir16]

Neben der Beschränkung der Wahl des Demonstratorbauteils aufgrund der zur Verfügung stehenden Pressform gibt es einen weiteren limitierenden Faktor. Die Leistung des zur Verfügung stehenden Hochfrequenzumrichters ist begrenzt. Für die Erwärmung der B-Säule in Abbildung 3-3b wird eine Ausgangsleistung von 250 kW benötigt bei einer Heizzeit von 20 s. Die Induktivität des Induktors ist ausschlaggebend für die zu übertragende Leistung. Eine numerische Berechnung hat ergeben, dass die Induktivität bei ca.  $3,3E-8$  H liegt. Aufgrund dieser Induktivität muss die Spannung relativ hoch sein, um einen ausreichend großen Strom im Induktor zu treiben. Dieses kann durch eine Erhöhung der Spannung erreicht werden. Eine Erhöhung der Spannung durch einen Transformator kann aufgrund der Frequenz von 400 kHz und der Scheinleistung von 8 MVA nicht erfolgen. Daher wird eine kapazitive Spannungsverdopplung eingesetzt. Die Ausgangsspannung liegt dann bei 900 V. Eine weitere numerische Berechnung hat gezeigt, dass bei 900 V 66 % der Ausgangsleistung genutzt werden kann. Von der technischen Seite ist auch eine weitere Verdopplung der Spannung möglich. Aufgrund der weiteren Kosten für die Kondensatoren, die nicht im Projekt vorgesehen waren, wurde diese Möglichkeit nicht weiterverfolgt.

Als Demonstratorbauteil wird daher der obere Teil einer B-Säule gewählt. Dieses ist in Absprache mit den Projektpartnern des projektbegleitenden Ausschusses abgestimmt worden.

Der Meilenstein 1 ist an dieser Stelle erreicht. Die Bauteilklassen sind gebildet und das Demonstratorbauteil ist ausgewählt.

## 4 Entwicklung des induktiven Erwärmungsprozesses Development of the inductive heating process

### *Kurzfassung*

*Ziel des Kapitels ist die Entwicklung des induktiven Erwärmungssystems für das Demonstratorbauteil und Festlegung von Konstruktionsrichtlinien für selbiges. Dazu werden mögliche Konzepte diskutiert und numerische Untersuchungen zeigen kritische Punkte auf, die bei der Entwicklung des endgültigen Konzepts berücksichtigt werden müssen. Auf Grundlage der numerischen Voruntersuchungen wird das endgültige Erwärmungskonzept optimiert.*

### *Abstract*

*Aim of the chapter is the development of the induction heating concept for the demonstrator component and determination of the construction guidelines. Different concepts are discussed. Numerical investigations display critical elements, which are important for the development of the final heating concept. Based on the numerical calculations the final concept is optimized.*

### 4.1 Konzeptentwicklung von Induktionsstrategien Conceptual design of induction strategies

#### 4.1.1 Induktionsstrategien Induction strategies

Anforderungen an das Erwärmungskonzept: Die Formplatte soll möglichst homogen erwärmt werden, d.h. Löcher, Aussparungen oder Änderungen im Querschnitt haben möglichst keinen Einfluss auf die Temperaturverteilung. Des Weiteren wird ein einstufiger Erwärmungsprozess angestrebt. Ein Warmhalteofen soll nicht verwendet werden, da dieser nicht im Projekt vorgesehen ist. Daher wird die Erwärmung im Standbetrieb favorisiert. Im Folgenden werden verschiedene mögliche induktiven Erwärmungskonzepte diskutiert. Dazu gehören neben der induktiven Durchlauferwärmung im Längsfeld auch die Querfelderwärmung.

Für ein Erwärmungskonzept gibt es die Möglichkeit die induktive Längsfelderwärmung im Durchlauf- oder Standbetrieb zu betreiben.

Bei einer Durchlauferwärmung wird das Blech oder das Band durch einen kurzen Induktor geführt. Dabei wird nur der Bereich erwärmt, der sich innerhalb des Induktors befindet. Damit das erwärmte Werkstück die Temperatur, aufgrund von Wärmestrahlung, Konvektion und Wärmeleitung, nicht verliert, müsste ein Warmhalteofen nachgeschaltet werden, insbesondere wenn die Fläche groß gegenüber dem Volumen ist. Kurze Induktoren führen auch zu einem inhomogenen Magnetfeld, was negativ auf eine gleichmäßige Temperaturverteilung wirkt.

Bei der Stand- oder auch Batch-erwärmung wird die Platine vollständig bei ausgeschalteter Leistung in den Induktor transportiert. Da sich das ganze Bauteil im



Induktor befindet, wird kein Warmhalteaggregat benötigt. Das Bauteil befindet sich während der Erwärmung in Ruhe und daher kann die Induktorgeometrie leichter auf ein Bauteil angepasst werden. Des Weiteren treten keine Effekte aufgrund vom Ein- und Ausfahren des Bauteils auf. Auch aufgrund der Länge und der niedrigen Bauhöhe (Koppelabstand) des Induktors treten nur geringfügig Kanteneffekte aufgrund von Feldverzerrung auf.

Für eine Querfelderwärmung kommt nur eine Durchlauferwärmung in Frage. Auch hier würde ein Warmhalteofen notwendig sein. Ein weiterer Punkt, der gegen eine Querfelderwärmung spricht, ist die unregelmäßige Geometrie von Formplatinen. Bei Bändern mit gleichmäßigen Querschnitt kann die Temperatur sehr genau eingestellt werden. Ändert sich beim Durchlauf der Querschnitt ständig, kann der Induktor nicht passend nachgeführt werden. Des Weiteren würden Löcher aufgrund der elektrischen Stromdichteverteilung im Werkstück zu Überhitzungen führen.

#### **4.1.2 Bewertung der Konzepte** **Evaluation of concepts**

Eine Durchlauferwärmung sowohl im induktiven Längsfelderwärmung als auch im Querfeld werden als Erwärmungskonzept nicht favorisiert. Aufgrund der kurzen Bauweise ist eine inhomogene Temperaturverteilung zu erwarten. Die Durchlauferwärmung benötigt daher ein Warmhalteaggregat. Dieses war nicht im Antrag vorgesehen. Aus technischer Sicht bedeutet ein Warmhalteaggregat außerdem zusätzliche Energie, die aufgewandt werden muss, neben den zusätzlichen Anschaffungskosten.

Die Querfelderwärmung scheidet aufgrund der stark unregelmäßigen Formen der Bauteile und den Löchern aus. Beides führt zu starken Temperaturunterschieden.

In diesem Projekt wird daher das Konzept der induktiven Längsfelderwärmung im Standbetrieb verfolgt. Die beschriebenen Nachteile der anderen Konzepte treten nicht auf. Neben einer angepassten Induktorgeometrie an die Platinenform ist dabei auch die Erzeugung von gradierten Temperaturprofilen möglich.

#### **4.1.3 Gradierte Temperaturprofile** **Graded temperature profiles**

Für crashrelevante Bauteile kann eine unterschiedliche Härte von Vorteil sein. Weichere Teile können mehr Energie absorbieren, härtere Bauteile hingegen geben der Karosserie die Festigkeit. Zonen unterschiedlicher Härte werden durch Unter- bzw. Überschreiten der AC3-Temperatur erreicht (Abbildung 4-1).



Abbildung 4-1: (a) Prinzip gradierter Temperaturverteilung (b) Gradiente Temperaturverteilung am Beispiel einer B-Säule

Figure 4-1: (a) Principle of graded temperature distribution (b) Graded temperature of a B-pillar

Die induktive Erwärmung bietet die Möglichkeit einen gradierten Temperaturverlauf zu erzielen. Mögliche Konzepte werden im Folgenden vorgestellt:

Ein Teil des Induktors wird mit einem Magnetfeldkonzentratoren bestückt (Abbildung 4-2 (a)). Der Magnetfeldkonzentrator kanalisiert das elektromagnetische Feld, wodurch an diesen Stellen eine höhere magnetische Feldstärke im Werkstück entsteht und dieser Teil des Werkstücks stärker erwärmt wird.

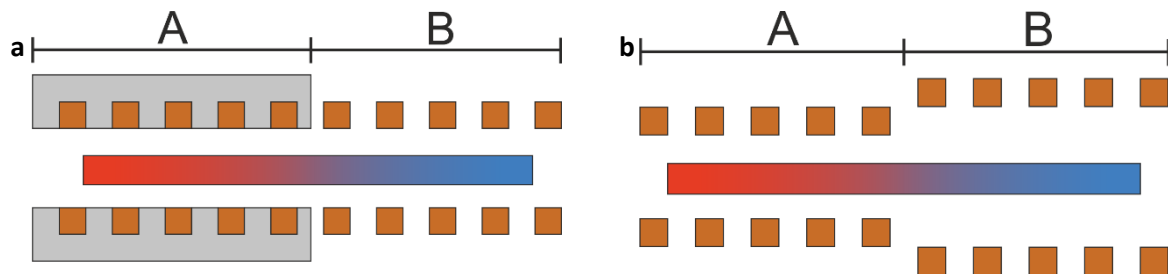


Abbildung 4-2: (a) Mit Magnetfeldkonzentratoren, (b) Unterschiedlicher Koppelabstand

Figure 4-2: (a) With magnetic flux concentrators, (b) Different air gap

Durch einen unterschiedlichen Koppelabstand (Abbildung 4-2 (b)) unterscheidet sich die induzierte Stromdichte in Bereich A und B, da bei größerem Abstand weniger magnetisches Feld vom Werkstück absorbiert wird.

Die Vergrößerung des Abstands zwischen den Windungen (Abbildung 4-3 (a)) erzielt ein ähnliches Ergebnis. Durch diese Art lassen sich gut mehrere warme und kalte Zonen nebeneinander erzeugen. Soll eine warme und eine kalte Zone erzeugt werden, wie in Abbildung 4-2 (b), ist dieses Verfahren nicht geeignet.

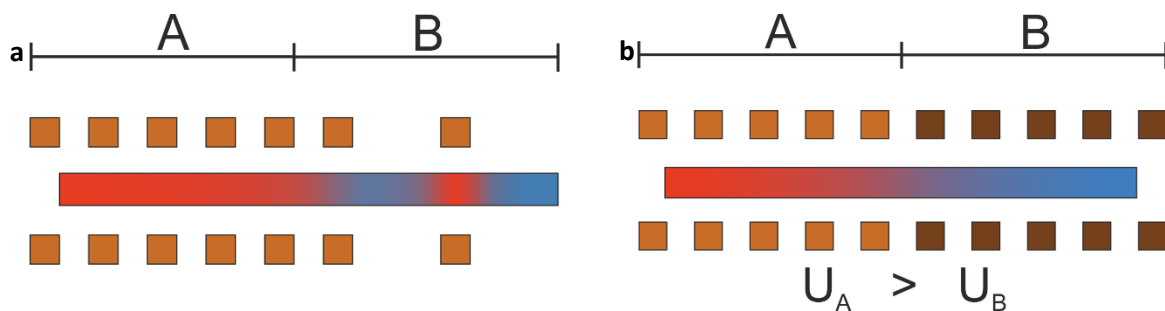


Abbildung 4-3: (a) Vergrößerung des Windungsabstands, (b) Zwei unterschiedliche elektrische Spannungen

Figure 4-3: (a) Enlargement of the distance of the windings, (b) Two different voltages

Eine vierte Möglichkeit ist in Abbildung 4-3 (b) dargestellt. In diesem Fall werden zwei elektrisch getrennte Induktoren eingesetzt und an unterschiedliche Energiequellen angeschlossen. Dadurch kann für jede Spule getrennt die Leistung eingestellt werden. Dadurch können auf beiden Seiten beliebige Temperaturen eingestellt werden, die wie in allen Fällen durch eine kontinuierliche Übergangszone verbunden sind.

Den vier Verfahren ist gleich, dass sie nur so viel Energie einbringen, wie für den Prozess notwendig ist. Dadurch lässt sich Energie im Vergleich zu bestehenden Ofenverfahren, die mit Schirmung arbeiten, einsparen. Auch gegenüber Verfahren, die nach dem Presshärteprozess durch Wärmezufuhr ein Anlassen durchführen, wird Energie gespart. Des Weiteren gibt es auch ein Verfahren, welches unterschiedliche Abkühlraten in der Presse realisiert. Auch hier wird das komplette Bauteil vorher erwärmt. [Trö19][Nie18]

#### 4.1.4 Abschätzung des Leistungsbedarfs Estimation of power requirements

Bei der induktiven Erwärmung ist die Bestimmung der Masse des Bauteils sehr entscheidend für die Auslegung der Energieversorgung. Im Gegensatz zum konventionellen Ofenprozess, bei dem der ganze Ofen (Ausmauerung, Rollen, Isolation, Tragteile) erwärmt wird und sich somit hohe Verluste ergeben, wird bei der induktiven Erwärmung nur das Bauteil erwärmt. Mit der spezifischen Wärmekapazität, der Dichte und dem Volumen lässt sich die notwendige Energie bestimmen, die benötigt wird, um das Bauteil um die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zu erwärmen. Die Formel dazu lautet:

$$Q = c_p \cdot \rho_d \cdot V \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

Die vorliegenden Bauteile haben eine Masse von 3-10 kg. Die mittlere spezifische Wärmekapazität beträgt 700 J/Kg K. Dafür wird eine Energie im Bereich von 1,97-6,5 MJ benötigt, um eine Temperaturdifferenz von 930 K zu erzielen. Für eine Erwärmungszeit von 20 s wird eine Leistung zwischen 100-350 kW benötigt, abhängig von der Masse des Bauteils. In dieser Leistung sind keine Wärmeverluste berücksichtigt.

## 4.2 Erstellung von angepassten und effizienten Simulationsmodellen Creation of adapted and efficient simulations

Auf Grundlage der Klassifizierung wurden zwei- und dreidimensionale numerische Modelle entworfen. Der numerische Berechnungsablauf folgt der Darstellung in Abbildung 4-4. Im ersten Schritt werden die Parameter, wie Koordinaten, Materialeigenschaften und Vernetzungsdichte eingelesen. Anschließend wird daraus die Geometrie und die Vernetzung generiert. Im ersten Teil des Lösungsprozesses wird eine harmonische elektromagnetische Berechnung durchgeführt. Das Ergebnis der elektromagnetischen Berechnung, also die Leistungsdichteverteilung, dient der folgenden thermisch transienten Berechnung als Eingangsgröße. Daraus wird über den Zeitschritt  $\Delta t$  das Temperaturfeld berechnet, welches im nächsten Berechnungsschritt die Eingangsgröße für die elektromagnetische Berechnung ist.

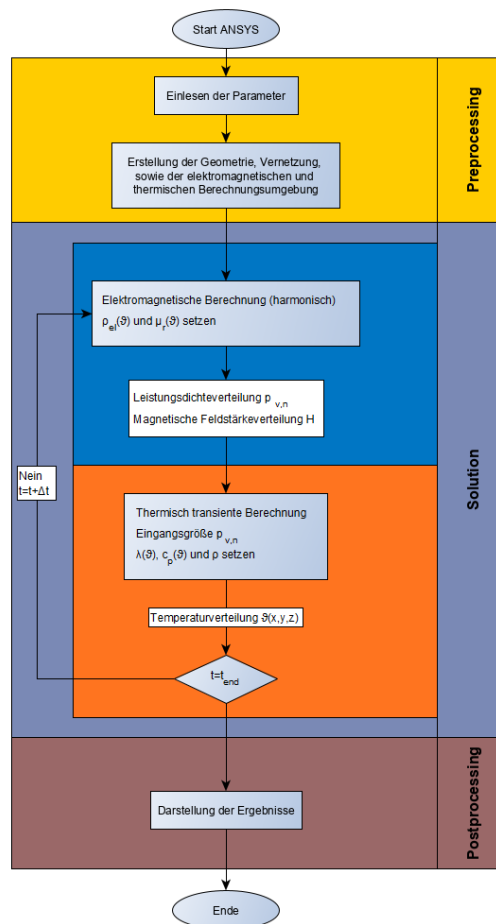


Abbildung 4-4: Ablauf der elektromagnetisch thermisch gekoppelte numerischen Berechnung  
Figure 4-4: calculation procedure of the electromagnetic thermal coupled numerical calculation

Für die Untersuchung gradierter Temperaturprofile wird ein 2-dimensionales numerisches Modell entwickelt. Da nur in zwei Ebenen modelliert wird, liegt die Anzahl der Elemente, die aufgrund der Vernetzung entstehen, deutlich unter 100.000. Dadurch

ergeben sich Rechenzeiten von unter 60 s für einen Zeitschritt. Mit diesem Modell lassen sich die vorgestellten Konzepte elektromagnetisch als auch thermisch untersuchen. In dem Modell sind zwei Spulen implementiert, sodass der Koppelspalt für jede Spule getrennt eingestellt werden kann bzw. unterschiedliche Spannungen eingepreßt werden können. Auch Parameter wie Windungszahl, Breite der Windungen, Abstand der Windungen, Induktorstrom und zusätzliche Magnetfeldkonzentratoren können für jede Spule getrennt eingestellt werden.

Die unterschiedlichen Merkmale des Bauteilspektrums, wie Löcher und Aussparung, werden in zwei dreidimensionalen numerischen Modellen abgebildet, um die verschiedenen Effekte zu untersuchen. Die Modelle sind so ausgelegt, dass sie flexibel auf die unterschiedlichen geometrischen Unstetigkeiten angepasst werden können. Insbesondere unterschiedliche Formen und Größen eines Lochs können durch das Modell nachgebildet werden.

Des Weiteren wurde ein 3-dimensionales numerisches Modell zur Untersuchung der Effekte an den Blechkanten und -enden entwickelt. Die Höhe, Breite und Länge des Induktors können variiert werden und so der Einfluss auf den elektrischen Wirkungsgrad und die Temperaturverteilung betrachtet werden. Die Untersuchung der Randeffekte ist wichtig, um einschätzen zu können, mit welchem Temperaturunterschied in diesem Bereich zu rechnen ist. Bei den drei numerischen Modellen wird eine manuelle Vernetzung mit quaderförmigen Elementen durchgeführt, um eine möglichst geringe Anzahl von Elementen zu erhalten. Dieses wirkt sich positiv auf die Rechenzeit auf.

Aufgrund der Separierung der verschiedenen geometrischen Besonderheiten in einzelne numerische Modelle können eine Vielzahl von Berechnungen in einem vertretbaren zeitlichen Umfang durchgeführt werden. Des Weiteren wird durch die Separierung die Überlagerung von Effekten deutlich reduziert. Daneben kann die Überlagerung von Effekten aber auch bewusst vorgenommen werden (Loch-Kante).

Für das Demonstratorbauteil (Abbildung 4-5) wurde ein 3-dimensionales numerisches Modell für eine halbe B-Säule entwickelt. Dabei sind Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen eingeflossen. Aufgrund der Erkenntnisse bzgl. Löchern und Aussparungen wurde darauf verzichtet, diese zu modellieren. Dadurch ergibt sich eine deutliche Zeitersparnis bei der Erstellung. Außerdem kann eine vereinfachte Geometrie leichter und mit weniger Elementen vernetzt werden, wodurch sich die Rechenzeit verringert.

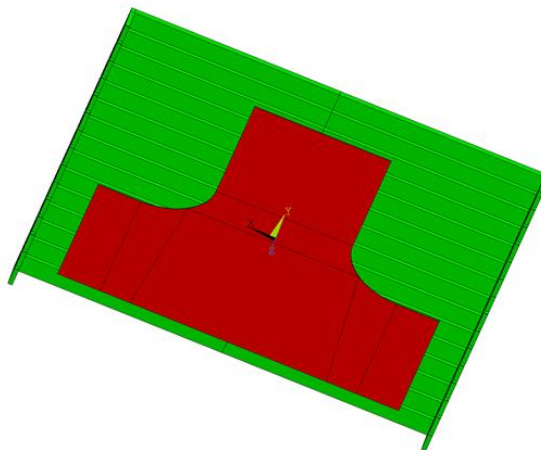


Abbildung 4-5: Numerisches Modell für das Demonstratorbauteil

Figure 4-5: Numerical model of the demonstrator component

Bei allen Modellen wurde eine Halbsymmetrie genutzt, wodurch sich die Anzahl der zu berechnenden Gleichungen halbiert. Die Materialparameter spezifischer elektrischer Widerstand, relative Permeabilität, spezifische Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität sind als temperaturabhängige Größen hinterlegt. Die relative Permeabilität ist temperatur- und feldstärkeabhängig implementiert.

### **4.3 Voruntersuchung verschiedener Effekte** **Preliminary investigation on various effects**

#### **4.3.1 Kanten und Endeffekte** **Edges and end effects**

Bei der induktiven Erwärmung beeinflusst die Lage des Werkstücks zum Induktor die Temperaturverteilung im Werkstück. Bei der induktiven Längsfelderwärmung ist insbesondere die Temperaturverteilung an den seitlichen Kanten und den Enden des Werkstücks von der Position des Werkstücks zum Induktor abhängig. Zur Untersuchung der Temperaturverteilung an den äußeren Kanten einer Platine wurde ein 3-dimensionales numerisches Modell entworfen. Das Werkstück wurde als rechteckige Platine modelliert. Die Frequenz der Wechselspannung beträgt 400 kHz. Die Spannung wird so angepasst, dass eine Zieltemperatur von 950 °C im regulären Bereich nach 20 s erreicht wird. Die Blechbreite beträgt 540 mm. Der Induktor hat eine Länge von 520 mm mit 15 Windungen, die einen Abstand von 5 mm haben. Diese Werte sind bei alle numerischen Berechnungen in diesem Abschnitt fixiert. Im Folgenden wird die Blechlänge, der horizontale und vertikale Koppelabstand als variable Parameter gesetzt. Eine Änderung des horizontalen Koppelabstands kann mit einer Änderung der Blechbreite gleichgesetzt werden. Prinzipiell kann der Rand eine höhere oder niedrigere Temperatur als im regulären Gebiet aufweisen. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt nach dem in Abbildung 4-6 dargestellten Schema. Die Temperaturverteilung wird in der jeweiligen Symmetrieachse und den Kanten ausgewertet.

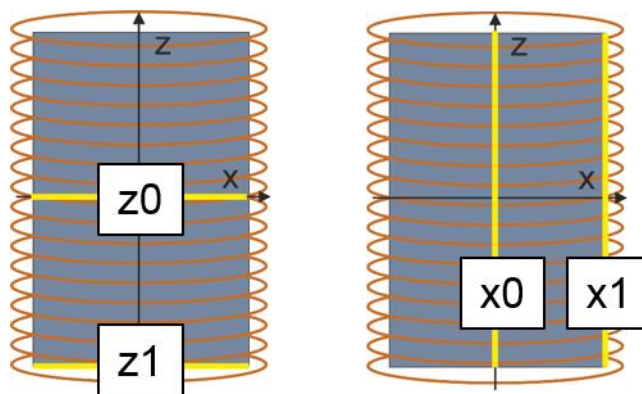


Abbildung 4-6: Auswertungsschema  
 Figure 4-6: Pattern of evaluation

### 4.3.2 Variation der Blechlänge Variation of sheet length

Das Bauteilspektrum im Presshärteprozess umfasst Bauteile unterschiedlicher Länge. Für einen vielseitig einsetzbaren Induktor ist sicher zu stellen, dass eine möglichst große Anzahl an unterschiedlichen Bauteilen mit ihm erwärmt werden kann. Daher wird untersucht, ob und gegebenenfalls welche Überlänge gegenüber der Platine der Induktor haben muss, um eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung zu garantieren. Der Koppelabstand ist auf 15 mm festgesetzt.

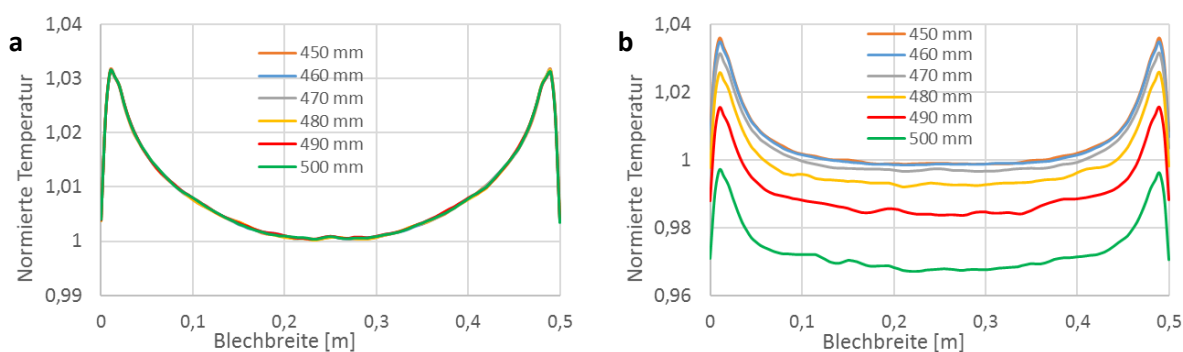


Abbildung 4-7: (a) Temperatur in der Blechmitte, (b) Temperatur am Blechende  
 Figure 4-7: (a) Temperature in middle of the sheet, (b) Temperature at the end of the sheet

Die Temperaturverteilung entlang der  $z_0$  Koordinate in  $x$ -Richtung (Abbildung 4-7 (a)) wird nicht von der Länge der Platine beeinflusst. Bei  $z_1$  (Abbildung 4-7 (b)) ist ein deutlicher Einfluss zu erkennen. Umso näher die Blechenden an das Ende des Induktors rücken, desto geringer ist die Temperatur wegen des dort abnehmenden magnetischen Feldes. Außerdem ist zu beobachten, dass bei einer Blechlänge von 480 mm und weniger die Auswirkung minimal sind. D.h. für eine Erwärmung von

Bauteilen muss ein Mindestabstand von 20 mm an beiden Enden eingehalten werden. Dann ergibt sich ein Temperaturprofil nahezu wie bei z0.

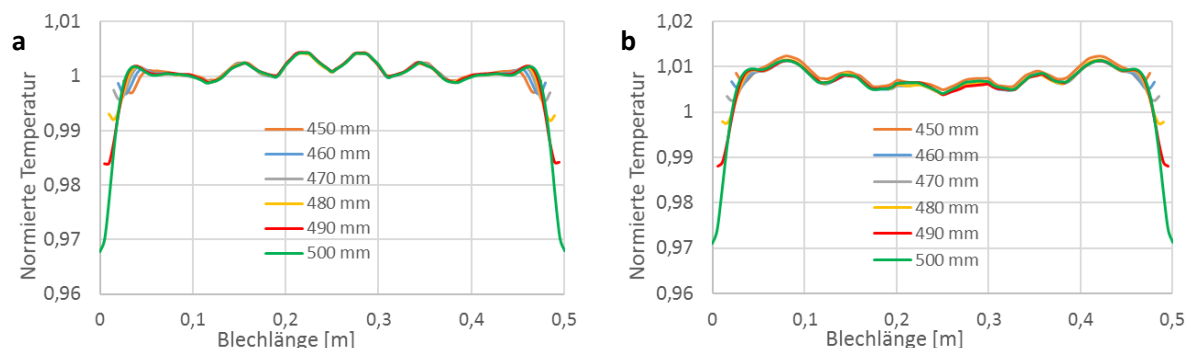


Abbildung 4-8: (a) Temperatur in der Blechmitte, (b) Temperatur an der Blechkante

Figure 4-8: (a) Temperature in middle of the sheet, (b) Temperature at the edge of the sheet

Eine Auswirkung der Änderung der Länge des Bauteils auf das Temperaturprofil in z-Richtung ergibt sich nur in den Bereichen 0 mm – 50 mm und 450 mm – 500 mm (Abbildung 4-8). In diesen Bereichen gibt es einen maximalen Temperaturunterschied von 4 % bei einer Blechlänge von 500 mm. Im regulären Bereich, also dazwischen, wirkt sich die Änderung der Länge des Bauteils nicht aus.

### 4.3.3 Horizontaler Koppelspalt Horizontal air gap

Der Koppelabstand ist eine wichtige Größe im induktiven Erwärmungsprozess. Er beeinflusst den elektrischen Wirkungsgrad und die Temperaturverteilung. In diesem Abschnitt wird der Einfluss auf die Temperaturverteilung untersucht. Die Vergrößerung des horizontalen Koppelabstands verursacht eine geringere Überhitzung des Kantenbereichs. Sie sinkt von knapp 6 % auf 3,5 % ab. Dieses gilt für Abbildung 4-9 (a) und Abbildung 4-9 (b). Der Grund dafür ist, dass aufgrund des größeren Abstands des senkrechten Teils des Induktors weniger Einfluss hat.

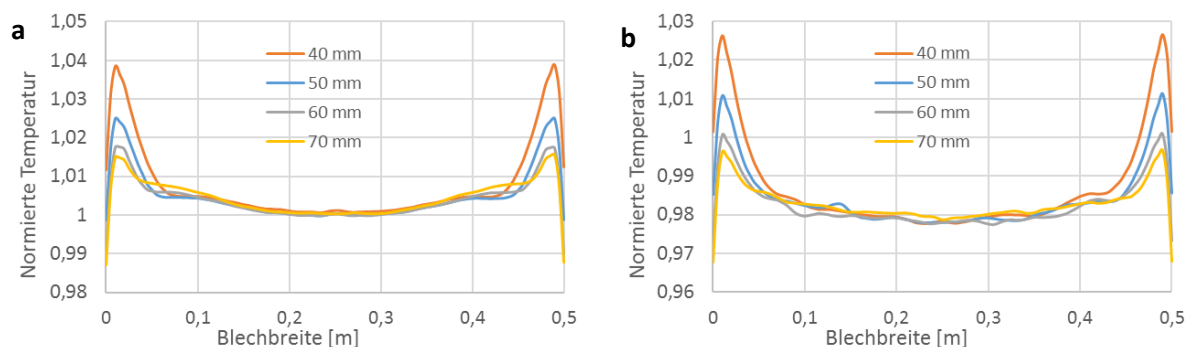


Abbildung 4-9: (a) Temperatur in der Blechmitte, (b) Temperatur am Blechende

Figure 4-9: (a) Temperature in middle of the sheet, (b) Temperature at the end of the sheet



An der Stelle  $x_0$  (Abbildung 4-10 (a)) hat der Koppelabstand keinen Einfluss auf die Temperaturverteilung. Die Ripfel ergeben sich aufgrund des Abstands der Windungen. In Abbildung 4-10 (b) ist die Temperaturverteilung entlang der Blechkante an Position  $x_1$  dargestellt. Mit zunehmenden Koppelabstand nimmt die leichte Überhitzung in Kantennähe ab. Bei 70 mm Koppelabstand ist sie nicht mehr zu erkennen. Auch das Temperaturniveau sinkt.

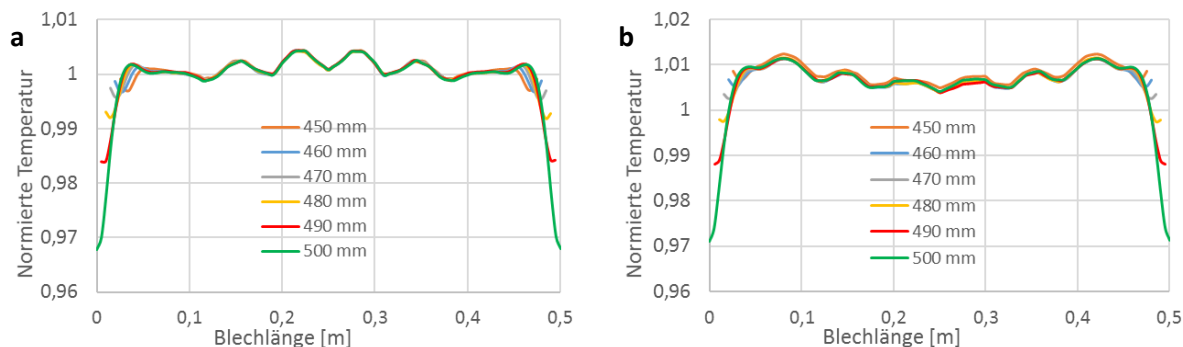


Abbildung 4-10: (a) Temperatur in der Blechmitte, (b) Temperatur an der Blechkante

Figure 4-10: (a) Temperature in middle of the sheet, (b) Temperature at the edge of the sheet

#### 4.3.4 Vertikaler Koppelspalt Vertical air gap

Der vertikale Koppelabstand spiegelt die halbe Bauhöhe des Induktors wieder. Muss eine Isolierung oder ein Transportsystem innerhalb des Induktors installiert werden, wodurch sich die Bauhöhe ändert, ist die Auswirkung der Änderung des vertikalen Koppelabstands auf die Temperaturverteilung zu untersuchen. Der horizontale Koppelabstand wird mit 20 mm festgelegt. Die Länge beträgt 490 mm.

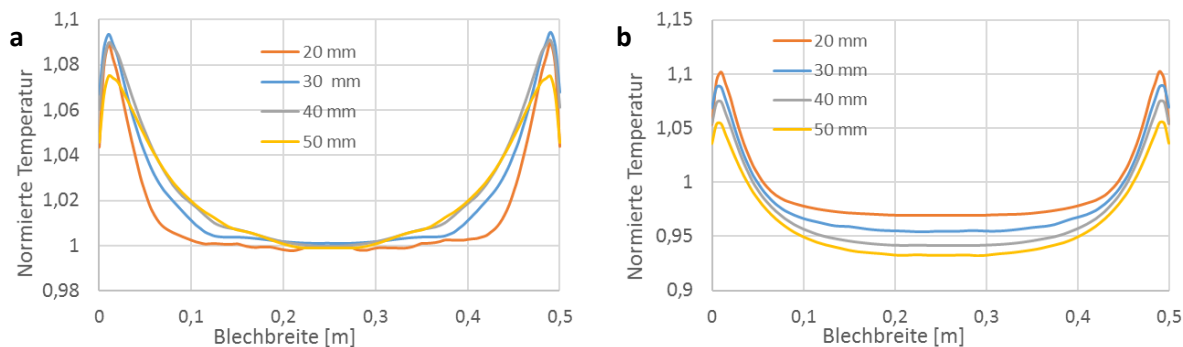


Abbildung 4-11: (a) Temperatur in der Blechmitte, (b) Temperatur am Blechende

Figure 4-11: (a) Temperature in middle of the sheet, (b) Temperature at the end of the sheet

Das Temperaturprofil an Position  $z = 0$  mm wird vom vertikalen Luftspalt beeinflusst (Abbildung 4-11 (a)). Mit zunehmendem Luftspalt wird die homogene Zone kleiner und die Form der Kurve glatter. Aufgrund der Erhöhung des Abstands zwischen der Platine

und dem horizontalen Teil der Induktionsspule wird die Kopplung schwächer. Die Temperatur am Ende der Platine ist in Abbildung 4-11 (b) dargestellt. Ein größerer vertikaler Luftspalt führt zu einer niedrigeren Temperatur am Ende der Platine aufgrund eines schwächeren Magnetfelds in diesem Bereich. Abbildung 4-12 (a) zeigt, dass eine Änderung des vertikale Koppelspant auf die Temperatur am Blechende wirkt. Die Temperatur an den Blechkanten (Abbildung 4-12 (b)) nimmt mit zunehmenden vertikalen Koppelspalt ab.

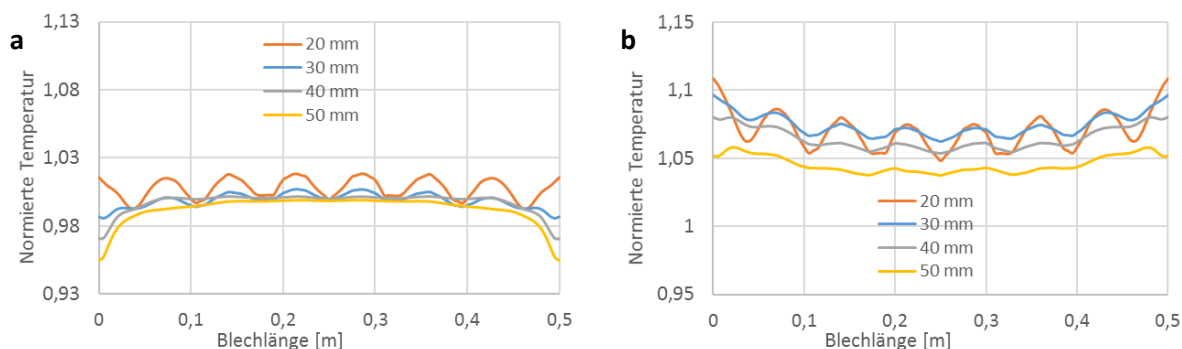


Abbildung 4-12: (a) Temperatur in der Blechmitte, (b) Temperatur an der Blechkante

Figure 4-12: (a) Temperature in middle of the sheet, (b) Temperature at the edge of the sheet

#### 4.3.5 Löcher und Aussparungen Holes and block outs

Viele Formplatine des Bauteilspektrums weisen unterschiedliche Formen und Größen von Löchern auf. Aus elektrischer Sicht ist ein Loch ein nicht überwindbares Hindernis, sodass dort kein Strom fließt. Daher muss der elektrische Strom, der in den gekennzeichneten Bereichen (Abbildung 4-13 (a)) fließt, einen anderen Weg nehmen. Eine Möglichkeit besteht darin, dass der elektrische Strom an den Seiten des Lochs vorbeifließt und sich Hotspots bilden (Abbildung 4-13 (b)).

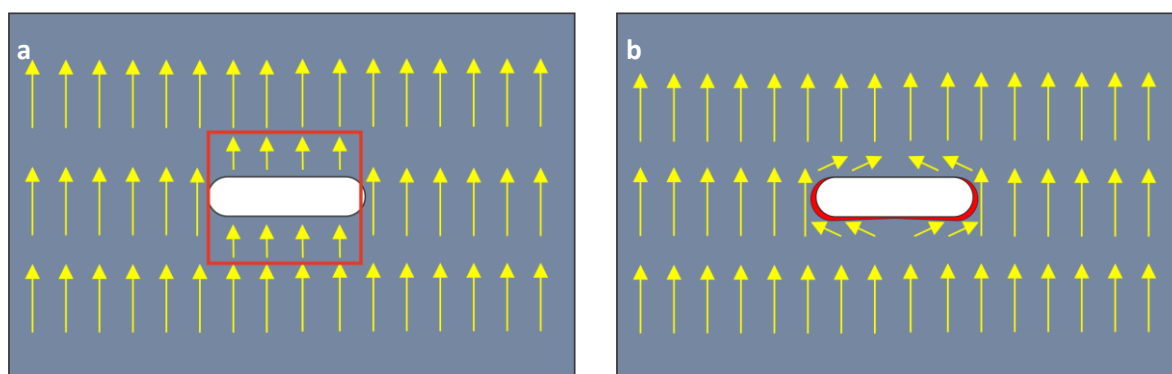


Abbildung 4-13: (a) Darstellung der Problematik aus elektrischer Sicht, (b) Mögliche Erklärung

Figure 4-13: (a) Problem from an electrical point of view, (b) Possible explanation

Zur Vermeidung der Hotspots könnte eine Metallscheibe in Lochgröße eingebracht werden. Der Strom würde dann den regulären Weg nehmen. Hierbei müsste die

Metallscheibe exakt in das Loch passen, um eine gleichmäßigen Stromfluss zu gewährleisten.

Zur Untersuchung der Auswirkung eines Lochs wurde ein numerisches Modell entwickelt. Ein 2-dimensionales numerisches Modell kann die möglichen Hotspots nicht abbilden, weshalb ein 3-dimensionales Modell erstellt wurde. Abbildung 4-14 (a) zeigt das Modell in Ansys Mechanical. Der rote Bereich stellt das Blech da, der Induktor ist grün. Abbildung 4-14 (b) zeigt mögliche Parameter, die variiert werden können. Insbesondere wurde bei der Erstellung des Modells auf eine freie Positionswahl des Lochs Wert gelegt.

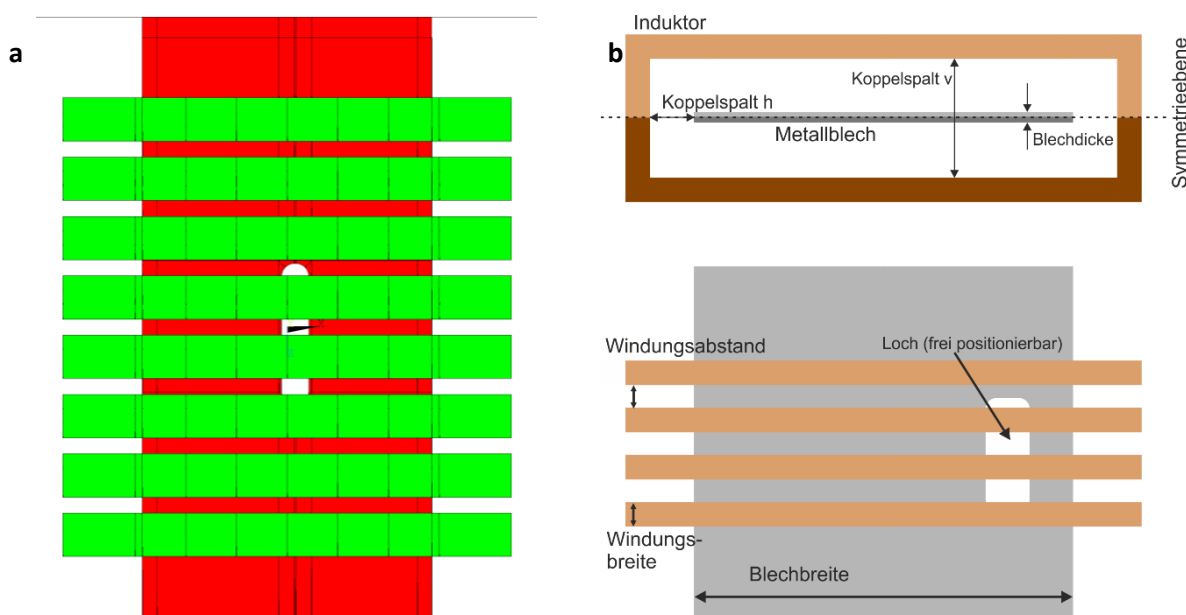


Abbildung 4-14: (a) Numerisches Modell, (b) Modellparameter

Figure 4-14: (a) Numerical model, (b) Parameter of the model

Außerdem ist die Breite und Länge als auch der Radius der Ecke frei wählbar, sodass ein Großteil der Lochformen aus dem Bauteilspektrum abgebildet werden kann.

Für die numerische Berechnung der Verteilung der unterschiedlichen physikalischen Größen an einem Loch wird das in Abbildung 4-14 (a) dargestellte Modell verwendet. Die Ergebnisse der Berechnung zeigt Abbildung 4-15. Zuerst werden die Ergebnisse der elektromagnetischen Berechnung betrachtet. Da der Induktor aus mehreren Windungen besteht, ergibt sich ein Streifenmuster der magnetischen Feldstärke. Unterhalb der Windungen des Induktors ist die Feldstärke größer als zwischen den Windungen, da der Abstand geringer ist. Dieses Streifenmuster ist folglich auch in der Leistungsdichteverteilung (Joule Heat) zu erkennen. Diese Verteilung ist die Ausgangsgröße der elektromagnetischen Berechnung und Eingangsgröße für die thermische Berechnung. An den Kanten, die mit A bezeichnet sind, zeigt sich ein geringerer Leistungseintrag, im Gegensatz zu den mit B bezeichneten Kanten, an denen eine höhere Leistung eingetragen wird.

Die Berechnung der Temperaturverteilung erfolgt aus der Leistungsdichteverteilung. Dabei ergeben sich wärmere Stellen unterhalb des Induktors. Die Temperatur entlang

des Lochrandes zeigt eine sehr gleichmäßige Temperatur. Wie bereits aus der elektromagnetischen Berechnung zu erwarten, ist die Temperatur im Bereich A niedriger als im Bereich B. Insgesamt ergibt sich ein Temperaturunterschied von 40 K

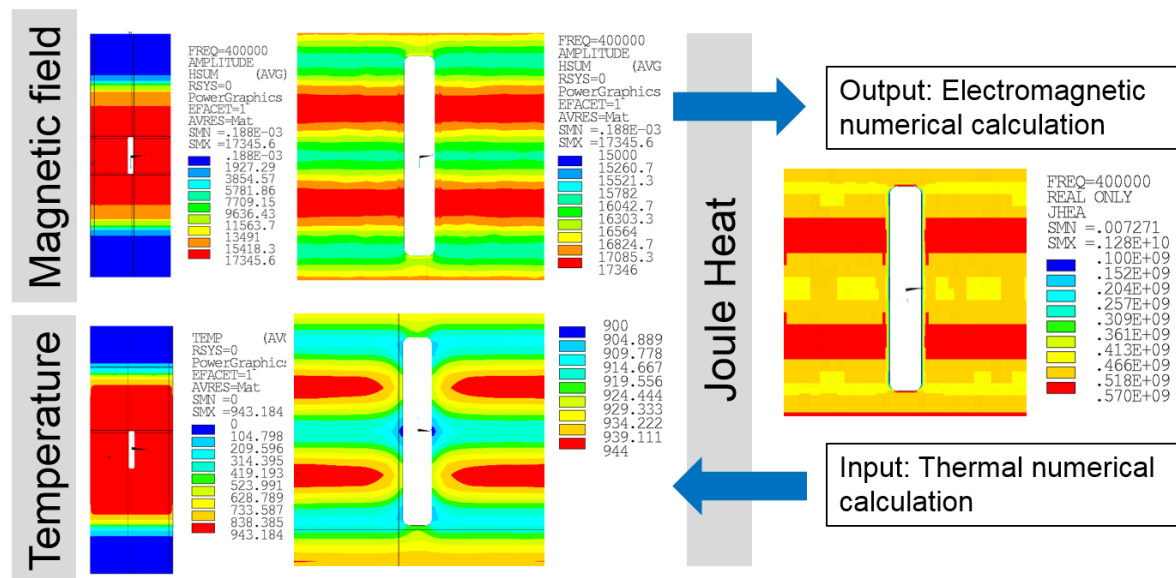


Abbildung 4-15: Konturdarstellung verschiedener physikalischer Größen an einem Loch

Figure 4-15: Contour plot of physical values on a hole

Auf der in Abbildung 4-15 gezeigten Verteilung der Temperatur wird ersichtlich, dass eine Überhitzung der Ränder des Lochs nicht stattfindet. Die oben aufgestellte Vermutung, dass der elektrische Strom am Loch vorbeifließt, hat sich nicht bewahrheitet. Die Vektordarstellung (Abbildung 4-16) der Stromdichte gibt Aufschluss über das Fließverhalten des Stromes. Der Bereich A, also die Kante senkrecht zum Stromfluss wird nicht überhitzt. Der Strom fließt an der Kante herunter und auf der anderen Blechseite wieder zurück, wie die Skizze in Abbildung 4-16 zeigt. Der Bereich B zeigt, dass dort die Stromdichte nicht erhöht ist. An der oberen Kante ist die Stromdichte aufgrund des Skin-Effekts höher als im unteren Kantenbereich, die die Symmetrieebene darstellt.

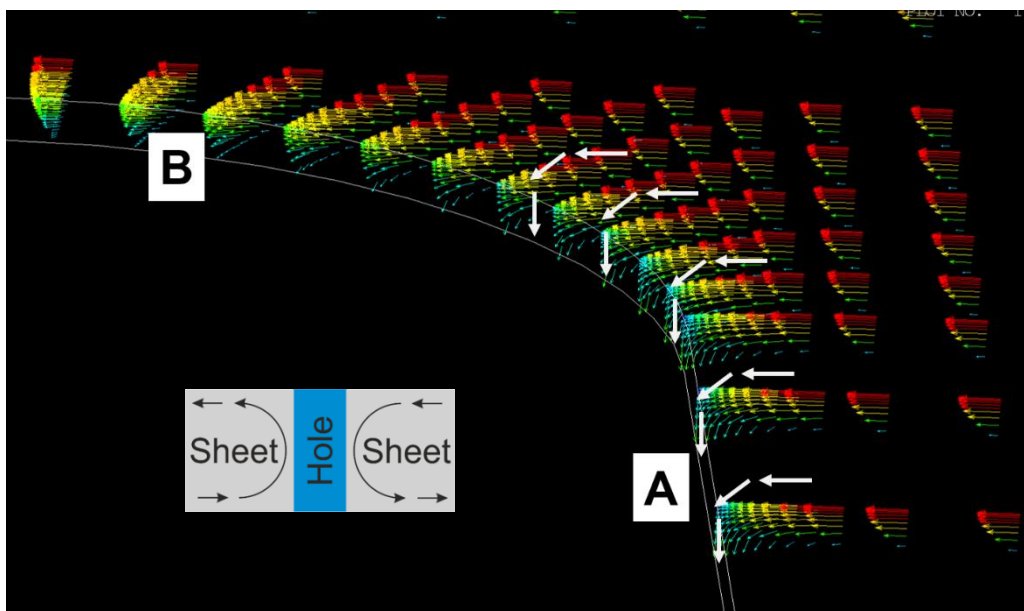


Abbildung 4-16: Vektorielle Darstellung der Stromdichte  
 Figure 4-16: Vector plot of current density

#### 4.3.5.1 Unterschiedliche Lochgrößen und -formen Different hole sizes and shapes

In diesem Abschnitt wird gezeigt, welche Auswirkung die Größe und Form eines Lochs auf das Temperaturprofil hat. Aus dem Bauteilspektrum wurden 5 unterschiedliche Löcher ausgewählt, die die obere und untere Grenze bei der Größe der Löcher bilden.

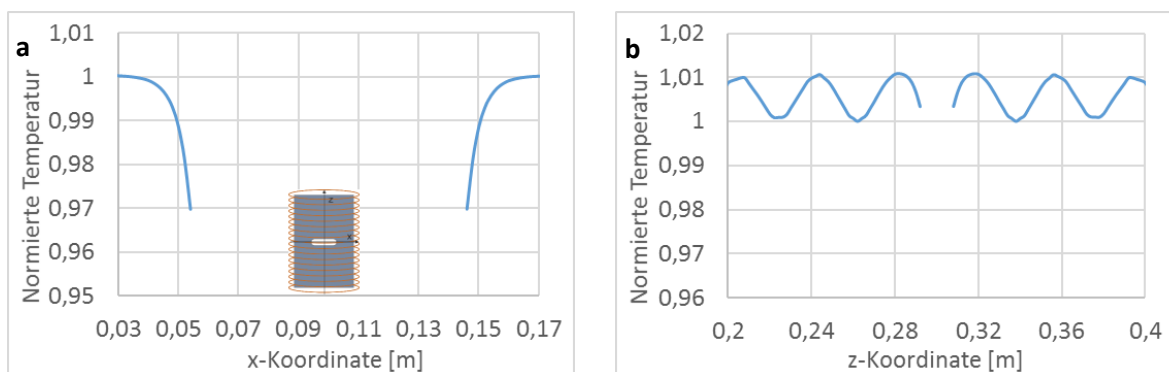


Abbildung 4-17: (a) Temperaturverteilung in x-Richtung (96x16 mm, r=8 mm), (b) Temperaturverteilung in z-Richtung

Figure 4-17: (a) Temperature profile in x-direction, (b) Temperature profile in z-direction

Bisher wurde nur ein zum Induktorstrom senkrecht liegendes Loch betrachtet. In Abbildung 4-17 ist das Loch parallel zu den Induktorwindungen positioniert und hat das Abmaß 96 mm x 16 mm. An den Rändern in x-Richtung (Abbildung 4-17 (a)) fällt die Temperatur um 3 % ab. In z-Richtung (Abbildung 4-17 (b)) ergibt sich wieder ein

welliger Temperaturverlauf. Da der Abstand der Windungen sehr gering ist, ändert sich die Temperatur nur um 1 %.

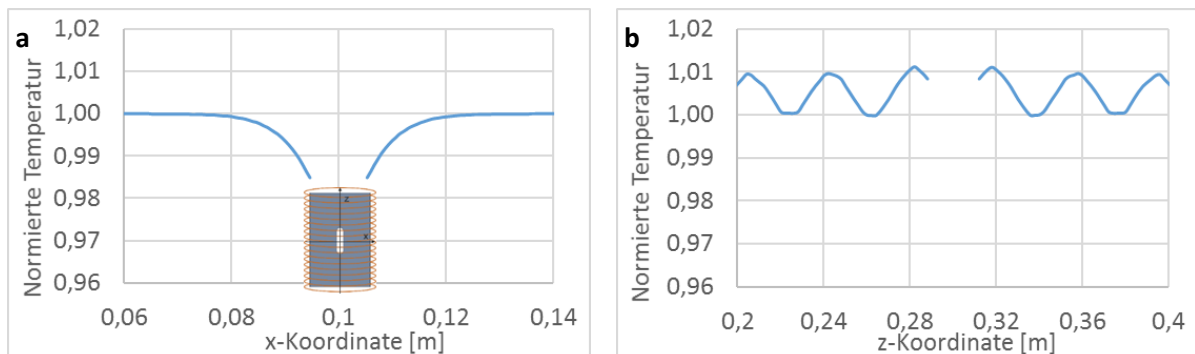


Abbildung 4-18: (a) Temperaturverteilung in x-Richtung (10x24 mm,  $r=2,4$  mm), (b) Temperaturverteilung in z-Richtung

Figure 4-18: (a) Temperature profile in x-direction, (b) Temperature profile in z-direction

Das untersuchte Langloch in Abbildung 4-18 bildet den unteren Bereich bei der Größe der Löcher ab. Das Temperaturprofil in x-Richtung hat einen Temperaturabfall von 2,5 % bezogen auf die maximale Temperatur (Abbildung 4-18 (a)). Die Temperaturverteilung in z-Richtung weist den typischen welligen Verlauf auf (Abbildung 4-18 (b)).

Das obere Ende im Bauteilspektrum bildet ein rechteckiges Loch. Die Breite beträgt 36 mm und die Länge 108 mm. Die Temperaturverteilung in x-Richtung (Abbildung 4-19 (a)) fällt um 5,3 % bezogen auf die maximale Temperatur ab. In z-Richtung (Abbildung 4-19 (b)) ist wieder ein welliges Temperaturprofil zu sehen. Die Schwankung bewegt sich bei 1 %.

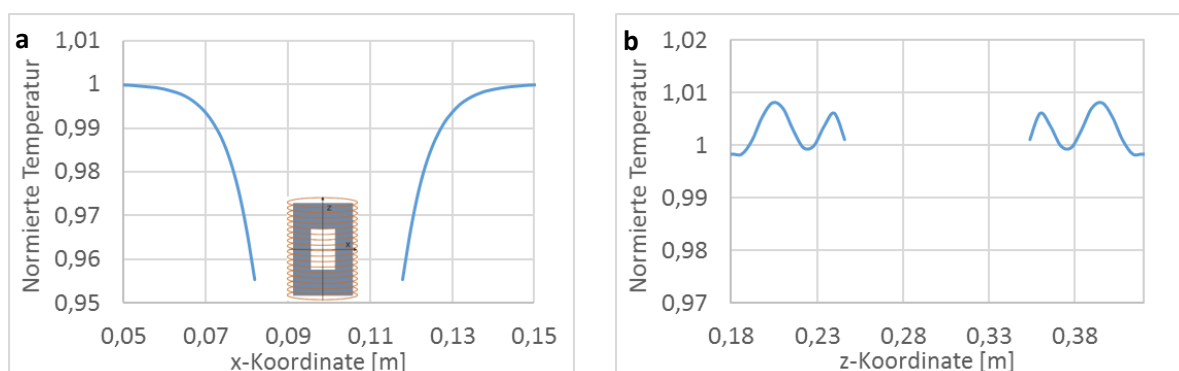


Abbildung 4-19: (a) Temperaturverteilung in x-Richtung (36x108 mm), (b) Temperaturverteilung in z-Richtung

Figure 4-19: (a) Temperature profile in x-direction, (b) Temperature profile in z-direction

Eine weitere häufig auftretende Form sind runde Löcher. Aus dem Bauteilspektrum wurde ein kleines und ein großes Loch ausgewählt. Die Temperatur entlang der x-Koordinate (Abbildung 4-20 (a)) hat einen Temperaturabfall von 1,5 % für das kleinere

Loch. Dieser quantitative Abfall war auch bei dem Langloch in Abbildung 4-18 (a) zu sehen. Der Temperaturabfall für das größere Loch ist qualitativ gleich, fällt aber um 2,5 % ab. Auf Abbildung 4-20 (b) ist das Temperaturprofil in z-Richtung zu sehen. Hier ist zu bemerken, dass der Temperaturabfall des kleinen Lochs gegenüber dem größeren einen höheren Wert annimmt. Bei größeren Löchern fließt mehr elektrischer Strom vorbei, sodass eine höhere Leistungsdichte erzielt wird.

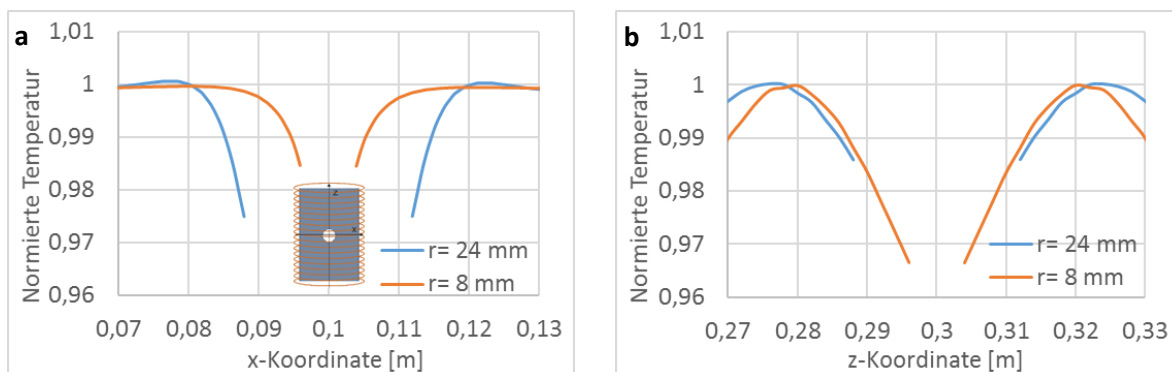


Abbildung 4-20: (a) Temperaturverteilung in x-Richtung (r=24 mm, r=8 mm), (b) Temperaturverteilung in z-Richtung

Figure 4-20: (a) Temperature profile in x-direction, (b) Temperature profile in z-direction

#### 4.3.5.2 Position eines Lochs Hole positioning

Die Position des Lochs wird in x-Richtung variiert. Das Diagramm der Temperaturverteilung entlang der x-Koordinate zeigt Abbildung 4-21 (a). Das Loch ist in drei Positionen verschoben. Die erste Position ist  $x = 0 \text{ mm}$  und  $z = 0 \text{ mm}$ , die zweite Position des Lochs ist 40 mm in positiver x-Richtung und für die dritte Position ist es um 80 mm verschoben.

Um den ein Einfluss auf die Temperaturverteilung zu zeigen, wurden die Kurven im Graphen (Abbildung 4-21 (a)) übereinandergelegt. Die Kurven bei Position  $x = 0 \text{ mm}$  und  $x = 40 \text{ mm}$  haben denselben Verlauf. Die Temperaturverteilung für das Loch bei  $x = 80 \text{ mm}$  hat auf der linken Seite das gleiche Temperaturverhalten wie die anderen. Rechts liegt die Temperatur niedriger, da die Nähe zur Kante sehr gering ist (10 mm). Die Temperatur am Lochrand ist um 3,4 % niedriger Wert. Wird eine Temperatur von  $950 \text{ }^\circ\text{C}$  erreicht, so sinkt die Temperatur am Rand um 32,3 K. Eine Auswirkung auf die Temperaturverteilung z-Richtung (Abbildung 4-21 (b)) ist nicht feststellbar.

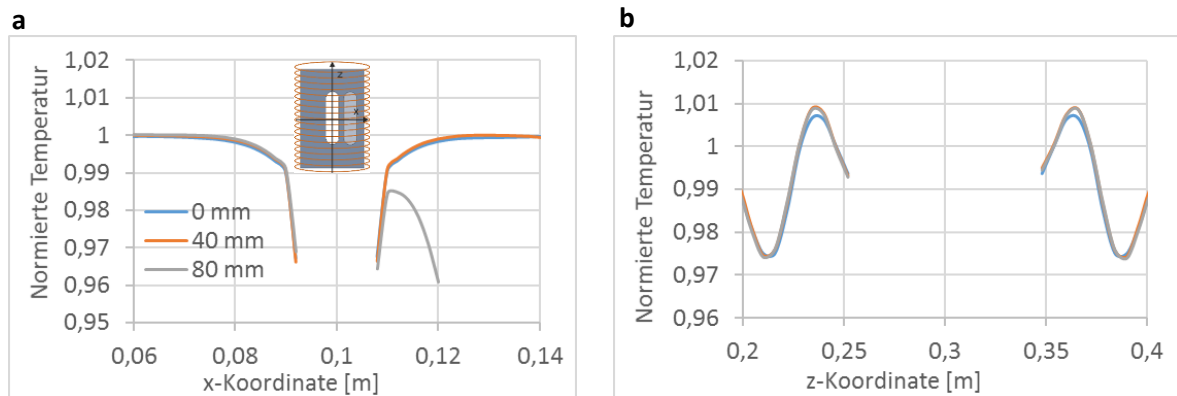


Abbildung 4-21: (a) Temperaturverteilung in x-Richtung, (b) Temperaturverteilung in z-Richtung  
Figure 4-21: (a) Temperature profile in x-direction, (b) Temperature profile in z-direction

#### 4.3.5.3 Aussparungen Block outs

Die Auswirkung der Größe einer Aussparung zeigen Abbildung 4-22 (a) und (b). Die Tiefe der Aussparung wurde von 10 mm bis 80 mm variiert. Um die Temperaturprofile besser vergleichen zu können, wurden sie übereinandergelagert. Die Temperaturverteilung in x-Richtung wird nicht von der Position der Aussparung beeinflusst. Die Temperatur sinkt am Rand und beträgt ca. 3,2 % weniger. Die Auswirkung der Position der Aussparung ist beim Temperaturprofil in z-Richtung nur sehr gering. Eine Aussparung kann auch als Querschnittsänderung betrachtet werden, wie es zum Beispiel bei einer B-Säule vorkommt.

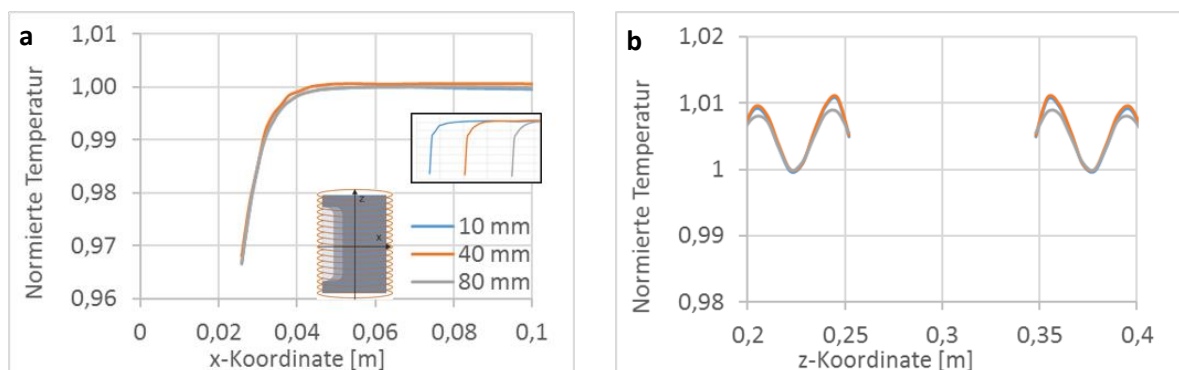


Abbildung 4-22: (a) Temperaturverteilung in x-Richtung, (b) Temperaturverteilung in z-Richtung  
Figure 4-22: (a) Temperature profile in x-direction, (b) Temperature profile in z-direction

#### 4.3.6 Gradierte Temperaturprofile Graded temperature profiles

Zur Untersuchung gradierter Temperaturprofile werden zwei der vier in Kapitel 4.1.3 vorgestellten Methoden ausgewählt. Die Änderung des Windungsabstands wird ausgeschlossen, weil dadurch ein ungleichmäßiges Temperaturbild auf der kälteren Seite erzeugt wird. Auch der Einsatz von magnetfeldführenden Materialien wird nicht



weiterverfolgt, da diese für hohe Frequenzen und in einer großflächigen Anwendung sehr teuer sind und dort thermische Verluste entstehen, wodurch eine Kühlung notwendig wird. Außerdem konnte durch eine Simulation gezeigt werden, dass ein maximaler Temperaturunterschied von 12 % erreicht werden kann (Abbildung 4-23). Daher werden die zwei Ansätze Änderung des Koppelspalts und zwei elektrisch getrennten Induktoren gewählt.

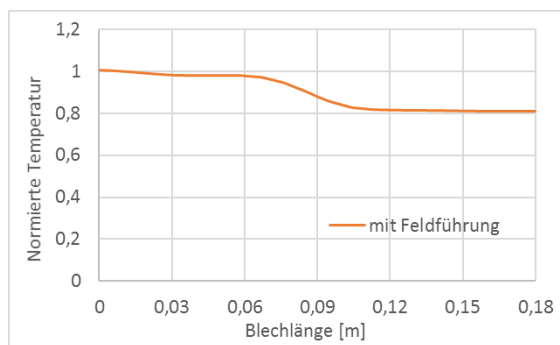


Abbildung 4-23: Darstellung der gradierten Temperaturverteilung, links der Bereich mit Feldführungselementen

Figure 4-23: Graded temperature distribution, left with magnetic flux concentrators

Durch Änderung des Koppelabstands wird die quantitative Magnetfeldabsorption im Werkstück beeinflusst. Um die Wirkung auf die Temperatur zu zeigen, wurde der Koppelabstand auf der linken Seite (Abbildung 4-24 (a)) von 20 mm bis 35 mm in 5 mm Schritte geändert. Dabei ist festzustellen, dass die Auswirkung auf das Temperaturniveau nicht linear verläuft. Mit zunehmenden Koppelspalt werden die Abstände der einzelnen Temperaturniveaus größer. Außerdem lässt sich beobachten, dass die Transferzone mit Vergrößerung des Koppelabstands auch wächst, wobei der Unterschied zwischen 30 mm und 35 mm gering ist. Die maximale Breite der Übergangszone beträgt 65 mm. Ein Induktor dieser Art kann nur für eine gradierte Temperaturverteilung eingesetzt werden, da festgelegt ist, welcher Teil der Spule einen größeren bzw. kleineren Koppelabstand hat. Von daher ist die Flexibilität eingeschränkt.

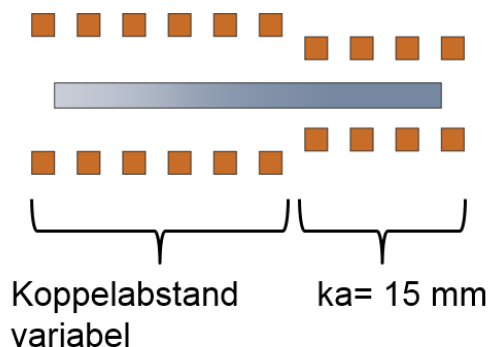
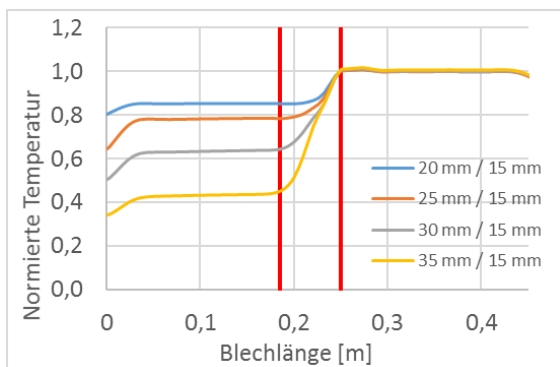


Abbildung 4-24: (a) Temperaturprofil bei unterschiedlichem Koppelspalt, (b) Skizze des Modells

Figure 4-24: (a) Temperature profile with different air gap, (b) Sketch of the model

Wie bereits festgestellt wurde, wird im produktiven Betrieb eine Anlage mit zwei Frequenzumrichtern notwendig sein, sofern die Bauteile entsprechend viel Masse haben. Daher wird auch diese Möglichkeit untersucht. Mit zwei Frequenzumrichtern kann der Induktor in zwei elektrisch isolierte Einheiten unterteilt werden, die jeweils mit einem Umrichter gespeist werden. Abbildung 4-25 zeigt das Ergebnis der numerischen Berechnung. Die Spannung wurde von 120 V bis 180 V in 20 V Schritten angepasst. Die Temperaturniveaus haben alle einen ähnlichen Abstand. Die Übergangszone beträgt auch hier maximal 65 mm.

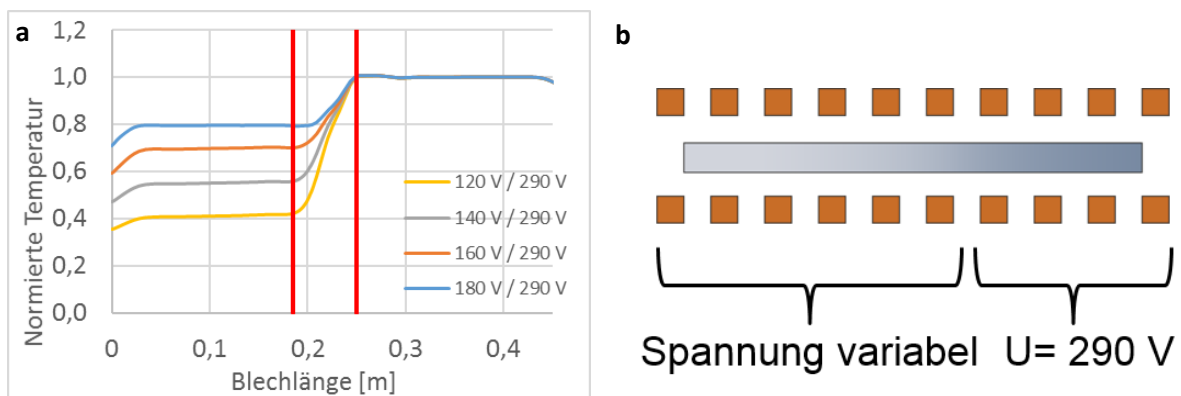


Abbildung 4-25: (a) Temperaturprofil bei unterschiedlicher elektrischer Spannung, (b) Skizze des Modells

Figure 4-25: (a) Temperature profile with different voltage, (b) Sketch of the model

Unter Berücksichtigung, dass eine produktive Anlage mit zwei Frequenzumrichtern betrieben werden muss, wurde eine 3-dimensionale numerische Berechnung mit unterschiedlichen Spannungsniveaus am Demonstratorbauteil durchgeführt. Die Leistungsdichte- und Temperaturverteilung ist für den ersten (Abbildung 4-26) und letzten Berechnungsschritt (Abbildung 4-27) dargestellt. Die Berechnung wird mit einer Frequenz von 400 kHz durchgeführt.

Entwicklung des induktiven Erwärmungsprozesses  
 Development of the inductive heating process

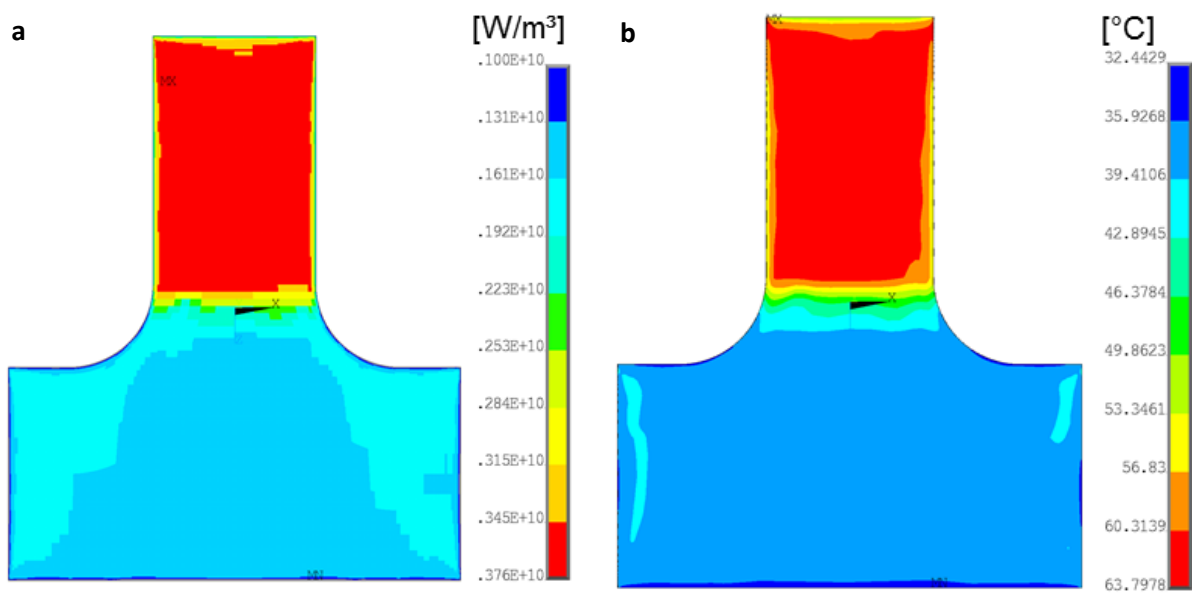


Abbildung 4-26: (a) Leistungsdichterverteilung;  $t=0,4s$ ;  $U_1=580\text{ V}$ ;  $U_2=280V$ , (b) Temperaturverteilung;  $t=0,4s$ ;  $U_1=580\text{ V}$ ;  $U_2=280V$

Figure 4-26: (a) Power density distribution,  $t=0,4\text{ s}$ , (b) Temperature distribution,  $t=0,4\text{ s}$

Die Leistungsdichte- und Temperaturverteilung sind nahezu identisch. Der Bereich mit der höheren Leistungsdichte weist auch die höhere Temperatur aus. Deutlich ist die Übergangszone zwischen warmen und kalten Bereich zu erkennen. Sie entsteht aufgrund der Wärmeleitfähigkeit des Materials. Der Temperaturabfall von der warmen zur kalten Seite ist daher immer kontinuierlich, wie auch in Abbildung 4-25 (a) zu erkennen ist.

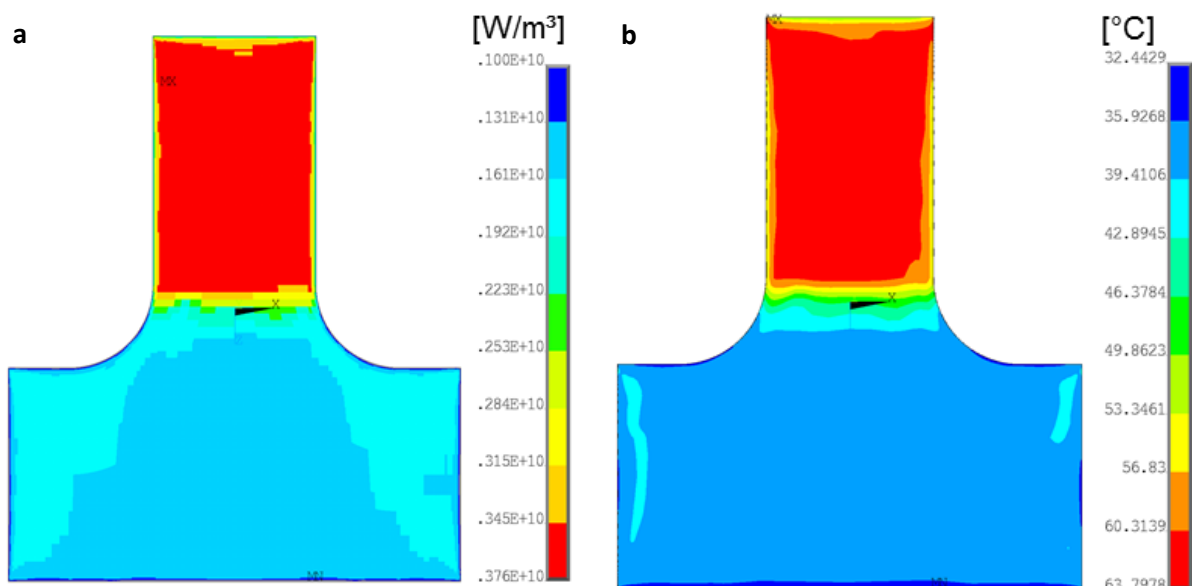


Abbildung 4-27: (a) Leistungsdichterverteilung;  $t=20\text{ s}$ ;  $U_1=580\text{ V}$ ;  $U_2=280V$  (b) Temperaturverteilung;  $t=0,4s$ ;  $U_1=580\text{ V}$ ;  $U_2=280V$

Figure 4-27: (a) Power density distribution,  $t=20\text{ s}$  (b) Temperature distribution,  $t=0,4\text{ s}$

Zum Erwärmungsende ist die Leistungsdichte im Fuß der B-Säule erhöht, da in diesem Bereich die Curie-Temperatur nicht überschritten wird (Abbildung 4-27 (a)). Die unterschiedlichen Temperaturen in Fuß und Hals sind in Abbildung 4-27 (b) dargestellt. Der obere Bereich liegt über der  $AC_3$  Temperatur, sodass beim Pressprozess mit ausreichend starker Kühlung in diesem Bereich Martensit entsteht und somit eine hohe Steifigkeit vorhanden ist. Die Temperatur des Fußes liegt unter  $AC_1$ -Temperatur, sodass noch keine Austenitisierung eingetreten ist. Nach dem Pressen und der Abkühlung wird dieser Bereich eine hohe plastische Dehnbarkeit aufweisen.

#### **4.3.7 Elektrischer Wirkungsgrad** **Electrical efficiency**

Diese Untersuchung soll die Erstellung der Konstruktionsrichtlinien unterstützen. Daher wird keine quantitative Untersuchung durchgeführt, sondern die Tendenz des Einflusses verschiedener Parameter auf den Wirkungsgrad dargestellt.

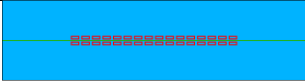
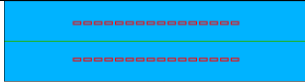
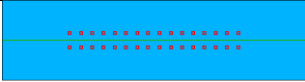

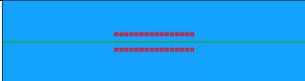
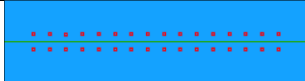

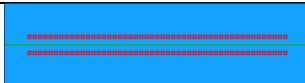
Bei der induktiven Erwärmung wird zwischen elektrischem und thermischem Wirkungsgrad unterschieden. Der thermische Wirkungsgrad wird aus einer energetischen Betrachtung berechnet, wo hingegen der elektrische Wirkungsgrad aus der Leistungsbetrachtung errechnet wird. Zur Berechnung des thermischen Wirkungsgrads wird eine Energiebilanz aufgestellt. Da die Zeit beim thermischen Wirkungsgrad mitberücksichtigt wird, kann genau ermittelt werden, welche Kosten bei der Erwärmung entstehen. Insbesondere Prozesse mit sehr kurzen Erwärmungszeiten, wie die Induktionserwärmung, haben einen sehr hohen thermischen Wirkungsgrad, da nur geringe Verluste aufgrund von Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion entstehen. Der elektrische Wirkungsgrad betrachtet die Leistungsübertragung zwischen Induktor und Werkstück. Im Induktor als auch im Werkstück wird elektrischer Strom in Wärme, aufgrund des elektrischen Widerstands der Materialien, umgewandelt. Im Induktor ist die Wärme ein Verlust und wird durch Wasserkühlung abtransportiert. Die Wärme, die im Werkstück aufgrund der induzierten Wirbelströme entsteht, ist Nutzwärme. Aus dem Verhältnis dieser beiden Größen bestimmt sich der elektrische Wirkungsgrad. Für die numerische Berechnung des elektrischen Wirkungsgrads wird ein 2-dimensionales Modell verwendet. Dabei werden aber keine konkreten Werte angegeben, sondern nur eine Tendenz. Wie bereits anfangs geschildert, wird auf eine quantitative Angabe verzichtet, da diese auch von der jeweiligen Erwärmungsaufgabe abhängt.

Der Einfluss der vier Parameter Koppelabstand, Windungsbreite, Windungsabstand und Windungszahl auf den elektrischen Wirkungsgrad ist in Tabelle 4-1 aufgeführt. In Folge der Vergrößerung des Koppelabstands sinkt der Wirkungsgrad. Das elektromagnetische Feld koppelt in einem geringeren Maß an das Werkstück an. Die Verbreiterung einer Windung hat zur Folge, dass der Wirkungsgrad steigt. Das Streufeld der einzelnen Windungen verringert sich. Der gleiche Effekt wird auch bei Vergrößerung des Abstands der einzelnen Windungen zueinander erreicht. Dadurch erhöht sich das Streufeld der einzelnen Windung und entsprechend sinkt der Wirkungsgrad. Eine weitere Möglichkeit, Einfluss auf den Wirkungsgrad zu nehmen, ist die Erhöhung der Anzahl der Windungen. Der Anteil des Streufelds an den Enden des

Induktors wird im Verhältnis zum restlichen wirksamen magnetischen Feld geringer. Somit erhöht sich der Wirkungsgrad.

Tabelle 4-1: Einfluss verschiedener Parameter auf den elektrischen Wirkungsgrad

Table 4-1: Influence of various parameters on the electrical efficiency

Parameter	Änderung von	nach	Elektrischer Wirkungsgrad
Koppelabstand			sinkt
Windungsbreite			steigt
Windungsabstand			sinkt
Windungsanzahl			steigt

#### 4.4 Optimierte Auslegung des Erwärmungsprozesses Optimized design of the inductive heating process

Die Ergebnisse aus den Voruntersuchungen sind in die Entwicklung des numerischen Modells des Erwärmungssystems für das Demonstratorbauteil eingeflossen. Der Windungsabstand muss 5 mm oder kleiner sein, damit die Welligkeit des Temperaturprofils in z-Richtung unter 1 % liegt. Des Weiteren muss bei einem vertikalen Koppelabstand von 15 mm der Induktor auf beiden Seiten 25 mm länger als das Bauteil sein. Der elektrische Wirkungsgrad würde sich bei einem geringeren vertikalen Koppelabstand verbessern. Da aber ein Transportsystem im Induktor installiert werden muss, ist ein kleinerer Koppelabstand nicht möglich. Bei einem horizontalen Koppelabstand von 50 mm oder mehr ergeben sich Temperaturunterschiede an den Kanten von maximal 3 %. Da aber das Demonstratorbauteil einen sich stark ändernden Querschnitt hat, wird der horizontale Koppelabstand nochmals an der halben B-Säule untersucht. Durch den zur Verfügung stehenden Umrichter ist eine Frequenz von 400 kHz vorgegeben. Daher fließt eine Frequenzuntersuchung nicht in die Optimierung mit ein.

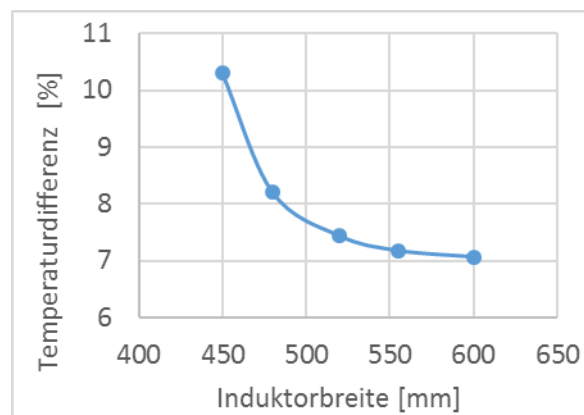


Abbildung 4-28: Optimierung der Induktorbreite  
Figure 4-28: Optimization of the width of the inductor coil

Die Untersuchung (Abbildung 4-28) zeigt, dass bei einer Induktorbreite von 520 mm keine wesentliche Verbesserung der Temperaturhomogenität zu erwarten ist. Die Änderung in diesem Bereich beträgt 0,37 %. An dieser Stelle ist zwischen Temperaturhomogenität und Füllfaktor abzuwägen. Das Verhältnis zwischen Platinenfläche und Induktorfläche (Länge x Breite) sollte nahe eins sein, da sich ein geringer Füllfaktor negativ auf den Wirkungsgrad auswirkt. Um ausreichend Leistung zur Verfügung zu haben, wurde die Breite auf 520 mm festgelegt. Dabei ergibt sich eine Temperaturdifferenz von 7,43 %. In Abbildung 4-29 (b) ist die Temperaturverteilung dargestellt. Der graue Bereich liegt mehr als 40 K unter der maximalen Temperatur. Bei 7,43 % ist der maximale Temperaturunterschied 74,7 K. Der Induktor für das Demonstratorbauteil wird 520 mm breit, 515 mm lang und hat einen vertikalen Koppelspalt von 15 mm

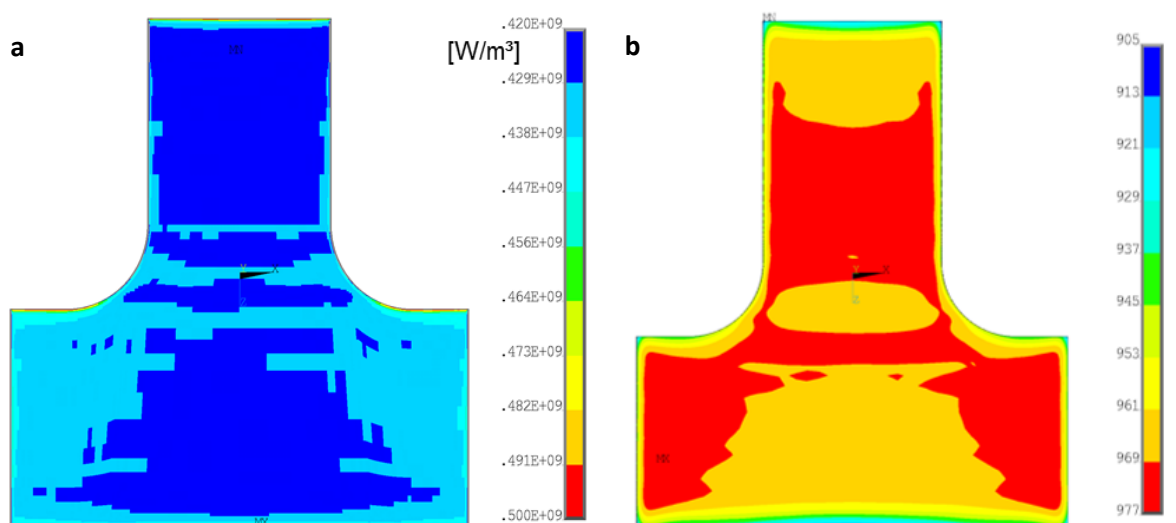


Abbildung 4-29: (a) Leistungsdichterverteilung, 400 kHz, 600 V, (b) Temperaturverteilung  
Figure 4-29: (a) Power density distribution, (b) Temperature distribution

Für die Entwicklung und Auslegung des Umrichters und der Kondensatorbank werden die Ergebnisse der numerischen Berechnung genutzt. Aus der numerischen Berechnung ist der Spannungsabfall am Induktor bekannt. Für eine Erwärmung auf 950 °C innerhalb von 20 s wird am Induktor eine Spannung von 680 V benötigt. Die Ausgangsspannung des Umrichters beträgt aber nur 450 V. Somit ist eine Spannungstransformation notwendig. Diese kann über einen Transformator oder eine kapazitive Spannungserhöhung vorgenommen werden. Aufgrund der Frequenz von 400 kHz und der hohen Scheinleistung, die auch eine hohe Stromdichte und somit Wärmeverluste mit sich bringt, kann ein Transformator nicht genutzt werden. Daher wird eine kapazitive Spannungsverdopplung genutzt.

Der Meilenstein 2 ist erreicht. Das Erwärmungskonzept für das Demonstratorbauteil steht fest.

#### 4.5 Erstellen von Konstruktionsrichtlinien Determination by geometry measurements

Aus den vorherigen Arbeitspaketen konnte Wissen gewonnen werden, aus dem Konstruktionsrichtlinien für die Auslegung des gesamten induktiven Erwärmungsprozesses abgeleitet werden. Teilweise werden Erkenntnisse aus den folgenden Arbeitspaketen hier genannt, da sie zu den Konstruktionsrichtlinien positiv beitragen.

Für die Auslegung des induktiven Erwärmungsprozesses wird im ersten Schritt sowohl die benötigte Leistung als auch die optimale Frequenz berechnet. Bei der Berechnung der Leistung ist zu beachten, dass die spezifische Wärmekapazität eine temperaturabhängige Materialeigenschaft ist. Daher wird die spezifische Wärmekapazität über den durchlaufenden Temperaturbereich gemittelt. Die Erwärmungsleistung berechnet sich nach folgender Formel:

$$P = \frac{c_p \cdot \rho_d \cdot V \cdot \Delta T}{t} \quad (4.2)$$

Für die Abschätzung der optimalen Frequenz kann das Diagramm auf Abbildung (Abbildung 2-9b) genutzt werden.

Sollen dünne Metallplatinen effizient erwärmt werden, so sind Frequenzen von über 400 kHz notwendig. Daher ergibt sich eine große Impedanz  $\underline{Z}$  für den Induktor.

$$\underline{U} = \underline{Z} \cdot \underline{I} \quad (4.3)$$

$$\underline{Z} = j\omega \cdot L \quad (4.4)$$

Daher muss die Spannung hoch sein, um eine ausreichend hohe Stromdichte zu erzeugen. Bei der Konstruktion des Induktors ist daher auf eine kleine Induktivität  $L$  zu achten: Sie ist proportional zu:

$$L \propto n^2 \cdot \mu_r \cdot \frac{A}{l} \quad (4.5)$$

Daher sollte der Induktor möglichst nur eine Windung ( $n=1$ ) haben. Das kann durch mehrere parallele Windungen oder eine einzige Windung realisiert werden. Parallele Windungen wirken wie eine einzige Windung. Die Querschnittsfläche  $A$  des Induktors ist eine weitere geometrische Größe, die auf die Induktivität einwirkt. Der horizontale und vertikale Koppelspalt spannen diese Fläche auf. Insbesondere sollte der vertikale Koppelabstand möglichst klein gehalten werden, da dieses den positiven Nebeneffekt hat, dass der elektrische Wirkungsgrad steigt. Des Weiteren wirkt die Vergrößerung des vertikalen Koppelabstands negativ auf die Temperaturhomogenität. Der horizontale Koppelabstand kann bis zu einem bestimmten Abstand zwischen Induktor und Platine verkleinert werden, da sonst eine Überhitzung der Kante eintritt. Welchen Abstand er haben muss, hängt sowohl von der Länge des Induktors als auch vom vertikalen Koppelspalt ab. Daher ist für den Einzelfall zu prüfen, welcher horizontale Koppelabstand sinnvoll ist.

Bei der Verbindung des Induktors mit dem Schwingkreis ist darauf zu achten, dass die Zuleitung möglichst kurz ist und Hin- und Rückleiter einen geringen Abstand zueinander haben. Dadurch wird die Gesamtinduktivität des elektrischen Systems verkleinert.

Eine weitere geometrische Größe ist die Länge des Induktors. Zwar kann durch einen längeren Induktor die Induktivität gesenkt werden, dennoch ist auf ein sinnvolles Verhältnis von Bauteillänge und Induktorlänge zu achten. Bei fester Bauteillänge und Verlängerung des Induktors steigen die elektrischen Verluste. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass ein Überstand des Induktors von 20 mm oder mehr an beiden Enden das Temperaturprofil nur noch marginal beeinflusst. Dieser Mindestüberstand ist einzuhalten, da sonst die Enden der Platine eine zu geringe Temperatur aufweisen.

Ein weiterer Punkt, der sich auf die Homogenität der Temperaturverteilung auswirkt, ist ein möglichst geringer Abstand zwischen den einzelnen Windungen

Unter Einhaltung der genannten Punkte sind unterschiedlich geformten Platinen mit einem Induktor effizient zu erwärmen.

Bei leistungsgesteuerten Umrichtern ändert sich der Induktorstrom beim Überschreiten der Curie-Temperatur. Dadurch erhöhen sich auch die Verluste im Induktor. Dieses muss bei der Auslegung der Kühlung des Induktors berücksichtigt werden.

Während der Erwärmungsphase einer Platine konnte nur eine sehr geringe vorübergehende Verformung der Platine festgestellt werden. Um aber einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, sollte eine elektrische Isolierung immer im Inneren des Induktors vorgenommen werden. Gut dazu geeignet sind Dothem-Platten, da diese in unterschiedlichen Stufen temperaturfest sind. Gleichzeitig bieten sie eine thermische Isolierung.

Für die Konstruktion einer Erwärmungsanlage werden folgende Komponenten benötigt:

- Frequenzumrichter: In dem Projekt wurde ein Hochfrequenzumrichter (400 kHz, 250 kW) des Unternehmens SMS Elotherm genutzt.
- Kondensatorbank: Spannungsverdopplung der Umrichterausgangsspannung, 120 Kondensatoren á 170 nF, maximal 160 Kondensatoren



## Entwicklung des induktiven Erwärmungsprozesses Development of the inductive heating process

- Hochfrequenzkabel: Zur Verbindung des Umrichters mit der Kondensatorbank
- Induktor: 20 m Kupferprofil (30 mm x 10 mm; 2 mm Wandstärke)
- Wasserkühlung (zentral oder dezentral): Zur Kühlung des Induktors, der Kondensatorbank und des Umrichters
- Feuerfestplatten (z.B. DOTHERM): Thermische und elektrische Isolierung, Trägerplatte für eine Formplatte
- Auflagestifte: Siliciumnitrit, bereitgestellt von DOCERAM
- Transportsystem: Zum Befüllen des Induktors und anschließende Entnahme der Platine, Kunststoffschienen (bis 200 °C temperaturfest)

Für die Auslegung der Komponenten ist eine energetische Betrachtung des Erwärmungsprozesses wichtig. Durch Bildung des Integrals über die Zeit von Formel 4.2 kann die benötigte Energie für die Erwärmung berechnet werden. Daneben müssen noch Verluste im Umrichter, den Zuleitungen, der Kondensatoren und dem Induktor berücksichtigt werden. Aus den gespeicherten Messdaten der Temperatur-Zeit-Kurve (Abbildung 4-30) kann die Energie im Werkstück berechnet werden.

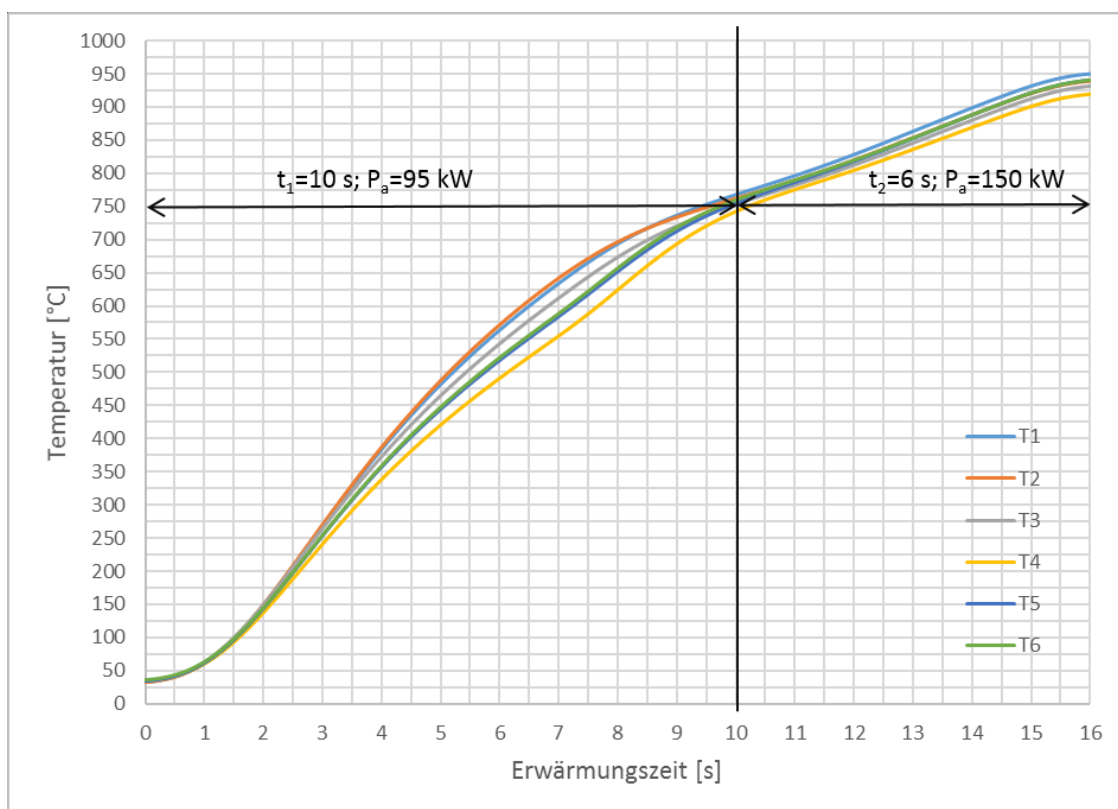


Abbildung 4-30: Gemessene Temperaturkurve mit Thermoelementen

Figure 4-30: Measured temperature curve with thermocouples

In Tabelle 4-2 ist das Ergebnis der Berechnung dargestellt. Die spezifische Wärmekapazität ist über den Temperaturbereich von 30 °C bis 750 °C und 750 °C bis 950 °C gemittelt, da diese temperaturabhängig ist.

Tabelle 4-2: Berechnung der Energie für die Erwärmung des Demonstratorbauteil

Table 4-2: Calculation of the energy for heating of the demonstrator component

Berechnung der Erwärmungsenergie	bis 750°C	bis 950°C
gemittelte spez. Wärmekapazität [J/kgK]	650	870
Blechdicke [m]	1,50E-03	1,50E-03
Blechbreite [m]	3,40E-01	3,40E-01
Blechlänge [m]	4,00E-01	4,00E-01
Volumen Blech [m <sup>3</sup> ]	2,04E-04	2,04E-04
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	7800	7800
Gewicht [kg]	1,5912	1,5912
Temperaturdifferenz [K]	720	200
Anzahl der Bleche	1	1
Energie im Werkstück [J]	744682	276869
Kilowattstunden	0,206856	0,076908

Für die Erwärmung des Demonstratorbauteils innerhalb von 16 s werden 0,284 kWh benötigt.

In einem weiteren Schritt wird der Gesamtwirkungsgrad berechnet. Das Ergebnis ist in Tabelle 4-3 dargestellt. Die Gesamtenergie, als Nutz- und Verlustenergie für die Erwärmung des Demonstrators (1,59 kg) beträgt 0,512 kWh. Bei einem doppelt so dicken Bauteil - damit auch doppelt so schwer -, würde die doppelt Menge an Energie benötigt werden.

Tabelle 4-3: Berechnung des Gesamtwirkungsgrad für das Demonstratorbauteil

Table 4-3: Calculation of the overall efficiency for the demonstrator component

Berechnung des Wirkungsgrads	bis 750°C	bis 950°C
Erwärmungsdauer [s]	10	6
Leistung im Werkstück [W]	74468	46145
Gesamtwirkungsgrad [%]	78,5	31
Gesamtleistung [W]	94864	148854
Verluste [W]	20396	102709

Der Unterschied im Wirkungsgrad ist auf die schlechtere Ankopplung und ein  $d/\delta=1,87$  zurückzuführen.

Die Erstellung der Konstruktionsrichtlinien markiert den Meilenstein 3.

## 5 Validierung der Simulationsergebnisse Validation of simulation

### *Kurzfassung*

*Für die numerische Untersuchung des Prozesses (Kapitel 4) werden verschieden Modelle verwendet. Um die Aussagekraft der Modelle darzulegen, muss eine Verifikation durch Experimente stattfinden.*

### *Abstract*

*In chapter 4 different numerical models are used in order to investigate the induction heating process. The validity of the models has to check with experiment setups.*

Für die Validierung der Ergebnisse wurden ein bestehender Versuchsstand abgeändert und ein weiterer neu aufgebaut. Beide Anlagen wurden am Institut für Elektroprozessentechnik betrieben.

In Abbildung 5-1 ist die geänderte Versuchsanlage zu sehen. Sie besteht aus dem Induktor (1), dem zu erwärmenden Metallband (2), der Verfahreinheit (3), der Kondensatorbank (4) und einer Aufnahme für eine Wärmebildkamera (5). In der Abbildung ist nicht der Himmelwerk Hochfrequenzumrichter HUS100 zu sehen, der als Energiequelle dient und mit der Kondensatorbank (4) verbunden ist. Um einen möglichst gleichmäßigen Emissionskoeffizient für die Thermographieaufnahme zu erhalten, wird das Metallband mit einer temperaturfesten schwarzen Farbe besprüht. Im Abschnitt Konzeptentwicklung wurde die Möglichkeit einer Durchlauferwärmung in diesem Projekt nicht in Betracht gezogen, dennoch kann das numerische Modell gut anhand der Durchlauferwärmung verifiziert werden, weil die Temperatur direkt hinter dem Induktor am auslaufenden Metallband gemessen werden kann. Der Messbereich der Wärmebildkamera ist rot markiert. Der Versuch wurde bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 m/min durchgeführt. Die Schwingkreisfrequenz beträgt 27,9 kHz und die abgegebene Wirkleistung des Umrichters beträgt 65 kW. Da der Prozess kontinuierlich ist, ändert sich die Leistung nur beim Anfahren. Das Metallband wurde auf 300 °C erwärmt. Die Bandbreite betrug 300 mm und hatte eine Dicke von 1 mm. Für die Untersuchung kam ein Stahlblech mit der Werkstoffnummer 1.0036 [Ver01] zum Einsatz. Dabei handelt es sich um einen ferromagnetischen Stahl.

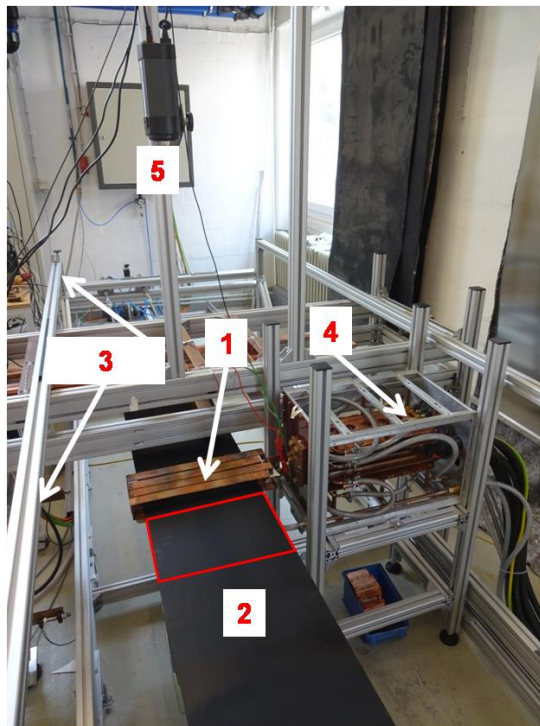


Abbildung 5-1: Versuchsanlage für die Verifikation im Durchlauf  
Figure 5-1: Test facility for in-line verification

Für die Messung wird an der Kamera der Emissionskoeffizient von 0,93 eingestellt, der durch eine Referenzmessung mit einem Thermoelement ermittelt wurde. Des Weiteren wird die Entfernung zwischen Kamera und Metallband (1,5 m) hinterlegt.

Abbildung 5-2 zeigt die Temperatur der Blechoberfläche beim Experiment und der numerischen Simulation nach der Erwärmung. Die Bewegungsrichtung des Blechs ist mit einem farbigen Pfeil gekennzeichnet. Die schwarzen Pfeile markieren Niveaulinien gleicher Temperatur. Bereits dieser Vergleich zeigt, dass das numerische Modell die Realität sehr gut abbildet.

Die Temperaturverteilung senkrecht zur Vorschubrichtung ist auf der linken Seite von Abbildung 5-2 zu sehen. Im Bereich 0-0,07 m sind die Ergebnisse der Messung und der Simulation nahezu identisch. In Abschnitt von 0,07-0,11 m liegt die Abweichung bei max. 1 %. Im Teilstück von 0,11-0,15 m sind beide Kurve wieder nahezu identisch außer direkt an der Kante, wo sich eine Abweichung von 1,2 % ergibt. Auch die größere Steigung und der Knick in der Nähe der Blechkante ( $x=0,145$  m) wird durch die Simulation sehr gut abgebildet. Beide Kurven passen nicht exakt übereinander. Als Gründe dafür können Messfehler aufgrund nicht genauer Kenntnis des Emissionsgrads für die gesamte Oberfläche und nicht exakte Materialparameter des Blechs genannt werden. Außerdem ist die Stromanschlussseite des Induktors nicht ideal. Dieses kann zur Verzerrung des magnetischen Feldes führen, wodurch die Temperaturverteilung beeinflusst wird. Qualitativ zeigen die Ergebnisse der Simulation keine merklichen Abweichungen von den experimentell ermittelten Messdaten. Deshalb wird das numerische Modell als physikalisch korrekt bewertet und kann für weiterführende Parameterstudien verwendet werden.

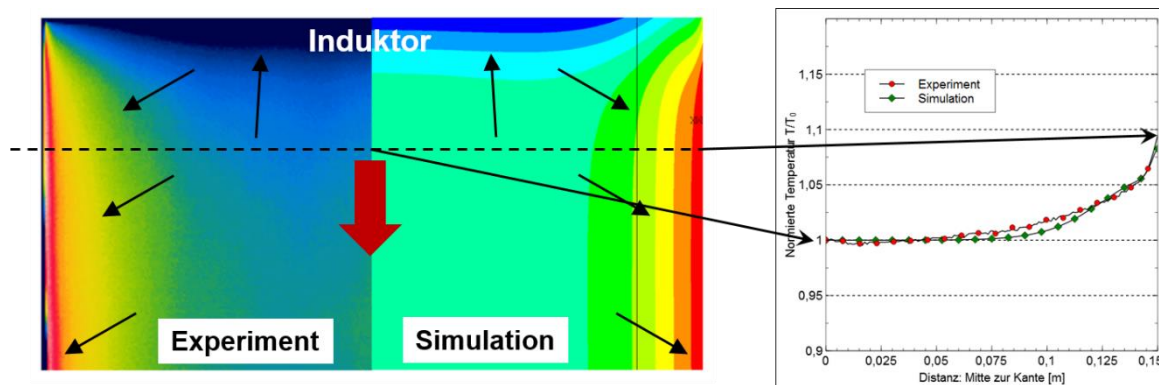


Abbildung 5-2: Vergleich der experimentell ermittelten Ergebnisse mit den numerisch berechneten Ergebnissen

Figure 5-2: Comparison of the experimentally determined results with the numerical calculated results

Der zweite Versuchsstand (Abbildung 5-3) für die Verifizierung der numerischen Modelle wurde zuerst in SolidWorks projiziert. Für die Einspannung des Blechs werden zwei Pneumatikzylinder (2) verwendet. Dadurch soll sichergestellt werden, dass sich das Blech aufgrund von Temperaturunterschieden nicht verbiegt oder aufwirft. Dadurch könnte ein ungewollter Kontakt zum Induktor (1) hergestellt werden, wodurch ein Kurzschluss entsteht und der Umrichter die Leistung ausschaltet. Die Einspannung für das Blech ist mit dem Transportschlitten (3) verbunden. Nach dem Ende der Erwärmung ist so eine schnelle Entfernung des Blechs aus dem Induktor möglich. Der Induktor besteht aus 8 Windungen. Das Kupferrechteckprofil hat das Außenmaß 30 mm x 10 mm und eine Wandstärke von 2 mm. Dadurch kann der Induktor wassergekühlt werden. Der Induktor hat eine Breite von 280 mm (innen) und eine Länge von 300 mm. Die Höhe beträgt 30 mm (innen).

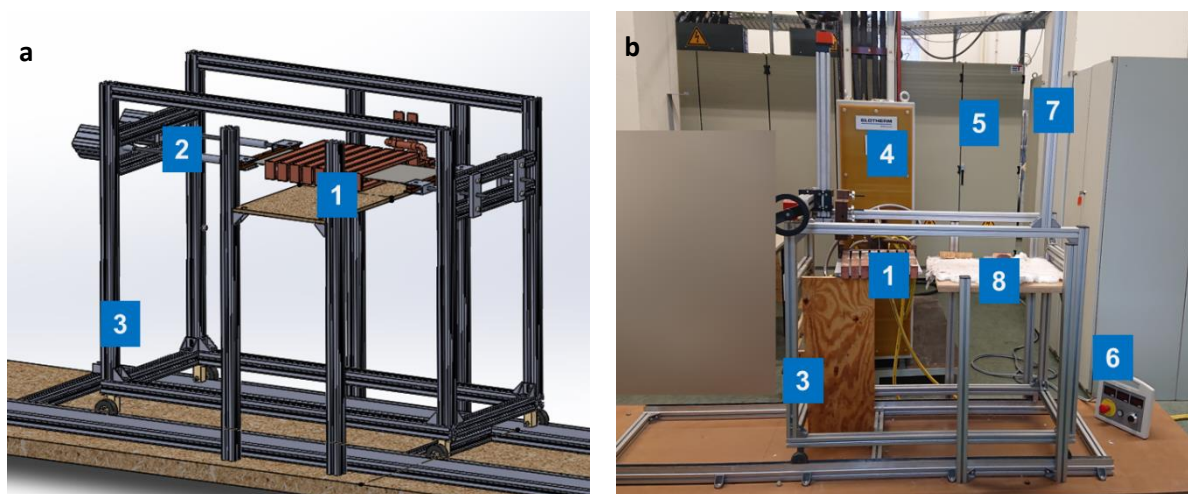


Abbildung 5-3: (a) CAD-Zeichnung des Versuchsaufbau (b) Versuchsstand

Figure 5-3: (a) CAD drawing (b) Experimental equipment

Abbildung 5-3b zeigt den realen Versuchsaufbau. Der Induktor (1) ist mit der Kondensatorbank (4) verbunden. Die Kondensatorbank ist mit einem Transformator ausgestattet, dessen Ausgangsspannung auf 450 V, 900 V oder 1350 V eingestellt werden kann. Der Schwingkreis (Induktor und Kondensatorbank) wird über den Umrichter (5). gespeist. Über die Fernsteuerung (6) kann die Spannung eingestellt werden und die Leistung ein- und ausgeschaltet werden. Die Fernbedienung wurde durch eine Zeitschaltung erweitert. Die Temperaturmessung wird mit einer Wärmebildkamera (7) durchgeführt. Das erwärmte Blech wird dafür aus den Induktor auf die Ablage (7) bewegt.

Die Pneumatikzylinder für die Fixierung des Blechs wurden im Versuchstand nach den ersten Erwärmungsversuchen entfernt, weil sich das Blech aufgrund der Zugkräfte sehr stark verbogen hat (Abbildung 5-4). Eine Berührung mit dem Induktor konnte nicht ausgeschlossen werden.



Abbildung 5-4: Verzug des erwärmten Blechs aufgrund von Zugkräften

Figure 5-4: Warping of the heated sheet due to tensile forces

Zur Überprüfung des 2-dimensionalen numerischen Modells wurde die Temperaturverteilung entlang der z-Achse gemessen. Das Blech wurde nicht geschwärzt, wodurch eine höhere Temperatur erreicht werden darf. Der üblicherweise eingesetzte Auspufflack ist bis ca. 500° C farbbeständig. Zur Messung der Temperatur wurde eine Thermographieaufnahme gemacht. Mit Hilfe des Pfadwerkzeugs im Auswertungsprogramm konnte die Temperatur ausgelesen werden. Der unregelmäßige Verlauf des experimentell ermittelten Temperaturverlaufs hat seine Ursache in einer unregelmäßigen Oberfläche bezüglich des Emissionsgrads. Das Blech wurde vor dem Erwärmen gereinigt, dennoch findet während der Erwärmung eine unregelmäßige Oxidation der Oberfläche statt, was zur lokalen Änderung des Emissionsgrads führt. Beide Verläufe (Abbildung 5-5) zeigen sehr ähnliches Verhalten. Der Randbereich unterscheidet sich etwas stärker. Wegen der größeren magnetischen Streuung an den Enden des Induktors fällt die Temperatur stärker ab. Des Weiteren ist der Versuchsinduktor nicht komplett symmetrisch.

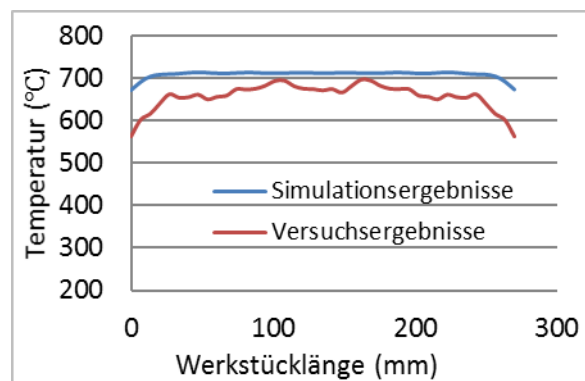


Abbildung 5-5: Experimentelle und numerisch ermittelte Temperaturverteilung  
Figure 5-5: Experimental and numerical determined temperature profile

Das dreidimensionale numerische Modell für die geometrischen Unstetigkeiten wurde ebenfalls verifiziert. Bei der Simulation und dem Experiment betrug die Frequenz 300 kHz. Dabei wurde das Blech innerhalb von 10 s auf 250 °C erwärmt, damit es geschwärzt werden kann. In diesem Fall ist ein gleichmäßiger Emissionskoeffizient in der Umgebung der Löcher wichtig, um feststellen zu können, ob das simulierte Temperaturverhalten in diesem Bereich richtig ist. Auch hier wurden Thermographieaufnahmen durchgeführt und entlang der x- und z-Achse ausgewertet. Die Temperaturverläufe in x-Richtung stimmen gut überein (Abbildung 5-6 (a)). In z-Richtung gibt es auf der rechten Seite eine deutliche quantitative Abweichung (Abbildung 5-6 (b)). Im der numerischen Simulation haben sich beide Enden des Lochs zwischen den Windungen befunden. Im Experiment hat sich eine Seite unter der Windung befunden.

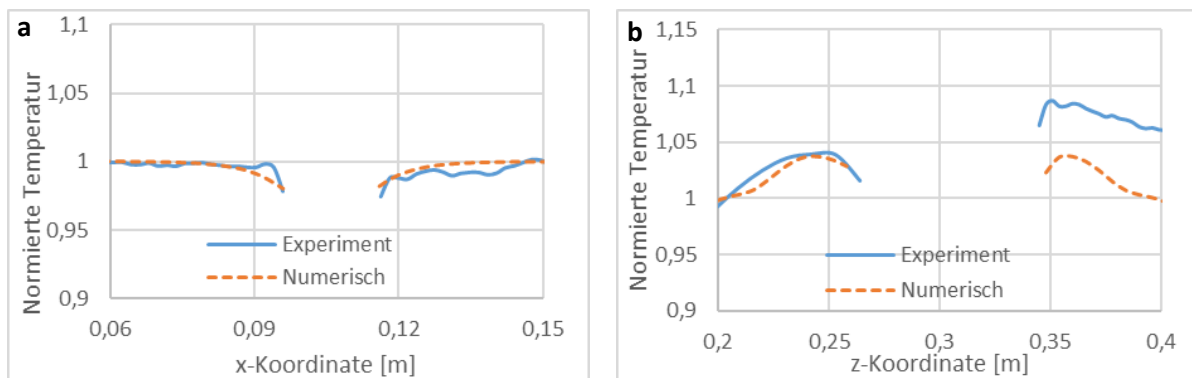


Abbildung 5-6: (a) Temperaturverteilung parallel zum Stromfluss (b) Temperaturverteilung senkrecht zum Stromfluss

Figure 5-6: (a) Temperature distribution parallel to the current flow (b) Temperature distribution perpendicular to the current flow

Neben der Bestimmung der Prozesszeit und –temperatur wurde die Temperatur mit Thermoelementen aufgenommen, um das numerische Modell für das Demonstratorbauteil zu verifizieren. Um den bestmöglichen Wärmeübergang zwischen Platine und Thermoelementen herzustellen, wurden die Thermoelemente

aufgeschweißt. Abbildung 5-7 zeigt die Stellen, an denen die Thermoelemente befestigt wurden und die Temperatur gemessen wurde.

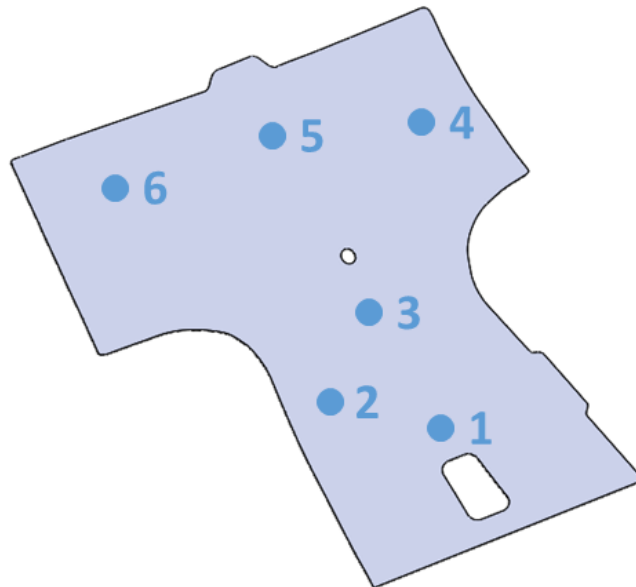


Abbildung 5-7: Schweißpunkte der Thermoelemente  
Figure 5-7: Welding points of the thermocouples

Abbildung 5-8 zeigt sowohl die experimentell ermittelten Temperaturkurven (durchgehende Linien) als auch die numerisch berechneten (gestrichelte Linien).

Die Aufnahme der Temperaturwerte wurde mit einem HGB quantix Datenlogger durchgeführt. Der Temperaturverlauf aus dem Experiment zeigt einen kontinuierlichen Verlauf. Ab ca. 700 °C flacht die Kurve langsam ab, da die relative Permeabilität nur noch sehr geringe Werte hat. Dadurch ist eine schlechtere elektromagnetische Kopplung gegeben. Bei ca. 750 °C nimmt die Permeabilität den Wert 1 an. Danach steigt die Temperatur nahezu linear an.



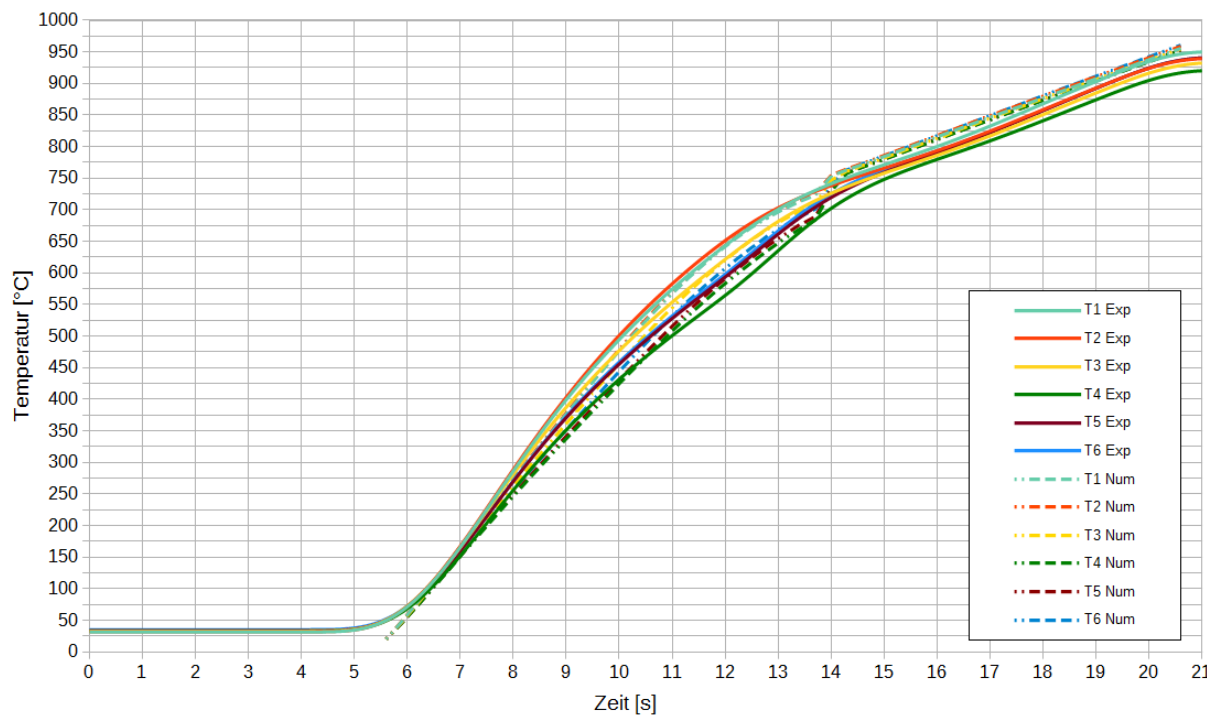


Abbildung 5-8: Vergleich der numerischen Berechnung mit den experimentellen Messdaten

Figure 5-8: Comparison of numerical and experimental results

Der qualitative Verlauf der numerischen Ergebnisse ist nahezu der gleiche, wie beim Experiment. Zwischen 700 °C und 750 °C weicht die numerische Berechnung ab. Ein deutlicher Knick im Graphen ist zu erkennen. Im Experiment passt der Umrichter die Spannung und somit die Leistung an, da sich die Induktivität ändern. Diese Anpassung ist in der Simulation nicht direkt abzubilden. Die Spannung kann nur in jedem Zeitschritt geändert werden. In der Simulation wurde der Spannungswert vor und nach der Anpassung hinterlegt. Der Sprung ergibt sich dadurch, dass die relative Permeabilität in Teilen des Bauteils noch größer eins ist. Die maximale Abweichung zwischen den experimentellen Ergebnissen und der numerischen Berechnung beträgt 30 K. Das entspricht bei einer Endtemperatur von 950 °C 3,15 %. Somit bildet das numerischen Modell das reale Erwärmungsszenario sehr gut ab. Eine Anpassung der Materialdaten war nicht notwendig, da sie bereits für 22MnB5 aus [Vib16-2] bekannt sind.

## 6 Prozessfensterbestimmung Process window identification

### *Kurzfassung*

*Die Prozessfensterbestimmung dient der Ermittlung einer geeigneten Prozessroute zur Herstellung des Demonstratorbauteils. Untersucht wurden der Einfluss von Temperatur, Aufheizzeit und Haltezeit auf Zieltemperatur auf die Eigenschaften von Grundmaterial und Beschichtung. Die induktiv erwärmten Proben zeigten ähnliche Eigenschaften wie Vergleichsproben aus dem Ofenprozess. Es konnte kein positiver Einfluss hoher Temperaturen, langer Haltezeiten oder langsamer Aufheizraten festgestellt werden.*

### *Abstract*

*The process window identification is used to define a process suitable for sample part production. The influence of temperature, heating rate and dwell time on material and coating properties is investigated. Inductively heated samples show similar results to reference samples from a furnace process. No positive influence of high temperatures, long dwell times or slow heating rates could be detected.*

### 6.1 Versuchsaufbau und -durchführung Experimental set-up and procedure

Die Durchführung der Prozessfensterbestimmung dient zur Ermittlung der Einsatzgrenzen von Material und Beschichtung. Durch die Untersuchung des Einflusses verschiedener Erwärmungsparameter auf die resultierenden Eigenschaften des Werkstoffes sollen zum einen geeignete Parameter für die induktive Erwärmung ermittelt werden zum anderen soll ein Verständnis für die Auswirkungen von Temperaturabweichungen auf spätere Bauteileigenschaften geschaffen werden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollen dann bei der Auslegung des Prozesses zur Herstellung eines Demonstratorbauteils angewendet werden. Die für die Prozessfensterbestimmung benötigten Versuchsaufbauten und Prozesse werden im Folgenden beschrieben.

#### 6.1.1 Versuchsaufbau Experimental setup

Zur Durchführung der Versuche wurde am Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil (LiA) ein Versuchsaufbau bestehend aus einer hydraulisch betriebenen Laborpresse, einem Transport- und Isolationssystem und einem Längsfeldinduktor, zur induktiven Erwärmung von Platinen im Labormaßstab errichtet. Eine Übersicht des Aufbaus ist in Abbildung 6-1 gezeigt.

Zur Erwärmung der Proben wurde ein Längsfeldinduktor mit einer Innenraumabmessung von 190 x 120 x 20 mm verwendet, welcher über einem Umrichter mit parallelem Schwingkreis betrieben wurde. Eingesetzt wurde ein HUS100

Umrichter der Firma Himmelwerk mit einer Leistung von 100 kW und einer Arbeitsfrequenz von 500 kHz. Die Erwärmung der Referenzproben wurde in einem Kammerofen HK40.27 der Firma Linn High Term durchgeführt.

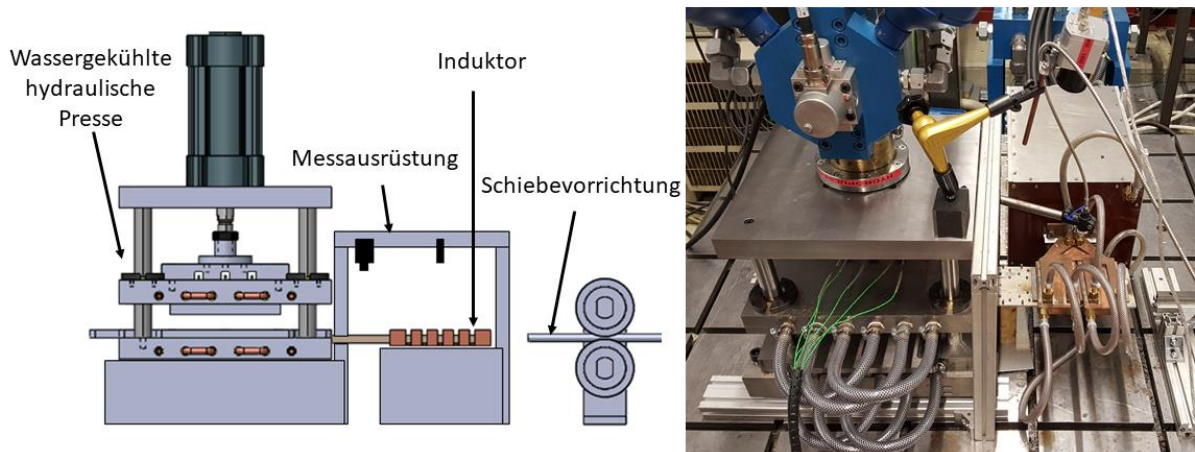


Abbildung 6-1: Aufbau Versuchsstand zur Prozessfensterbestimmung

Figure 6-1: Experimental setup process window identification

Die Abkühlung der Platinen erfolgte ohne Umformung in einer Laborpresse mit einem wassergekühlten Plattenwerkzeug. Thermoelemente in der oberen Werkzeughälfte ermöglichten eine Erfassung der Temperatur beim Abkühlen der untersuchten Bauteile. Der Hub des Pressenwerkzeuges wurde über einen Hydraulikzylinder mit einer Maximalkraft von 35 kN gesteuert. Für die durchgeführten Versuche wurde eine Flächenpressung von 1,25 MPa vorgesehen, was zu einer gemittelten Abkühlrate von 100 K/s im Bereich von 850°C bis 200°C führte. Die Überwachung der Pressenkraft erfolgte während des Versuchs mit Hilfe einer Kraftmessdose.

Für den Transport der Platine und die Wärmeisolation während der Erwärmung wurde eine Vorrichtung aus Faserverbundmaterial und Keramikstiften vorgesehen. Eine Grundplatte aus dem mineralfaserverstärkten anorganischen Werkstoff DOTHERM700 diente als Matrix für die Keramikstifte und zur Isolation. Das Material weist mit 0,37 W/mK eine geringe Wärmeleitfähigkeit auf und ist bis 700°C temperaturbeständig [Dot14]. Die eingesetzten Siliziumnitrid Stifte aus DOCERAM Volcera fungierten sowohl als Lagerung für die Proben als auch als Führung während des Transports. Die erwärmten Proben wurden mittels einer linearen Schiebevorrichtung vom Induktor in die Presse gefördert.

Zur Temperaturmessung wurden NiCr-Ni-Thermoelemente (Typ K), ein Maurer KTRD 1465-1 Pyrometer und eine Optris PI1M Infrarotkamera (IR-Kamera) eingesetzt. Die Temperaturkurven der induktiven Erwärmung wurden mit Thermoelementen ermittelt. Pyrometer und Infrarotkamera dienen lediglich der Prozessüberwachung.

## 6.1.2 Untersuchte Materialien Reviewed materials

Wie in Kapitel 2.1.3 erwähnt eignen sich hauptsächlich Bor Mangan-Stähle mit Aluminium-Silizium-, Zink-Eisen- oder Nanolackbeschichtungen für das direkte Presshärten. Es wurden daher die beiden Bor-Mangan-Stähle 22MnB5 und 20MnB8 mit einer Blechdicke von 1,5 mm und unterschiedlichen Beschichtungen untersucht. Das Material wurde im Blechformat geliefert und mittels Laserstrahlschneiden auf eine Probengröße von 200 x 100 x 1,5 mm zugeschnitten. Proben aus 20MnB8 waren mit einer 180 g/m<sup>2</sup> schweren galvannealed Zinkschicht (ZnFe) bedeckt. Proben aus 22MnB5 enthielten eine 150 g/m<sup>2</sup> schwere Aluminium-Silizium-Beschichtung (AlSi). Zusätzlich wurde noch zuvor unbeschichtetes 22MnB5 Material mit dem Nanopartikellack beschichtet. Dieser wurde mit Hilfe einer Sprühpistole auf die vorgeschrittenen Proben aufgesprüht und bei einer Temperatur von 220°C für 30 Minuten im Kammerofen ausgehärtet. Die ausgehärtete Beschichtung ist in Abbildung 6-2 (b) zu sehen. Die erreichte Schichtdicke lag bei 2 - 10 µm.

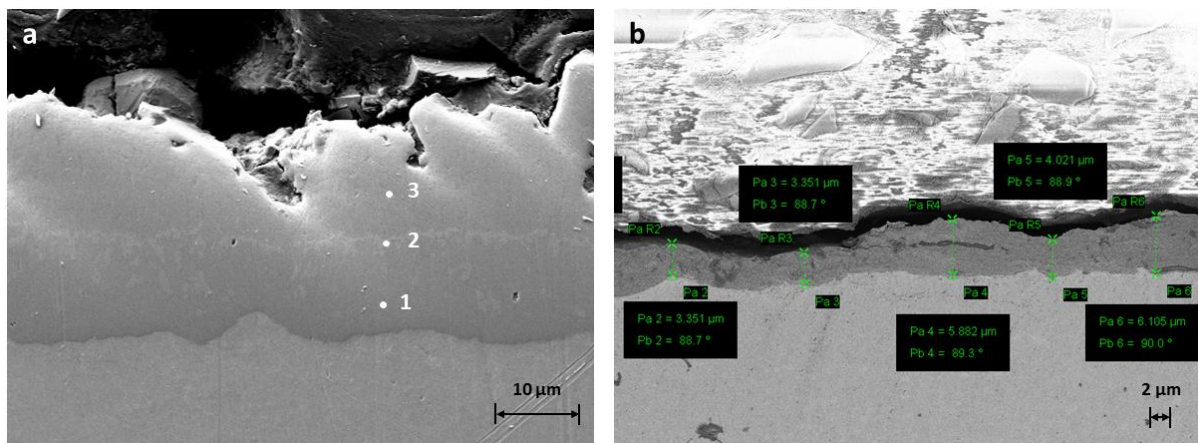


Abbildung 6-2: Schichtaufbau (a) AlSi-Lack nach Vordiffusion (REM) und (b) nach Aushärten (REM)  
Figure 6-2: Coating structure (a) AlSi-Coating after pre-diffusion (SEM) and (b) after thermal curing (SEM)

Um ein Aufschmelzen der Aluminium-Silizium-Beschichtung durch schnelle Aufheizraten während der induktiven Erwärmung zu vermeiden, wurde durch eine Erwärmung im Kammerofen die Vordiffusion von Eisenatomen ermöglicht. Entsprechend der Untersuchungen von Todzy wurde eine Temperatur von 650°C für die Vordiffusion gewählt [Tod15]. Laut Todzy ist eine Haltezeit von 5 Minuten oder mehr ausreichend, um bei induktiver Erwärmung ohne Haltezeit eine voll ausgebildete Beschichtung zu erhalten. Um eine ausreichende Vordiffusion zu gewährleisten wurde eine Haltezeit von 10 Minuten vorgesehen. Nach der Vordiffusion wurde ein dreischichtiger Aufbau mit einer Schichtdicke von bis zu 30 µm beobachtet, der in Abbildung 6-2 (a) zu sehen ist. Dies deckt sich mit der Schichtentwicklung in den Arbeiten von Todzy, welcher die sich einstellenden Phasen als (1) Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, (2) Fe<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub> und (3) Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub> (Fe, Al, Si) identifiziert.

### 6.1.3 Versuchsdurchführung Testing procedure

Zur Bestimmung eines geeigneten Prozessfensters für die induktive Erwärmung wurde ein Versuchsprogramm mit den Parametern Temperatur, Haltezeit und Aufheizrate erstellt. Die Versuchsparameter werden in Abbildung 6-3 aufgeführt. Die Variation der Parameter soll einen Aufschluss über das Verhalten der Werkstoffe und Beschichtungen unter verschiedenen Aufheizbedingungen geben. Es soll dadurch ermittelt werden, ob bestimmte Temperaturen, Aufheizraten oder Haltezeiten nötig sind, um mit dem konventionellen Prozess vergleichbare Beschichtungsstrukturen und –eigenschaften sowie mechanische Eigenschaften des Grundwerkstoffs, vor allem vor dem Hintergrund der vollständigen Austenitisierung, zu erhalten. Außerdem ermöglicht die Variation der Temperatur eine Abschätzung des Einflusses potentieller Temperaturschwankungen eines induktiv erwärmten Bauteils in Abhängigkeit des Erwärmungsprozesses

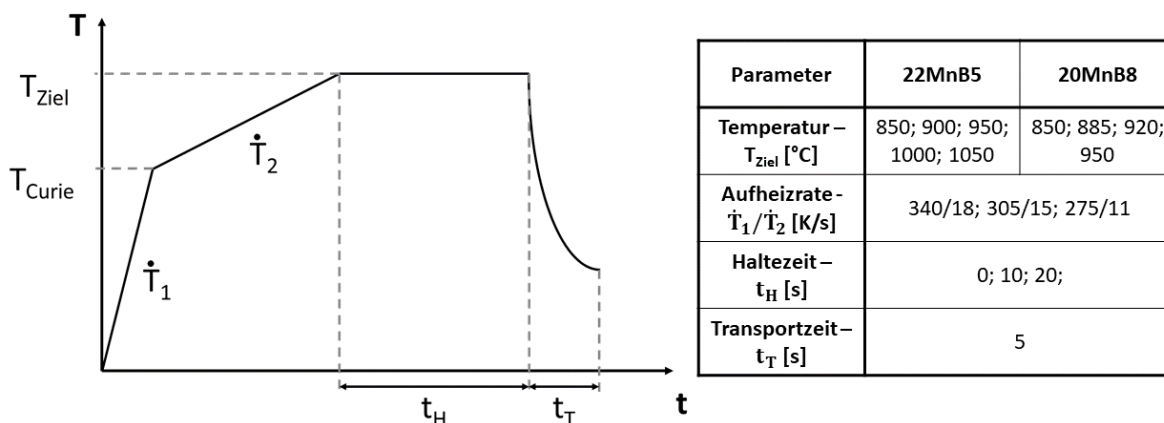


Abbildung 6-3: Versuchsparameter induktive Erwärmung Prozessfensterbestimmung

Figure 6-3: Testing parameters inductive heating process window identification

Für Proben aus 22MnB5 wurden fünf unterschiedliche Temperaturen in einem Bereich von 850°C - 1050°C vorgesehen. Da Zink beschichtete Bauteile üblicherweise bei niedrigeren Temperaturen austenitisiert werden, um die Oxidation und Verdampfung des Zinks zu vermeiden, wurde hier ein engeres Temperaturfenster mit vier Temperaturen von 850 – 950°C gewählt. Unabhängig vom Grundwerkstoff wurden die Proben mit drei unterschiedlichen Aufheizraten erhitzt. Diese wurden über eine Reduzierung der Leistung des Umrichters eingestellt und entsprechen 100%, 92% und 85% der maximal verfügbaren Leistung. Erwärmte Proben wurden entweder 0 s, 10 s oder 20 s auf der Zieltemperatur gehalten. Langsamere Kühlraten oder längere Haltezeiten wurden nicht vorgesehen, da die resultierenden langen Prozesszeiten einen wirtschaftlich sinnvollen Einsatz der induktiven Erwärmung verhindern würden. Die Abkühlbedingungen wurden für alle Versuche gleich gehalten. Die Proben wurden nach Abschluss der Erwärmung innerhalb von 5 s in die Presse transportiert. Die Zeit zwischen Einlegen der Platine und Schließung der Presse betrug 1 s.

Tabelle 6-1: Versuchsplan Prozessfensterbestimmung  
Table 6-1: Experimental Design process window identification

Probe	22MnB5			20MnB8		
	T [°C]	P <sub>Umrichter</sub> [%]	t <sub>Halte</sub> [s]	T [°C]	P <sub>Umrichter</sub> [%]	t <sub>Halte</sub> [s]
V1	850	85	10	850	85	10
V2	950	85	10	920	85	10
V3	850	100	10	850	100	10
V4	950	100	10	920	100	10
V5	850	92	0	850	92	0
V6	950	92	0	920	92	0
V7	850	92	20	850	92	20
V8	950	92	20	920	92	20
V9	900	85	0	885	85	0
V10	900	100	0	885	100	0
V11	900	85	20	885	85	20
V12	900	100	20	885	100	20
V13	900	92	10	885	92	10
V14	850	100	0	850	100	0
V15	950	100	0	920	100	0
V16	1000	100	0	950	100	0
V17	1050	100	0	-	-	-

Die gewählten Parameter führen zu 45 Kombinationsmöglichkeiten für Proben aus 22MnB5 und 36 Kombinationsmöglichkeiten für Proben aus 20MnB8. Um die unter Berücksichtigung mehrerer Beschichtungen und wiederholter Durchgänge einzelner Kombinationen große Versuchsanzahl zu reduzieren, wurde ein statistischer Versuchsplan in Anlehnung an Box-Behnken erstellt. Damit ergaben sich 17 Parametersets für 22MnB5-Proben und 16 Parametersets für 20MnB8 Proben. Die Bezeichnungen und Parameter der einzelnen Sets sind in Tabelle 6-1 aufgeführt. Von jedem Parameterset wurden für jede Werkstoff-Beschichtung-Kombination sechs Wiederholungen durchgeführt, um genügend Material für nachfolgende Untersuchungen zur Verfügung zu haben und eine Wiederholbarkeit der Versuchsergebnisse gewährleisten zu können.

Die parameterabhängigen Temperatur-Zeit-Kurven wurden während der Versuche über eine Steuerung der Umrichter-Leistung eingestellt. Die dafür benötigten Leistungskurven wurden im Vorfeld zu den Versuchen mit Hilfe von NiCr-Ni-Thermoelementmessungen ermittelt. In Abbildung 6-4 sind die resultierenden Temperaturkurven für eine Erwärmung von 22MnB5+AlSi-Proben bei 100% Umrichter-

Leistung auf 850 bis 1050°C (a) und für eine Erwärmung auf 900°C bei unterschiedlichen Umrichter Leistungen (b) zu sehen.

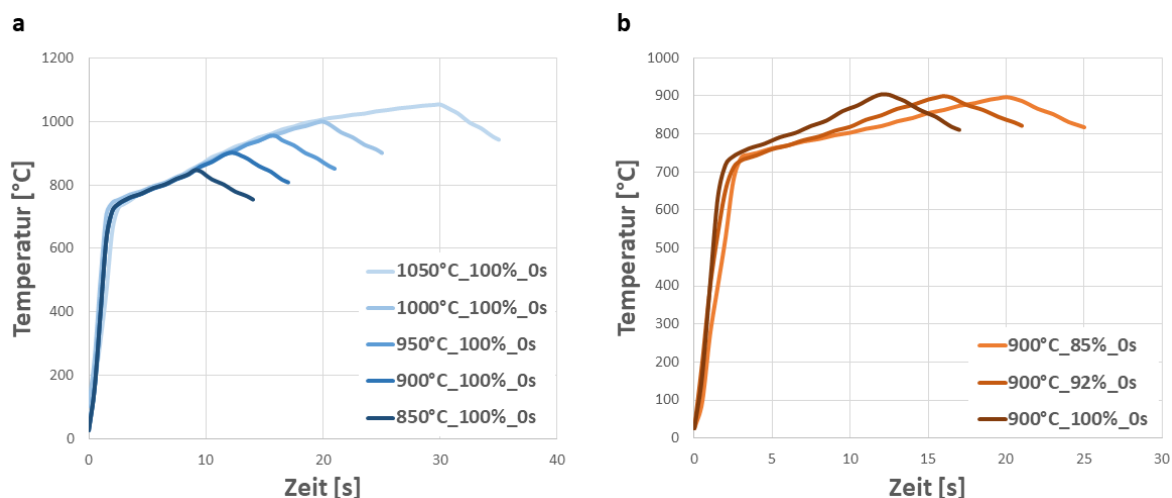


Abbildung 6-4: Temperaturkurven 22MnB5+AlSi mit (a) unterschiedlichen Zieltemperaturen bei 100% Leistung und (b) Zieltemperatur 900°C bei unterschiedlichen Leistungen

Figure 6-4: Temperature curves of 22MnB5+AlSi with (a) varying target temperatures at 100% power and (b) target temperature 900°C at different power percentages

In Abhängigkeit der Erwärmungsparameter betragen die Aufheizzeiten zwischen 9 s und 50 s. Eine Erwärmung auf 850°C mit voller Leistung konnte in ca. 9 s realisiert werden. Für das Erreichen von 1050°C wurden dagegen schon 30 s benötigt. Durch eine Reduzierung der Aufheizrate wurde die Erwärmungsdauer auf 900°C von 12 s bis auf 20 s erhöht. Das entspricht einer Steigerung der Erwärmungsdauer von 67%. Ähnliche Verhältnisse waren auch bei anderen Zieltemperaturen zu beobachten.

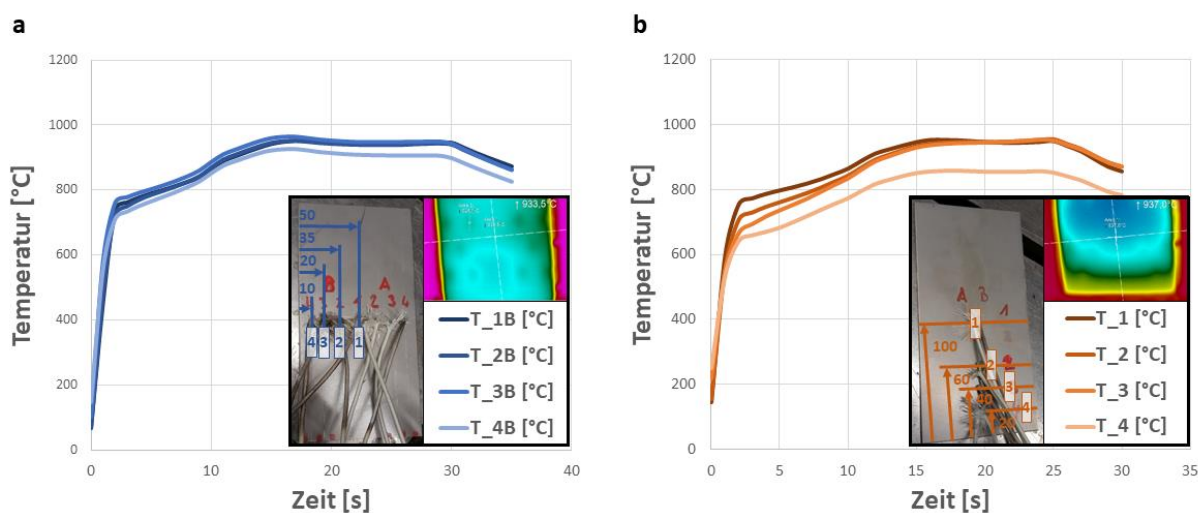


Abbildung 6-5: Temperaturverteilung Probe Prozessfensterbestimmung in (a) Querrichtung und (b) Längsrichtung

Figure 6-5: Temperature distribution process window identification sample in (a) transversal and (b) lateral direction

Für Proben aus 20MnB8 wurde zusätzlich zum Transportweg noch eine Abkühlung an der Luft von 9 – 14 s abhängig von der Zieltemperatur vorgesehen, um die Abkühlphasen der Proben vor dem Umformen zu simulieren. Dadurch lag an den Proben beim Schließen der Presse eine Temperatur von unter 670°C vor.

Durch Überprüfung der Temperaturverteilung über die Probe nach der induktiven Erwärmung konnte ein Temperaturabfall am Rand der Probe festgestellt werden. Die Temperaturverteilung wurde mittels IR-Kamera nach dem Herausziehen der Probe aus dem Induktor ermittelt. Aufgrund der Probengeometrie, welche länger als der Induktor ist, fällt der Temperaturunterschied in Längsrichtung stärker aus. Um Probeneigenschaften entsprechend der zuvor festgelegten Parameter zu erhalten, wurde ein Bereich homogener Erwärmung bestimmt. Dazu wurden Thermoelemente in Längs- und Querrichtung vom Rand bis zu Mitte der Probe aufgebracht und der Temperaturverlauf während der Erwärmung ermittelt. Aufbau und Ergebnis der Untersuchung sind in Abbildung 6-5 zu sehen. Es konnte so ein Bereich von 120 x 60 mm mit homogener Temperaturverteilung ermittelt werden, welcher für die Entnahme von Proben für nachfolgende Untersuchungen geeignet ist.

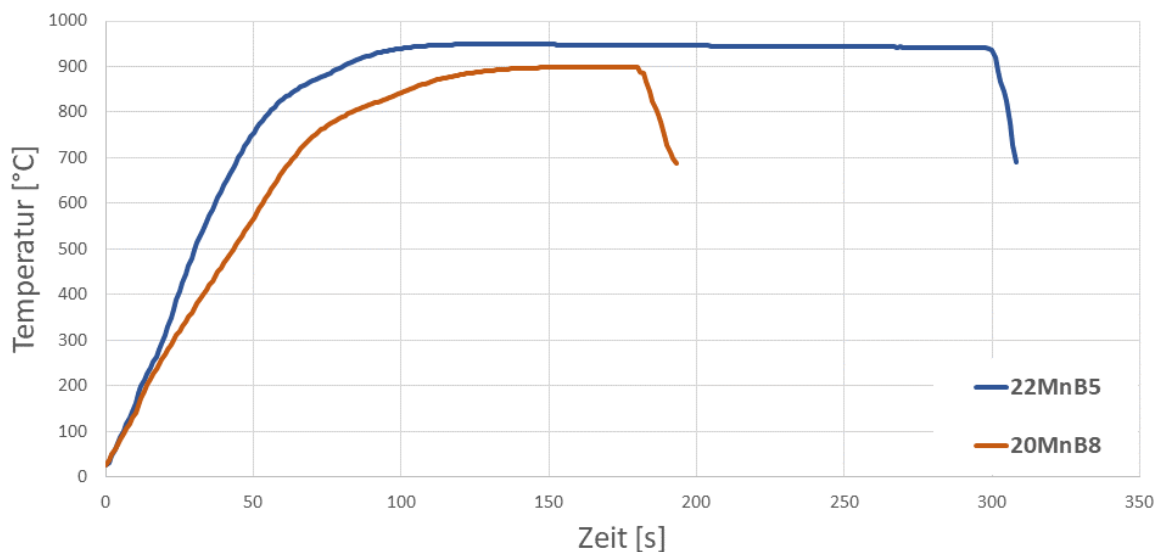


Abbildung 6-6: Temperaturkurven der Referenzproben aus 22MnB5 und 20MnB8

Figure 6-6: Temperature curves of 22MnB5 and 20MnB8 reference samples

Die Erwärmung der Referenzproben erfolgte im Kammerofen. Dazu wurden im Vorfeld die Temperatur-Zeit-Kurven für 22MnB5 und 20MnB8 mittels Thermoelementmessung ermittelt. Diese sind in Abbildung 6-6 zu sehen. 22MnB5-Proben wurden auf 950°C mit einer Ofenverweildauer von 300 s erwärmt. Proben aus 20MnB8 wurden bei einer Ofenverweildauer von 180 s auf 890°C erwärmt. Für die Referenzproben wurden die gleichen Transport- und Abkühlzeiten verwendet, wie für induktiv erwärmte Proben.



## 6.2 Ergebnisse der experimentellen Versuche Results of the experimental investigation

Um den Einfluss der zuvor definierten Erwärmungsparameter auf die Eigenschaften eines Bauteils abzuschätzen, wurden an den induktiv erwärmten und pressgehärteten Proben weiterführende Untersuchungen durchgeführt. Die dazu benötigten Proben wurden mittels Wasserstrahlschneiden aus den gehärteten Blechen herausgetrennt. Untersucht wurden die mechanischen Eigenschaften des Grundmaterials, Gefüge von Grundmaterial und Beschichtung sowie die Beschichtungseigenschaften.

### 6.2.1 Mechanical Eigenschaften Mechanical properties

Zur Bewertung der mechanischen Eigenschaften wurden Zugversuche, Härtemessungen und Plättchenbiegungsversuche mit jeweils drei Wiederholungen durchgeführt. Die Zugversuche erfolgten auf einer MTS810 in Anlehnung an DIN EN ISO 6892-1 mit einer Prüfgeschwindigkeit von 3 mm/min und einer Messlänge von 20 mm. Die Plättchenbiegungsversuche wurden nach VDA 238-100 auf einer MTS Criterion C45.105 mit einer Probengröße von 60 x 40 mm und einer Prüfgeschwindigkeit von 20 mm/min durchgeführt. Zur Ermittlung der Härte wurden fünf Messwerte über den Probenquerschnitt mittels eines ATM Carat 930 Härteprüfgeräts nach DIN EN ISO 6507 aufgenommen. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden im Folgenden beschrieben.

#### 6.2.1.1 Zugversuche Tensile Tests

Für die Zugversuche ergeben sich ähnliche Ergebnisse für die Referenzproben und die induktiv gefertigten Proben. Aufgrund vergleichbarer Werte werden die Ergebnisse von Proben aus 22MnB5+AlSi und 22MnB5+nano zusammengefasst. Die Spannungs-Dehnungskurven für Proben ohne Haltezeit bei voller Umrichter Leistung sind in Abbildung 6-7 zu sehen.

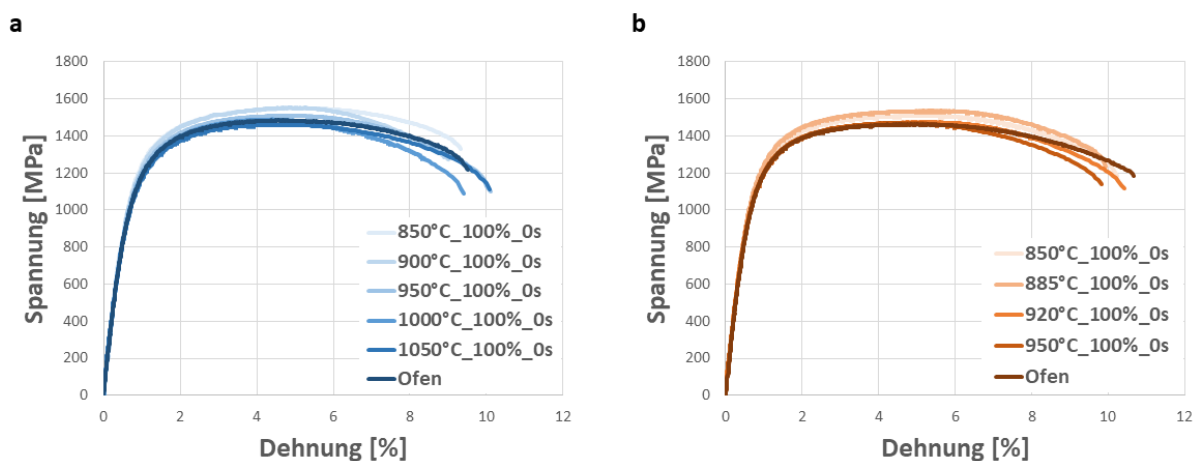


Abbildung 6-7: Spannungs-Dehnungs-Kurven für (a) 22MnB5 und (b) 20MnB8

Figure 6-7: Stress-strain-curves of (a) 22MnB5 and (b) 20MnB8

Sowohl für Proben aus 22MnB5 und 20MnB8 zeigt sich im Schnitt eine leicht höhere Zugfestigkeit und eine etwas geringere Bruchdehnung für induktiv gefertigte Proben. Für die Referenzproben aus 22MnB5 ergibt sich eine mittlere Zugfestigkeit von  $1454 \pm 31$  MPa. Die niedrigste gemessene mittlere Zugfestigkeit der induktiven Proben beträgt  $1453 \pm 5$  MPa bei einer Temperatur von  $1050^\circ\text{C}$  ohne Haltezeit und voller Leistung des Umrichters. Die höchste mittlere Zugfestigkeit konnte mit  $1553 \pm 12$  MPa bei  $900^\circ\text{C}$  ohne Haltezeit mit voller Umrichter-Leistung ermittelt werden. Ähnliche Ergebnisse zeigen sich bei Proben aus 20MnB8. Die Referenzproben liefern eine mittlere Zugfestigkeit von  $1468 \pm 13$  MPa. Induktiv erwärmte Proben erreichen die minimale mittlere Zugfestigkeit von  $1471 \pm 10$  MPa bei  $885^\circ\text{C}$  mit 20 s Haltezeit und 100% Leistung und die maximale Zugfestigkeit von  $1568 \pm 13$  MPa bei  $885^\circ\text{C}$  mit 0 s Haltezeit und 85% Leistung. Eine Übersicht über die mittleren Zugfestigkeiten von 22MnB5 und 20MnB8 in Abhängigkeit der Versuchsparameter wird in Abbildung 6-8 gezeigt. Es lässt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen einer Änderung der Versuchsparameter und den sich einstellenden Zugfestigkeiten feststellen.

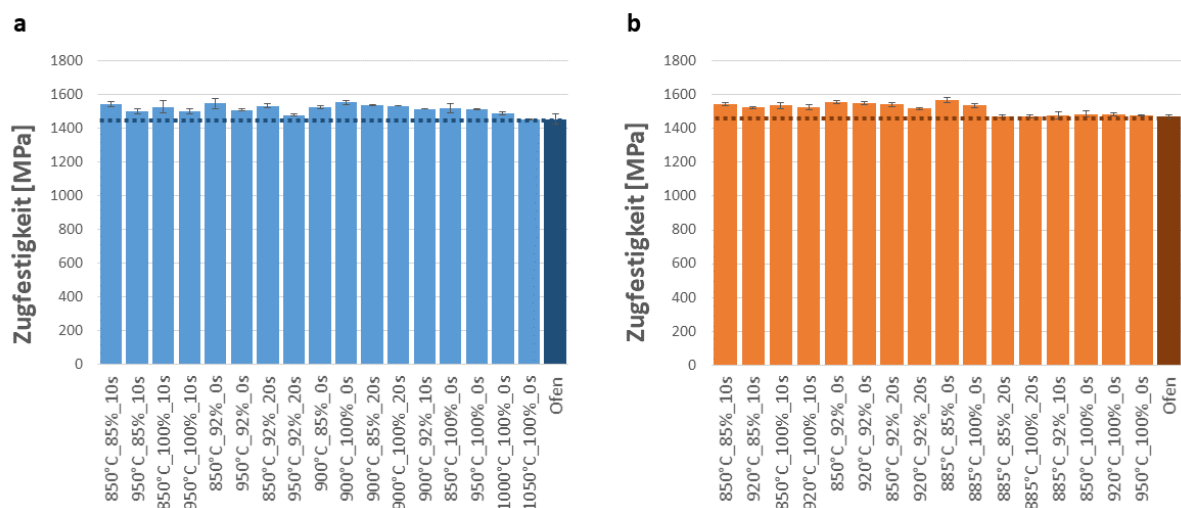


Abbildung 6-8: Mittelwerte der Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Prozessparameter für (a) 22MnB5 und (b) 20MnB8

Figure 6-8: Average tensile strength values in dependence on process parameters of (a) 22MnB5 and (b) 20MnB8

Die Bruchdehnungen A20 liegen sowohl für Proben aus 22MnB5 als auch 20MnB8 zwischen 8% und 10%. Für 22MnB5 ergibt sich der niedrigste Mittelwert bei  $950^\circ\text{C}$ , 10 s Haltezeit und 100% Leistung, mit 8,30%. Der höchste Wert wird bei  $900^\circ\text{C}$ , 10 s Haltezeit und 92% Leistung mit 9,92% gemessen. Bei Proben aus 20MnB8 liegt das Minimum von 8,45% bei  $885^\circ\text{C}$ , 0 s Haltezeit und 100% Leistung und das Maximum von 9,89% bei  $885^\circ\text{C}$ , 20 s Haltezeit und 100% Leistung. Auch hier lässt sich keine Tendenz in Abhängigkeit der Erwärmungsparameter bestimmen. Die mittleren Bruchdehnungen der Referenzproben liegen mit 9,61% für 22MnB5 und 10,34% für 20Mn8 am oberen Ende des Spektrums.

Auffällig sind die guten Ergebnisse für Proben bei niedrigen Temperaturen, wie z.B. 850°C, hohen Heizraten und ohne zusätzliche Haltezeit. Dieser Sachverhalt wird in Kapitel 6.2.1.4 diskutiert.

### 6.2.1.2 Härtemessungen *Hardness measurements*

Die Ergebnisse der Härtemessungen bestätigen die Ergebnisse aus den Zugversuchen. Auch hier liegt die mittlere Härte der induktiv erwärmten Proben leicht über den Härtewerten der Referenzproben. Dies ist für 22MnB5 und 20MnB8 zu beobachten. Eine Übersicht über die mittleren Härtewerte in Abhängigkeit der Versuchsparameter ist in Abbildung 6-9 gezeigt.

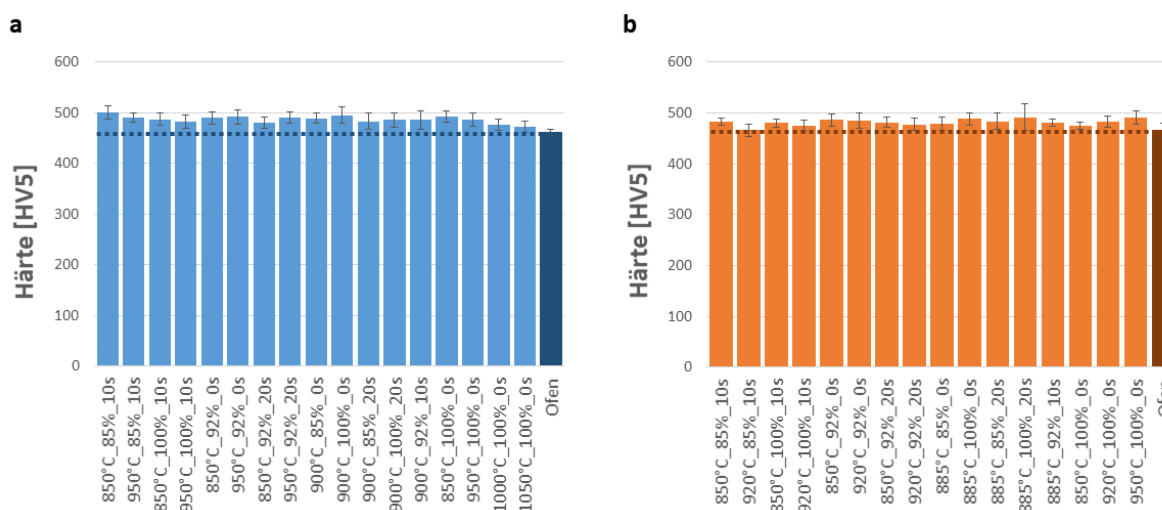


Abbildung 6-9: Mittelwerte der Härte in Abhängigkeit der Prozessparameter für (a) 22MnB5 und (b) 20MnB8

Figure 6-9: Average hardness values in dependence on process parameters of (a) 22MnB5 and (b) 20MnB8

Die mittlere Härte der Referenzproben liegt bei  $462 \pm 6$  HV5 für 22MnB5 und  $466 \pm 14$  HV5 für 20MnB8. Bei Proben aus 22MnB5 befinden sich alle Werte zwischen dem Minimum von  $472 \pm 11$  HV5 bei 1050°C, 0 s Haltezeit und 100% Leistung und dem Maximum von  $500 \pm 13$  HV5 bei 850°C, 10 s Haltezeit und 85% Leistung. Das Minimum der 20MnB8 Proben hat eine mittlere Härte von  $466 \pm 12$  HV5 und befindet sich bei einer Temperatur von 920°C mit 10 s Haltezeit und 85% Leistung. Die maximale Härte wird bei einer Temperatur von 885°C, 20 s Haltezeit und 100% Umrichter-Leistung mit  $492 \pm 26$  HV5 erreicht.

Auch bei der Härtemessung lässt sich keine Tendenz in Abhängigkeit der Prozessparameter erkennen. Es zeigt sich ebenfalls, dass die Minima und Maxima der Zugfestigkeit und Härtemessung nicht zwangsläufig bei den gleichen Parametern vorliegen. Dies legt die Vermutung nahe, dass es sich bei den unterschiedlich einstellenden Mittelwerten um versuchsbedingte Abweichungen handeln könnte. In diesem Fall wäre damit zu rechnen, dass sich die Werte über eine größere Anzahl an Proben weiter angleichen würden.

### 6.2.1.3 Biegewinkel Bending Angle

Für die Untersuchung der Biegewinkel werden alle Beschichtungen einzeln betrachtet. Der Biegewinkel wurde entsprechend VDA 238-100 Anhang A aus der Vorschubbewegung des Biegestempels berechnet. In Abbildung 6-10 sind die Mittelwerte des Biegewinkels für 22MnB5+AlSi in Abhängigkeit der Prozessparameter zu sehen.

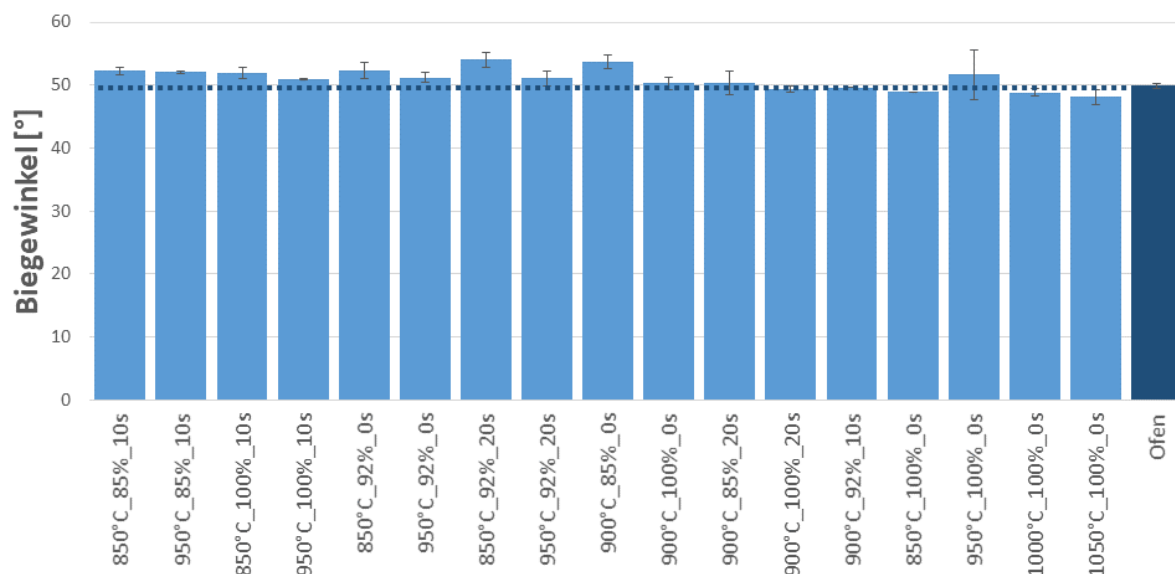


Abbildung 6-10: Mittelwerte des Biegewinkels für 22MnB5+AlSi in Abhängigkeit der Prozessparameter

Figure 6-10: Average bending angle values of 22MnB5+AlSi in dependence on process parameters

Es wird deutlich, dass kein großer Unterschied zwischen induktiven Proben und Referenzproben vorliegt. Für die Referenzproben ergibt sich ein mittlerer Biegewinkel von  $49,9 \pm 0,4^\circ$ . Der kleinste Biegewinkel wird bei  $1050^\circ\text{C}$  mit einer Haltezeit von 0 s und 100% Umrichter-Leistung gemessen. Es ergibt sich ein Wert von  $48,1 \pm 1,2^\circ$ . Der größte Biegewinkel beträgt  $54,0 \pm 1,2^\circ$  bei  $850^\circ\text{C}$ , 20 s Haltezeit und 92% Leistung. Ein Großteil der übrigen Werte liegt knapp ober- oder unterhalb von  $50^\circ$ .

Die Ergebnisse der Biegewinkelbestimmung für 22MnB8+ZnFe sind in Abbildung 6-11 zu sehen. Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei 22MnB5+AlSi. Auch hier ist keine große Abweichung zwischen induktiv und konventionell erwärmten Proben festzustellen. Allerdings ist die Spanne der Mittelwerte induktiv gefertigter Proben sogar noch geringer. Der Mittelwert der Referenzproben liegt bei  $49,2 \pm 2,2^\circ$ . Der Maximalwert von  $51,2 \pm 0,4^\circ$  kann bei  $920^\circ\text{C}$ , 10 s Haltezeit und 100% Leistung beobachtet werden. Der Minimalwert von  $47,2 \pm 2,0^\circ$  wird bei  $850^\circ\text{C}$ , 10 s Haltezeit und 85% Leistung gemessen.

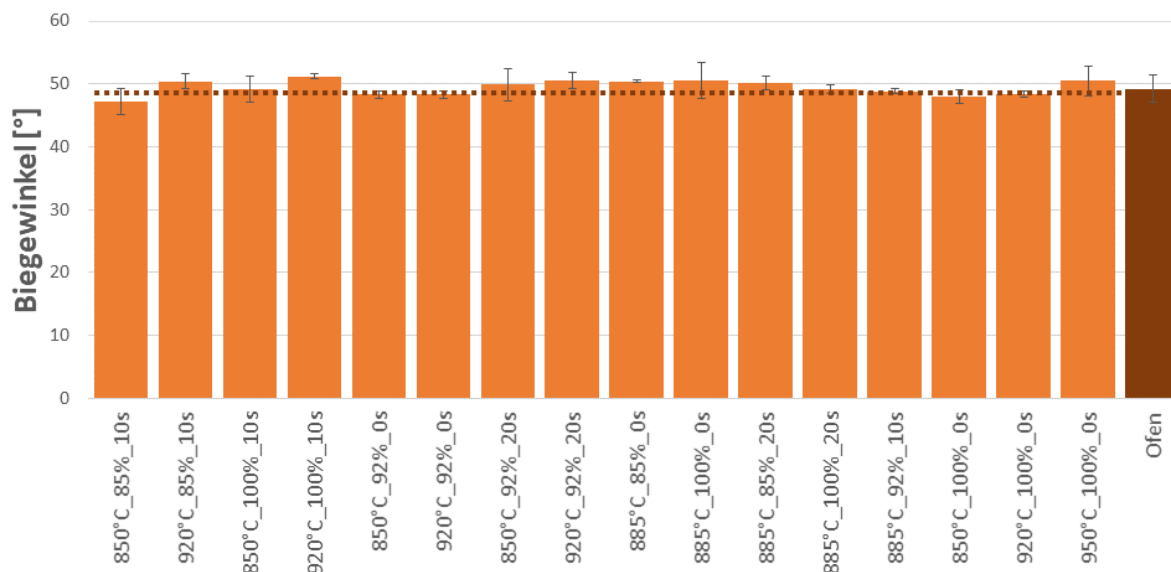


Abbildung 6-11: Mittelwerte des Biege Winkels für 20MnB8+ZnFe in Abhängigkeit der Prozessparameter

Figure 6-11: Average bending angle values of 20MnB8+ZnFe in dependence on process parameters

Das Niveau der Biege Winkelwerte für Proben aus 22MnB5+nano liegt mit ca. 60° höher als das der anderen Proben. Außerdem sind größere Schwankungen sowohl innerhalb einzelner Parametersets als auch zwischen den Parametersets zu beobachten. Eine mögliche Begründung hierfür könnte das manuelle Auftragen der Beschichtung sein, welches zu einer höheren Variation der Schichtdicke als im maschinellen Prozess führt. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Abbildung 6-12 zu sehen.

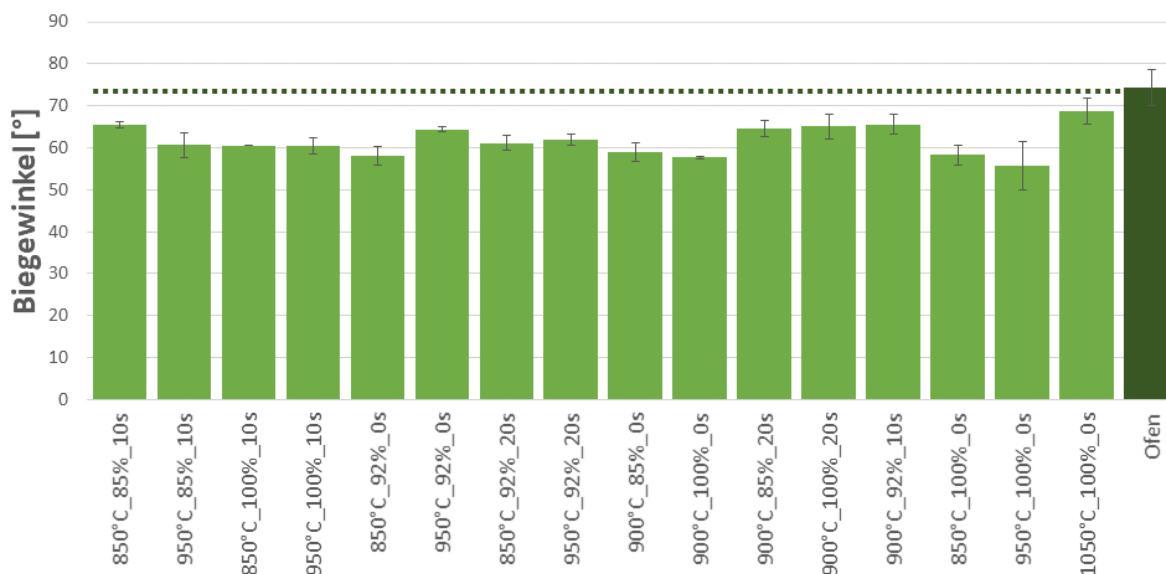


Abbildung 6-12: Mittelwerte des Biege Winkels für 22MnB5+nano in Abhängigkeit der Prozessparameter

Figure 6-12: Average bending angle values of 22MnB5+nano in dependence on process parameters

Die Mittelwerte des Biegewinkels von induktiv erwärmten Proben rangieren zwischen dem Minimum von  $55,7 \pm 5,8^\circ$  bei  $950^\circ\text{C}$ , 0 s Haltezeit und 100% Leistung und dem Maximum von  $68,7 \pm 3^\circ$  bei  $1050^\circ\text{C}$ , 0 s Haltezeit und 100% Leistung. Auch zeigt sich im Gegensatz zu den anderen Beschichtungen bei den Referenzproben ein im Mittel eindeutig höherer Biegewinkel von  $74,3^\circ \pm 4,4^\circ$ .

Für keine Beschichtung konnte eine signifikante Abhängigkeit des Biegewinkels bei induktiver Erwärmung von den gewählten Prozessparametern beobachtet werden. Außerdem stellt sich, mit Ausnahme von beschichteten Proben, bei induktiv und konventionell erwärmten Proben ein vergleichbarer Biegewinkel ein.

#### 6.2.1.4 Diskussion der mechanischen Eigenschaften

Es konnte in den durchgeführten Untersuchungen kein signifikanter Zusammenhang zwischen den gewählten Prozessparametern und den resultierenden mechanischen Eigenschaften festgestellt werden. Hinzu kommt, dass die über die induktiv erwärmten Proben auftretenden Abweichungen gering sind. Es kann also davon ausgegangen werden, dass sich unabhängig der hier beobachteten Prozessparameter ähnliche mechanische Eigenschaften einstellen.

Besonders auffällig sind hierbei jedoch die Ergebnisse welche bei niedrigen Temperaturen, kurzen Haltezeiten und hohen Aufheizraten erzielt wurden. Dass diese vergleichbare Werte wie Proben höherer Temperaturen aufweisen, ist sicherlich einerseits auf die kurzen Transportwege und schnellen Pressenschließzeiten im Versuchsablauf zurückzuführen. Andererseits ist aber bei diesen Prozessparametern, wie in Kapitel 2.1.2 erläutert, nicht nur die Abkühlgeschwindigkeit relevant sondern auch die Aufheizparameter spielen eine wichtige Rolle zum Erreichen einer vollständigen Austenitisierung.

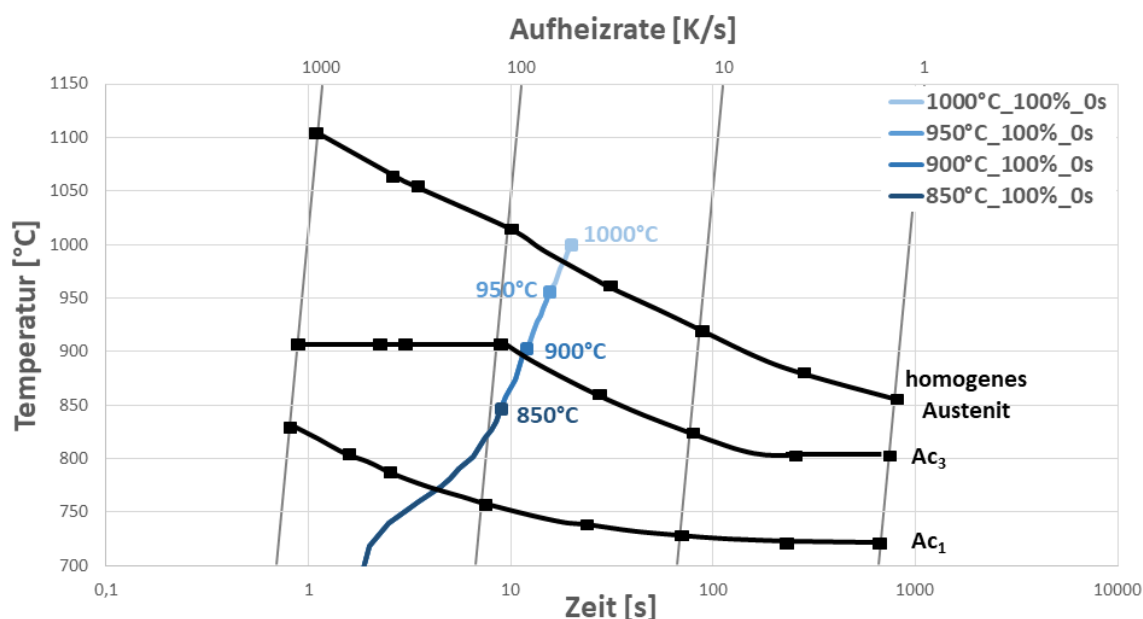


Abbildung 6-13: 22MnB5 ZTA-Diagramm nach Guk et al. mit induktiven Temperaturkurven [Guk17]

Figure 6-13: 22MnB5 TTA-diagram according to Guk et al. with inductive temperature curves [Guk17]

Aus den Arbeiten von Guk et al. sowie Sun und Zhang geht hervor, dass die Austenitisierungstemperatur  $Ac_3$  für 22MnB5 bei Heizraten von 100 K/s über 900°C liegt [Guk17][Sun14]. Abbildung 6-13 zeigt ein kontinuierliches ZTA-Diagramm für 22MnB5 nach Guk et al. mit den Temperaturkurven der induktiven Erwärmung bei voller Umrichter-Leistung. Es ist zu sehen, dass erst bei Proben ab 900°C eine vollständige Austenitisierung des Grundwerkstoffes vorliegt. Ein vollständig homogenes austenitisches Gefüge stellt sich sogar erst ab 1000°C ein. Das bedeutet, dass bei schnellster Aufheizung und ohne Haltezeit bei Proben mit einer Zieltemperatur von 850°C mit einem Restanteil von Ferrit im Gefüge zu rechnen ist. Bei Proben mit 900°C oder 950°C ist die Austenitisierung abgeschlossen, aber es scheint noch ein inhomogenes austenitisches Gefüge vorzuliegen. Beides scheint keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Proben zu nehmen.

Ähnliche Ergebnisse finden sich auch in der Literatur. Todzy konnte in seinen Untersuchungen feststellen, dass sich bei inhomogenem austenitischem Gefüge durch induktive Erwärmung trotzdem vergleichbare mechanische Eigenschaften erreichen lassen wie bei homogenem Gefüge [Tod15]. Die induktiv mit 60 K/s auf 875°C erwärmten Proben erreichten die gleiche Härte wie Proben höherer Temperatur mit Haltezeit. Untersuchungen von Stöhr et al. zeigen, dass sich auch bei martensitisch-ferritischem Gefüge hohe Festigkeiten und Härtewerte erreichen lassen [Stö09]. In ihren Untersuchungen erwärmten sie Proben im Ofen auf unterschiedliche Temperaturen. Proben mit einer Zieltemperatur von 825°C zeigten unabhängig von der Ofenhaltezeit ein martensitisch-ferritisches Gefüge und vergleichbare mechanische Eigenschaften wie Proben, die auf 950°C erwärmt wurden.

Trotz der ausreichenden mechanischen Eigenschaften sind Temperaturen von 850°C nicht anzustreben, da die durch die niedrige Temperatur bedingten kurzen benötigten Transportzeiten jenseits des Labormaßstabes häufig nicht umsetzbar sind.

## **6.2.2 Gefüge- und Beschichtungsausbildung**

### **Material and coating texture**

Zur Bewertung von Gefüge und Beschichtungsausbildung erfolgten optische Untersuchungen mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskop (REM) sowie Überprüfungen der Schichtzusammensetzung mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX). Lichtmikroskopische Aufnahmen erfolgten mit einem Leica DM2500M Mikroskop sowie einem ATM Carat 930 Härteprüfgerät. REM- und EDX-Untersuchungen wurden mit einem Zeiss Ultra Plus Rasterelektronenmikroskop durchgeführt.

### **6.2.2.1 Grundgefüge**

#### **Material texture**

Sowohl für 22MnB5 als auch für 20MnB8 kann ein martensitisches Gefüge für alle Prozessparameter beobachtet werden. Wie in Kapitel 6.2.1.4 erläutert, ist aber davon auszugehen, dass bei Proben mit einer Zieltemperatur von 850°C auch ein Anteil an ferritischem Gefüge vorhanden ist. Es ist kein Einfluss unterschiedlicher Heizraten auf die Gefügeausbildung zu erkennen. Erhöhung von Temperatur und Haltezeit führen

besonders bei langen Haltezeiten und hohen Temperaturen zu einer Vergrößerung des Gefüges.

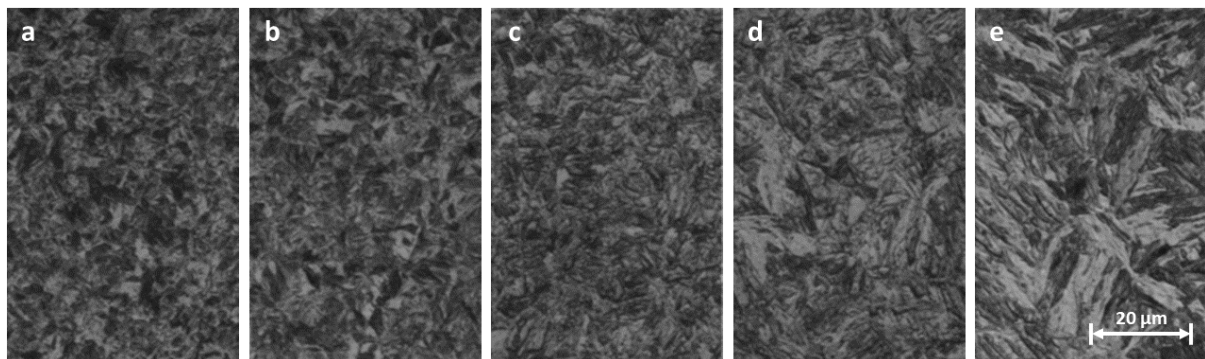


Abbildung 6-14: Gefüge von 22MnB5 nach induktiver Erwärmung mit 100% Leistung, 0 s Haltezeit und (a) 850°C, (b) 900°C, (c) 950°C, (d) 1000°C, (e) 1050°C

Figure 6-14: Microstructure of 22MnB5 after inductive heating with 100% power, 0 s dwell time and (a) 850°C, (b) 900°C, (c) 950°C, (d) 1000°C, (e) 1050°C

Abbildung 6-14 zeigt das Gefüge für 22MnB5 mit Zieltemperaturen von 850 – 950°C bei einer Haltezeit von 0 s und der schnellsten Aufheizrate. Bis 950°C scheint sich ein optisch ähnliches Gefüge einzustellen. Ab 1000°C ist eine deutliche Vergrößerung der Körner des Gefüges zu erkennen. Ähnlich verhält es sich bei einer Erhöhung Haltezeit. Bis 950°C ist der Einfluss der Haltezeit gering. Ab 950°C führt eine Erhöhung der Haltezeit zu einem vergrößerten Gefüge, vor allem bei Haltezeiten von 20 s. Der Effekt der Haltezeit auf Proben aus 22MnB5 bei Temperaturen von 900°C und 950°C ist in Abbildung 6-15 zu sehen. Während sich bei Proben mit 900°C ein vergleichbares Gefüge einstellt, zeigen Proben bei 950°C mit gleicher Haltezeit wesentlich größere Korngrenzen. Obwohl höhere Temperaturen und Haltezeiten zu einer Vergrößerung des Gefüges führen, scheint dies, wie in Kapitel 6.2.1 gezeigt, die mechanischen Eigenschaften nicht zu beeinflussen.

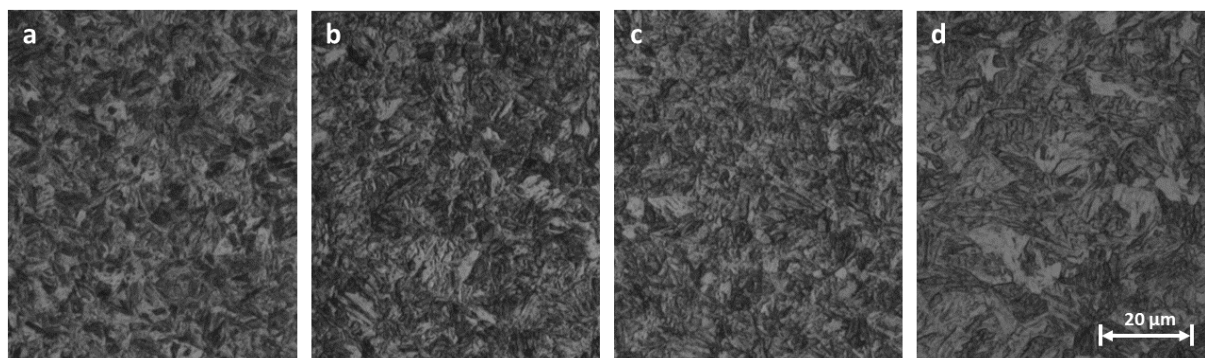


Abbildung 6-15: Gefüge von 22MnB5 nach induktiver Erwärmung mit (a) 900°C und 0 s Haltezeit, (b) 900°C und 20 s Haltezeit, (c) 950°C und 0 s Haltezeit, (d) 950°C und 20 s Haltezeit

Figure 6-15: Microstructure of 22MnB5 after inductive heating at (a) 900°C and 0 s dwell time, (b) 900°C and 20 s dwell time, (c) 950°C and 0 s dwell time, (d) 950°C und 20 s dwell time



Eine vergleichbare Entwicklung ist für Proben aus 20MnB8 zu beobachten. Da aufgrund des durch die Beschichtung bedingten niedrigeren Temperaturfensters ein Großteil der Versuche unter 950°C stattfindet, ist der Einfluss der Versuchsparameter auf das sich ausbildende Gefüge gering.

### 6.2.2.2 Beschichtungsausbildung Coating texture

Bei Al-Si beschichteten Proben konnte sowohl für induktiv als auch für konventionell erwärmte Proben nach dem Presshärten ein aus fünf Schichten bestehender Aufbau beobachtet werden. Abbildung 6-16 (a) zeigt den Schichtaufbau einer Probe die auf 950°C mit 10 s Haltezeit und 85% Umrichter-Leistung erwärmt wurde. Die chemische Zusammensetzung der einzelnen Schichten der Probe wurde mittels EDX-Messung bestimmt. Die Ergebnisse der Messung sind in Tabelle 6-2 zu sehen. Die Untersuchung der Schichtzusammensetzung weiterer Proben führte zu ähnlichen Resultaten. Die beobachtete chemische Zusammensetzung ist in guter Übereinstimmung mit den Untersuchungen von Todzy, welcher die Phasen in aufsteigender Reihenfolge von Position eins nach fünf als  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ ,  $\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{Si}$ ,  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ ,  $\alpha\text{-Fe(Al, Si)}$ ,  $\alpha\text{-Fe(Al, Si)}$  identifizierte [Tod15].

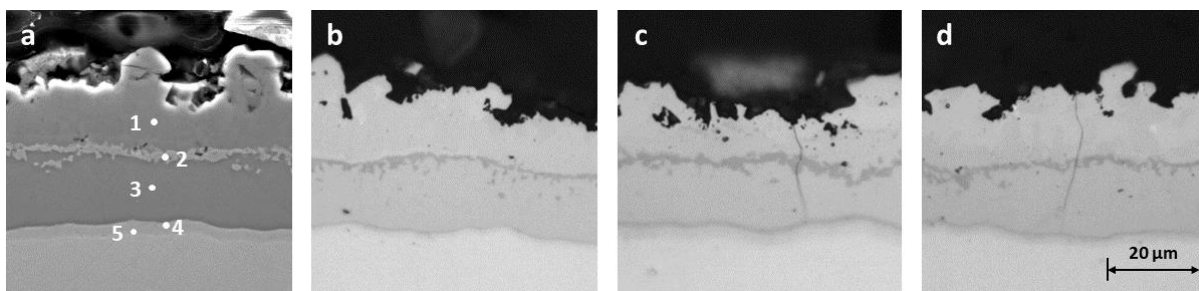


Abbildung 6-16: Gefüge der Al-Si-Beschichtung nach induktiver Erwärmung und Presshärten: (a) 950°C, 10 s Haltezeit, 85% Leistung (REM); (b) 850°C, 10 s Haltezeit, 100% Leistung; (c) 950°C, 10 s Haltezeit, 100% Leistung; (d) 950°C, 0 s Haltezeit, 100% Leistung

Figure 6-16: Microstructure of Al-Si-Coating after inductive heating and press hardening: (a) 950°C, 10 s dwell time, 85% power (SEM); (b) 850°C, 10 s dwell time, 100% power; (c) 950°C, 10 s dwell time, 100% power; (d) 950°C, 0 s dwell time, 100% power

Der Schichtaufbau ist für alle induktiven Proben sowie die Ofenproben ähnlich. Allerdings ist, wie in Abbildung 6-16 (b – d) gezeigt, ein Wachstum der Diffusionsschichten (4, 5) und der Silizium reichen  $\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{Si}$ -Schicht (2) bei höheren Temperaturen und Haltezeiten zu beobachten. So erhöht sich die Dicke der  $\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{Si}$ -Schicht von 1 – 2 µm bei 850°C ohne Haltezeit auf 5 – 10 µm bei 1050°C. Sie liegt bei allen Parametern als kontinuierlicher Streifen vor. Ein ähnliches Wachstum stellt sich auch bei den Diffusionsschichten ein. Diese sind bei 850°C ohne Haltezeit mit einer gemeinsamen Dicke von ca. 1 µm sehr schwach ausgeprägt. Bei 1050°C erreichen sie zusammen eine Dicke von ca. 10 µm. Damit sind Proben die auf 1050°C erwärmt wurden im Schichtaufbau auch den Ofenproben recht ähnlich. Diese zeigen eine vergleichbar dicke  $\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{Si}$ -Schicht und sogar noch stärker ausgeprägte Diffusionsschichten mit einer gemeinsamen Dicke von 12 – 16 µm. Dies spiegelt sich

auch in der Dicke der gesamten Schicht wieder. Die Ofenproben erreichen eine Gesamtschichtdicke von ca. 30 – 40  $\mu\text{m}$ . Die meisten induktiven Proben erreichen eine Gesamtschichtdicke von ca. 25 – 35  $\mu\text{m}$ , wobei diese mit steigenden Temperaturen und Haltezeiten leicht zunimmt. Lediglich auf 1050°C oder auf 950°C mit 20 s Haltezeit erwärmte Proben erreichen ebenfalls eine Schichtdicke von 30 – 40  $\mu\text{m}$ . Es konnte weder bei der Ausbildung der einzelnen Phasen noch der Gesamtdicke ein Einfluss der Aufheizrate ermittelt werden.

Tabelle 6-2: Chemische Zusammensetzung Al-Si-Beschichtung nach induktiver Erwärmung auf 950°C mit 10 s Haltezeit und 85% Leistung und Presshärten

Table 6-2: Chemical composition of Al-Si coating after inductive heating to 950°C with 10 s dwell time and a power of 85% and press hardening

Position	Fe [Gew.-%]	Al [Gew.-%]	Si [Gew.-%]
1	30,14	61,15	5,72
2	42,61	42,13	15,26
3	33,77	63,31	3,92
4	71,43	23,83	4,74
5	82,47	15,16	2,36

Zink beschichtete induktiv erwärmte Proben zeigen einen Aufbau aus drei Schichten. Sie unterscheiden sich damit von konventionellen Ofenproben, bei denen sich der typisch zweischichtige Aufbau aus  $\alpha\text{-Fe}(\text{Zn})$  und  $\Gamma$ -Phase ausgebildet hat [Kur15]. Induktiv erwärmte Proben weisen noch eine weitere zinkreichere Phase auf. Abbildung 6-17 (a) zeigt die REM-Aufnahme einer Zink beschichteten Probe, an der EDX-Messungen durchgeführt wurden. Die Ergebnisse der Messung sind in Tabelle 6-3 zu sehen. Die chemische Zusammensetzung bestätigt, dass es sich bei den ersten beiden Phasen um eine  $\alpha\text{-Fe}(\text{Zn})$  und eine  $\Gamma$ -Phase handelt. Aufgrund des hohen Zinkgehalts der dritten Phase wird vermutet, dass bei induktiven Proben zusätzlich noch eine  $\delta$ -Phase vorliegt.

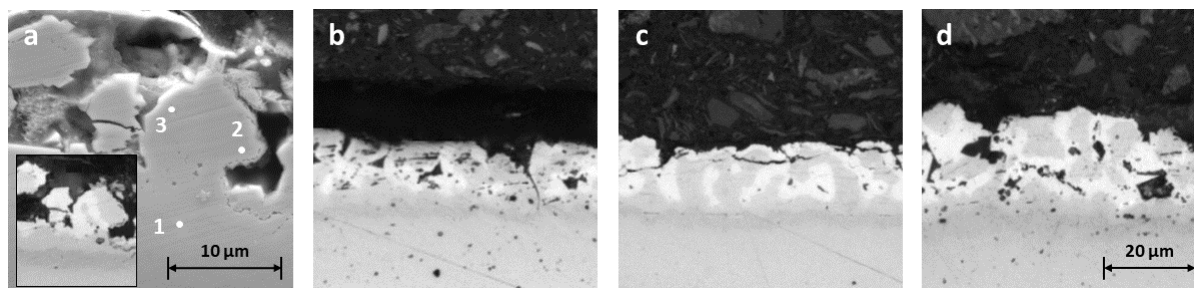


Abbildung 6-17: Gefüge der Fe-Zn-Beschichtung: (a) 850°C, 0 s Haltezeit, 92% Leistung (REM); (b) 850°C, 0 s Haltezeit, 100% Leistung; (c) 850°C, 10 s Haltezeit, 100% Leistung; (d) 920°C, 0 s Haltezeit, 100% Leistung

Figure 6-17: Microstructure of Zn-Fe-Coating: (a) 850°C, 0 s dwell time, 92% power (SEM); (b) 850°C, 0 s dwell time, 100% power; (c) 850°C, 10 s dwell time, 92% power; (d) 920°C, 0 s dwell time, 100% power

Der Aufbau aus drei Schichten ist bei allen induktiv erwärmten Proben vorzufinden. Eine Übersicht über die Ausbildung der Schicht bei verschiedenen Heizparametern ist in Abbildung 6-17 (b-d) zu sehen. Die  $\alpha$ -Fe(Zn)-Schicht bildet einen kontinuierlichen Streifen zwischen Grundmaterial und den weiteren Phasen der Beschichtung. Die  $\Gamma$ - und potentielle  $\delta$ -Phase sind globular angeordnet. Mit zunehmender Temperatur und Haltezeit ist ein Wachstum der  $\alpha$ -Fe(Zn)-Schicht zu beobachten. Diese wächst von 2 – 3  $\mu\text{m}$  bei 850°C und 0 s Haltezeit bis zu einer Dicke von 8 – 9  $\mu\text{m}$  bei einer Temperatur von 950°C. Auch bei Zink beschichtete Proben konnte kein signifikanter Einfluss der Aufheizrate auf das Beschichtungsgefüge festgestellt werden.

Tabelle 6-3: Chemische Zusammensetzung Zn-Fe-Beschichtung nach induktiver Erwärmung auf 850°C mit 0 s Haltezeit und 92% Leistung

Table 6-3: Chemical composition of Zn-Fe coating after inductive heating to 850°C, with 0 s dwell time and a power of 92% and press hardening

Position	Fe [Gew.-%]	Zn [Gew.-%]
1	64,32	35,68
2	25,70	74,30
3	11,20	88,80

Bei Proben aus dem Ofenprozess liegt die  $\alpha$ -Fe(Zn)-Phase über die gesamte Schichtdicke vor. Innerhalb der  $\alpha$ -Fe(Zn)-Schicht befinden sich globular Reste der  $\Gamma$ -Phase. Sowohl Proben aus dem Ofenprozess als auch die induktiv erwärmten Proben erreichen unabhängig von den Prozessparametern eine Gesamtschichtdicke von 15 – 20  $\mu\text{m}$ .

Eine Hochtemperaturoxidation des Zinkes bedingt durch die schnellen Heizraten konnte während der Versuche nicht beobachtet werden. Sogar die Proben, die gezielt auf 950°C überhitzt wurden, zeigten nur leichte Oxidationserscheinungen am Rand des Bleches.

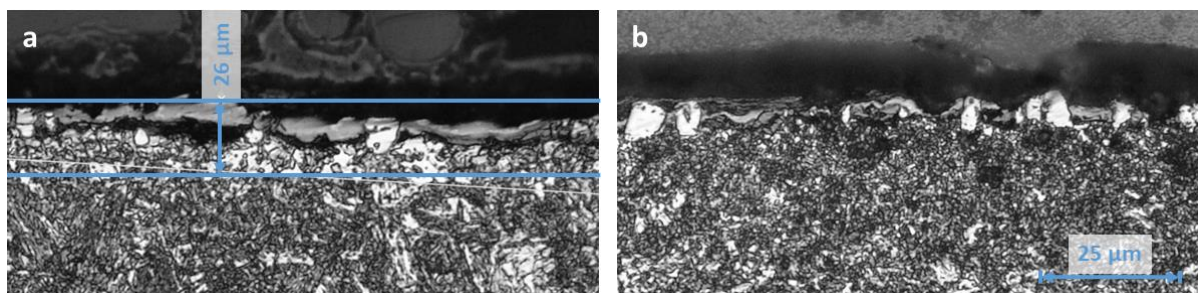


Abbildung 6-18: Gefüge der nano-Beschichtung nach Ätzung: (a) Erwärmung im Ofen, (b) induktive Erwärmung

Figure 6-18: Microstructure of nano-coating after etching: (a) furnace heating, (b) inductive heating

Bei den mit beschichteten Proben konnte kein Unterschied der Beschichtung in Abhängigkeit der induktiven Erwärmungsparameter festgestellt werden. Sowohl im

Ofen als auch bei der Induktion verbleibt eine dünne Restschicht mit vereinzelt Aluminiumoxiden auf der Probe. Wie in Abbildung 6-18 (a) gezeigt, bildet sich bei der Ofenerwärmung eine bis zu 30 µm dicke Einflusszone der Beschichtung aus. Nach Untersuchungen von Goedicke et al. kann diese Zone eine Dicke von bis zu 50 µm erreichen. Bei induktiv erwärmten Proben ist, wie in Abbildung 6-18 (b) zu sehen, kein Einflussbereich durch die Beschichtung zu erkennen. Dies könnte ggf. ein Grund für die in Kapitel 6.2.1.3 ermittelten unterschiedlichen Biegewinkel von induktiv und konventionell erwärmten Proben sein. Unabhängig von der verwendeten Erwärmungsart war keine Verzunderung der Proben festzustellen.

### **6.2.3 Beschichtungseigenschaften** **Coating properties**

Um den Einfluss des Beschichtungsgefüges auf die Eigenschaften der Beschichtung abzuschätzen, wurden die Proben auf Schweißbarkeit und Korrosionswiderstand untersucht. Zur Überprüfung der Schweißbarkeit wurden Durchgangswiderstandsprüfungen nach DVS2929-1 und DVS2929-3 durchgeführt. Eine erste Einschätzung des Korrosionswiderstandes erfolgte über elektrochemische Untersuchungen. Es wurden lineare Voltammetrie Versuche (engl. Linear Sweep Voltammetry (LSV)) in einer 0,5%-NaCl-Lösung mit einer Silber-Silberchlorid-Elektrode (Ag/AgCl-Elektrode) durchgeführt.

#### **6.2.3.1 Schweißbarkeit** **Weldability**

Die Schweißbarkeit aller Beschichtungen wurde untersucht und mit dem konventionellen Prozess verglichen. Die Ergebnisse der Durchgangswiderstandsmessung für Al-Si beschichtete Proben werden in Abbildung 6-19 (a) dargestellt. Für die Referenzproben ergibt sich ein mittlerer Durchgangswiderstand von  $0,20 \pm 0,01$  mΩ. Induktiv erwärmte Proben erreichen mittlere Widerstände von  $0,17 \pm 0,01$  mΩ bei einer Erwärmung auf 900°C mit 0 s Haltezeit und 85% Umrichter-Leistung bis  $0,37 \pm 0,04$  mΩ bei Erwärmung auf 950°C mit 20 s Haltezeit und 92% Umrichter-Leistung. Proben mit Haltezeit weisen, mit Ausnahme von Proben die auf 900°C mit 10 s Haltezeit bei 92% Leistung, einen höheren Durchgangswiderstand als Proben ohne Haltezeit auf, welche ca. auf dem Niveau der Referenzproben liegen. Außerdem scheint eine Erhöhung der Temperatur bei erhöhter Haltezeit zu einem zusätzlichen Anstieg des Durchgangswiderstandes zu führen. Trotz der erhöhten Widerstände in Abhängigkeit von Haltezeit und Temperatur sind alle Werte ausreichend gering, um eine gute Schweißbarkeit zu gewährleisten.

Bei Zink beschichtete Proben erfolgte nach Erwärmung und Presshärten eine Entfernung der Oxidschicht mittels Kugelstrahlen. Die Ergebnisse der Durchgangswiderstandsmessung für Zink beschichtete Proben werden in Abbildung 6-19 (b) gezeigt.

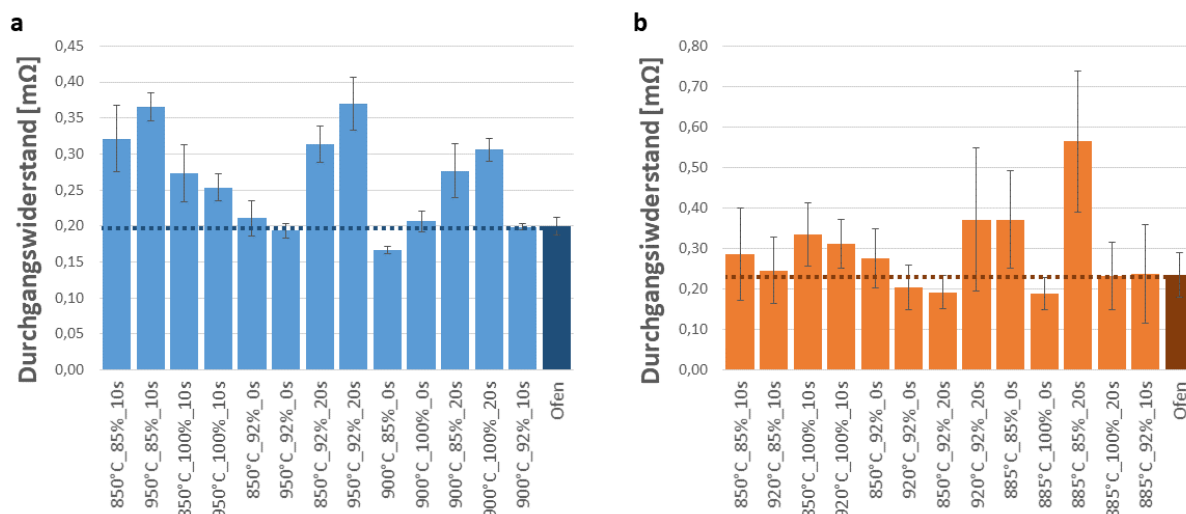


Abbildung 6-19: Durchgangswiderstand induktiv und konventionell erwärmter Proben: (a) 22MnB5+AlSi, (b) 20MnB8+ZnFe (gestrahlt)

Figure 6-19: Transition resistance of inductive and conventional samples: (a) 22MnB5+AlSi, (b) 20MnB8+ZnFe (blasted)

Die Zink beschichteten Proben weisen generell höhere Abweichungen innerhalb eines Parametersets auf als Al-Si beschichtete Proben. Der mittlere Durchgangswiderstand liegt allerdings mit Ausnahme von Proben, die auf 885°C mit 10 s Haltezeit und 85% Leistung erwärmt wurden, ebenfalls unter 0,37 mΩ. Der minimale Widerstand wurde sowohl bei Proben ermittelt die auf 850°C mit 20 s Haltezeit und 92% Leistung erwärmt wurden als auch bei Proben mit einer Temperatur von 885°C, einer Haltezeit von 0 S und einer Leistung von 100%. Beide erreichten einen Durchgangswiderstand von 0,19±0,04 mΩ. Der maximale ermittelte Durchgangswiderstand beträgt 0,56±0,18 mΩ. Es konnte keine eindeutige Abhängigkeit des Widerstandes von den Aufheizparametern festgestellt werden. Die Untersuchung der konventionell erwärmten Proben lieferte einen Durchgangswiderstand von 0,23±0,06 mΩ.

Tabelle 6-4: Durchgangswiderstand unbehandelter 20MnB8+ZnFe Proben nach induktiver Erwärmung

Table 6-4: Transition resistance of untreated 20MnB8+ZnFe samples after inductive heating

Parameter	Mittelwert [mΩ]	Mittelwertabweichung [mΩ]
920°C, 92%, 20 s	0,20	0,03
885°C, 100%, 0 s	0,50	0,21
885°C, 100%, 20 s	0,47	0,36
850°C, 100%, 0 s	0,17	0,04

Zusätzlich wurde auch der Durchgangswiderstand bei ausgewählten induktiv erwärmten Proben ermittelt ohne zuvor die Oxidschicht zu entfernen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-4 zu sehen. Ähnlich zu den behandelten Proben ist keine Abhängigkeit des sich einstellenden Widerstandes von den Erwärmungsparametern zu erkennen.

Die Widerstände liegen zwischen  $0,17 \pm 0,04 \text{ m}\Omega$  und  $0,50 \pm 0,21 \text{ m}\Omega$  und damit in einem ähnlichen Bereich wie kugelgestrahlte Proben. Das bedeutet, dass für induktiv erwärmte Proben ggf. auf eine Entfernung der Oxidschicht zur Gewährleistung der Schweißbarkeit verzichtet werden kann.

Für beschichtete Proben ließ sich kein Unterschied zwischen induktiv und im Ofen erwärmten Proben feststellen. Für alle Proben ergab sich ein mittlerer Durchgangswiderstand von  $10,05 \pm 6,43 \text{ m}\Omega$ . Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Untersuchungen von Goedicke et al. zum Durchgangswiderstand von Beschichtungen der zweiten Generation [Goe08]. Die hohe Abweichung des Durchgangswiderstandes ist vermutlich in der durch die manuelle Auftragung bedingte schwankende Schichtdicke begründet, da diese einen großen Einfluss auf die Schweißbarkeit der Beschichtung hat.

### 6.2.3.2 Korrosionswiderstand Corrosion resistance

Die elektrochemische lineare Voltametrie soll zur ersten Abschätzung des Korrosionsverhaltens der induktiv erwärmten Proben dienen. Untersucht wurden nur Aluminium-Silizium und Zink beschichtete Proben, da der Zunderschutz keinen Korrosionsschutz bietet. Die Ergebnisse für Al-Si-Proben sind in Abbildung 6-20 (a) zu sehen.

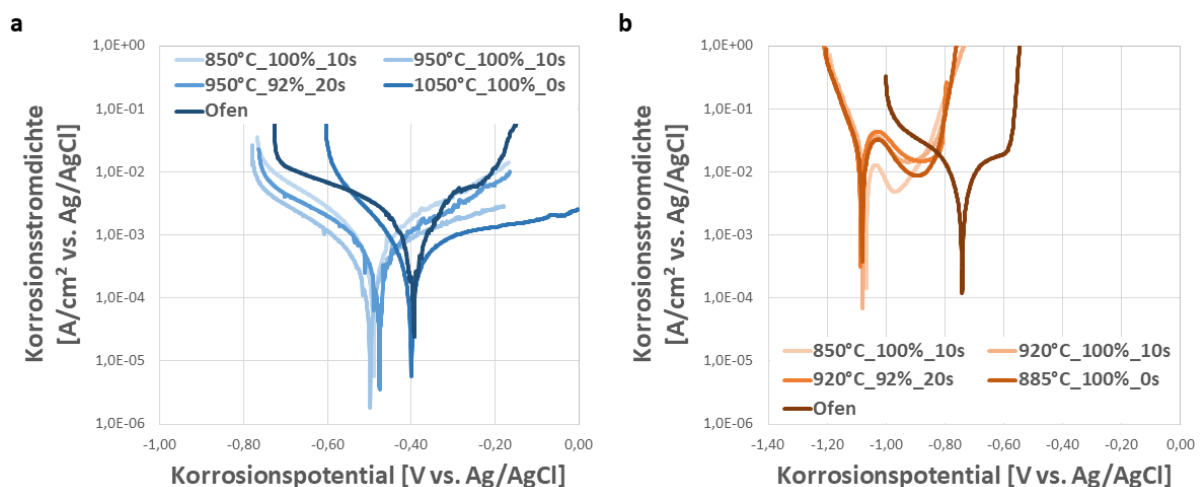


Abbildung 6-20: Ergebnisse der linearen Voltametrie Untersuchung: (a) 22MnB5+AlSi, (b) 20MnB8+ZnFe

Figure 6-20: Results of linear sweep voltammetry: (a) 22MnB5+AlSi, (b) 20MnB8+ZnFe

Die Korrosionsstromdichte liegt für induktiv und konventionell erwärmte Proben in der gleichen Größenordnung. Allerdings weisen induktiv erwärmte Proben mit -0,48 V bis -0,50 V ein geringeres elektrochemisches Potential auf als Proben aus dem Ofenprozess mit -0,39 V. Eine Ausnahme bilden Proben die auf 1050°C erwärmt wurden. Diese weisen ein ähnliches Potential wie die Ofenproben auf. Wie in Kapitel 6.2.2.2 gezeigt sind diese Proben auch die einzigen, die bezogen auf die Ausbildung der Teilschichten einen ähnlichen Aufbau zeigen wie konventionelle Ofenproben. Das

geringe elektrochemische Potential der induktiven Proben weist auf einen geringeren Anteil an Eisen, bedingt durch die kürzeren Diffusionszeiten, in der Beschichtung hin. Ähnliche Beobachtungen wurden von Todzi in seinen Untersuchungen gemacht [Tod15]. Todzi konnte außerdem bei Korrosionstests eine geringere Lackunterwanderung in Abhängigkeit des geringeren Eisengehaltes feststellen [Tod15]. Auch Maki et al. konnten eine Reduzierung des Aluminiumgehaltes und damit einhergehend eine Verschlechterung des Korrosionsschutzes bei Erhöhung von Temperatur und Haltezeit beobachten [Mak11]. Es ist daher davon auszugehen, dass induktiv erwärmte Proben einen gleichwertigen oder besseren Korrosionsschutz bieten können als Proben aus dem Ofenprozess. Nachteilig ist lediglich die etwas geringere Schichtdicke bei induktiver Erwärmung.

Die Zink beschichteten Proben wurden, wie bei der Untersuchung der Schweißbarkeit, im Vorfeld zu den Versuchen kugelgestrahlt. Die Stromdichte-Potentialkurven der Proben sind in Abbildung 6-20 (b) zu sehen. Auch hier liegt die Korrosionsstromdichte für induktiv und konventionell erwärmte Proben in derselben Größenordnung. Das elektrochemische Potential der induktiven Proben ist mit  $-1,07 - -1,09$  V allerdings wesentlich geringer als das Potential der Ofenproben. Diese erreichten ein Potential von  $-0,74$  V. Die Ursache hierfür ist das Auftreten der dritten zinkreichen Phase bei induktiv erwärmten Proben. Der Zinkanteil dieser Phase ist, wie in Kapitel 6.2.2.2 diskutiert, wesentlich höher als der Zinkanteil der beim Ofenprozess auftretenden  $\Gamma$ - und  $\alpha$ -Fe(Zn)-Phasen. Aufgrund des niedrigen elektrochemischen Potentials ist davon auszugehen, dass die induktiv erwärmten Proben einen guten kathodischen Korrosionsschutz bieten können. Da die Schichtdicke von induktiven und konventionellen Proben ähnlich ist, ist auch durch induktiv erwärmte Proben ein guter Korrosionsschutz zu erwarten.

### **6.3 Zusammenfassung der Prozessfensterbestimmung** **Summary of the process window investigations**

Die Prozessfensterbestimmung diente zur Einschätzung des Einflusses unterschiedlicher Aufheizparameter während der induktiven Erwärmung auf die Eigenschaften von Werkstoff und Beschichtung. Dazu wurden Proben mit unterschiedlichen Temperaturen, Haltezeiten und Aufheizraten erwärmt und mit konventionellen Proben aus dem Ofenprozess verglichen. Untersucht wurde neben den mechanischen Eigenschaften auch die Ausbildung des Gefüges von Grundwerkstoff und Beschichtung sowie die Beschichtungseigenschaften.

Es hat sich gezeigt, dass unabhängig von den gewählten Prozessparametern vergleichbare mechanische Eigenschaften durch induktive Erwärmung wie im Ofenprozess erreichen lassen. Höhere Haltezeiten und Temperaturen führen zwar zu einer Vergrößerung des Werkstoffgefüges, dies hat aber keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Aluminium-Silizium und Zink beschichtete Proben zeigen einen gleichen Schichtaufbau über alle Induktionsparameter. Allerdings kommt es in Abhängigkeit von Temperatur und Haltezeit zum Wachstum einzelner Teilschichten. Dies äußert sich vor allem bei Proben aus 22MnB5+AlSi in einem Anstieg des Durchgangswiderstandes. Für Zink und beschichtete Proben kann kein Einfluss der Aufheizparameter auf den Durchgangswiderstand beobachtet

werden. Auch die Korrosionsuntersuchungen ließen, mit Ausnahme von stark überhitzten Proben keinen signifikanten Einfluss der Parameter auf das elektrochemische Verhalten der Proben erkennen.

Zusammenfassend ergeben sich also folgende Schlussfolgerungen:

- Die durch Induktion erwärmten Proben erreichen zum Ofenprozess vergleichbare oder leicht bessere Eigenschaften.
- Es kann kein Einfluss der gewählten Aufheizraten auf die Eigenschaften der Proben festgestellt werden.
- Es kann kein positiver Einfluss erhöhter Temperaturen auf die Eigenschaften der Proben festgestellt werden.
- Es kann kein positiver Einfluss von Haltezeiten auf die Eigenschaften der Proben festgestellt werden.

Für die Auslegung des Prozesses zur Herstellung des Demonstratorbauteils bedeutet dies, dass keine Haltezeiten zum Erreichen der gewünschten Eigenschaften vorgesehen werden müssen. Da kein Einfluss durch die Aufheizraten vorhanden zu sein scheint, kann eine Erwärmung mit der schnellst möglichen Aufheizrate erfolgen. Die Temperatur kann entsprechend der vorliegenden Abkühlbedingungen und des benötigten Transportweges so niedrig wie möglich gewählt werden.

In Bezug auf die in Kapitel 4 durchgeführten Simulationen lässt sich außerdem festhalten, dass obwohl eine komplett homogene Temperaturverteilung nicht erreichbar ist, homogene Eigenschaften des Bauteils eingestellt werden können. Die Prozessfensteruntersuchungen haben gezeigt, dass bei einer erwarteten Temperaturabweichung von  $\pm 4\%$  der Temperaturbereich so gewählt werden kann, dass die resultierenden Eigenschaften von Werkstoff und Beschichtung über das komplette Bauteil vergleichbar sind.



## 7 Demonstratorherstellung und Test Sample component production and testing

### *Kurzfassung*

*Bei der Herstellung des Demonstratorbauteils werden alle bisher erzielten simulativen und experimentellen Ergebnisse zusammengeführt, um das Verfahren am Realteil zu validieren. Das zuvor gewählte Demonstratorbauteil wurde entsprechend der ermittelten Prozessparameter erwärmt und pressgehärtet. Untersucht wurden die Homogenität der Temperatur während der Erwärmung sowie die mechanischen Eigenschaften und die Beschichtungsausbildung verteilt über das Bauteil. Die Eigenschaften der induktiv erwärmten Bauteile wurden außerdem mit Bauteilen aus dem Ofenprozess verglichen.*

*Es hat sich gezeigt, dass die erreichte Temperaturverteilung während des Aufwärmens gut mit der Simulation übereinstimmt. Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften ergab hohe Festigkeiten und Härtewerte unabhängig von der Temperaturverteilung. Es konnte eine ähnliche Ausbildung der Beschichtung wie bei vergleichbaren Parametern in der Prozessfensterbestimmung beobachtet werden. Insgesamt schnitten induktiv erwärmte Bauteile gleich oder leicht besser ab als konventionell im Ofen erwärmten Bauteile. Es konnte gezeigt werden, dass sich die induktive Erwärmung zur Herstellung von seriennahen Bauteilen eignet.*

### *Abstract*

*During sample part production all experimental results and results calculated by simulation are combined to validate the method on a real component. The previously chosen sample component was heated and press hardened according to the determined process window. Investigated were the temperature homogeneity during heating as well as mechanical properties and coating structure across the part. Additionally, the properties of inductively heated parts have been compared to parts from a furnace process.*

*It could be determined that the temperature distribution during heating is in good agreement with simulation results. The investigation on part properties revealed high strength and hardness independent of temperature distribution. It could be shown, that the resulting coating structure was comparable to the structure of similar samples with parameters during process window identification. Overall inductively heated parts performed equally or slightly better than conventionally heated parts. It could be shown that inductive heating of close to series production parts is possible.*

## 7.1 Versuchsaufbau und -durchführung Experimental set-up and procedure

Um die in den vorherigen Kapiteln erzielten Ergebnisse zu validieren, wurde ein Versuchsstand beim Projektpartner Volkswagen in Kassel aufgebaut. Ziel war die Untersuchung der induktiven Erwärmung am Realbauteil und damit die Zusammenführung der simulativen und experimentellen Ergebnisse. Der dafür verwendete Versuchsaufbau sowie die Versuchsdurchführung werden im Folgenden vorgestellt

### 7.1.1 Versuchsaufbau und untersuchte Materialien Experimental setup and reviewed materials

Der Versuchsaufbau setzte sich aus einem von der Firma SMS Elotherm bereitgestellten Hochfrequenzumrichter samt Kondensatorbank, der in Abbildung 7-1 (a) gezeigten Induktionseinheit und einer Presse in der Einrichtungsline der Firma Volkswagen zusammen. Der eingesetzte Umrichter hatte eine Arbeitsfrequenz von 400 kHz, eine Leistung von 250 kW und eine Ausgangsspannung von 450V, welche durch die Kondensatorbank verdoppelt wurde. Die Presse wurde für alle Versuche mit einer Pressenkraft von 5000 kN und einer Arbeitsgeschwindigkeit von 250 mm/s betrieben. Das eingesetzte Pressenwerkzeug stammt von der Firma Kirchhoff Automotive und dient zur Herstellung von B-Säulen auf Versuchsebene. Da die Leistung des bereitgestellten Umrichters, wie in Kapitel 3.2 diskutiert, nicht für die Erwärmung eines kompletten Bauteils ausreicht, wurde das Demonstratorbauteil, wie in Abbildung 7-1 (b) dargestellt, auf den Kopf der B-Säule beschränkt.

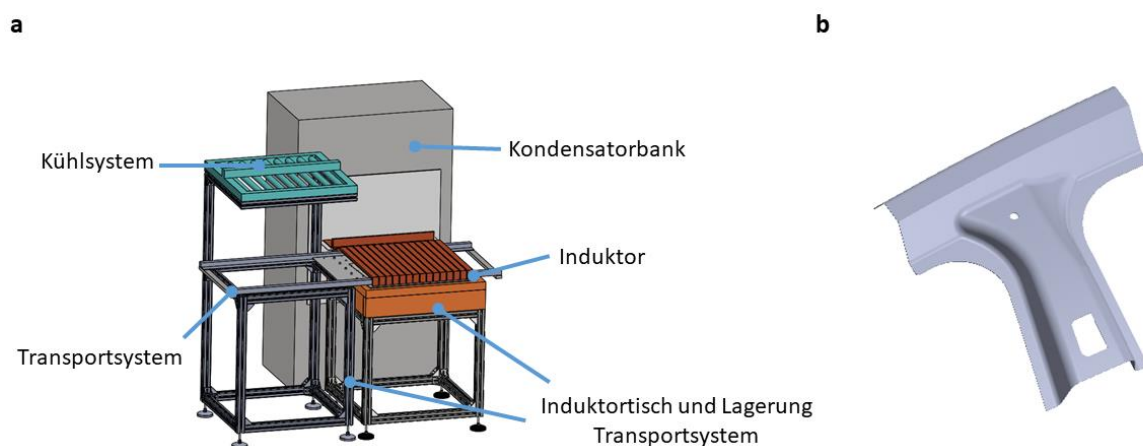


Abbildung 7-1: (a) Versuchsaufbau der Induktionseinheit und (b) Bauteil der Demonstratorerstellung  
Figure 7-1: (a) Experimental setup of the induction unit and (b) component of sample part production

Die Induktionseinheit selbst setzte sich aus dem Induktor samt Lagerung, einem Transportsystem sowie einer Kühlung zur Fertigung Zink beschichteter Proben zusammen. Der Induktor wurde aus 30 x 10 mm Kupfervierkantprofilen mit einer Wandstärke von 2 mm gefertigt. Die Innenraumabmessungen des Induktors betragen 520 x 520 x 30 mm. Gelagert wurde der Induktor auf einem Sockel aus Holz mit einem

Grundgerüst aus Aluminium-Vierkantprofilen. Das Transportsystem diente wie schon in den Vorversuchen sowohl zum Platinentransport als auch zur elektrischen und thermischen Isolierung während der Erwärmung. Dazu wurde erneut eine Grundplatte aus DOTHERM700 eingesetzt. Die Lagerung der Platine erfolgte ebenfalls aus DOCERAM Volcera Siliziumnitrid Stiften. Um eine Reibung zwischen Lagerungsstiften und der heißen Platine, welche in den Vorversuchen zu einer Schädigung der Beschichtung führte, zu vermeiden, wurde auf einen Transport durch direkte Bewegung der Platine verzichtet. Stattdessen wurde die Grundplatte als Transportschlitten auf einem Führungssystem aus Faserverbundkunststoffschiene ausgelegt. So kann die Platine ohne Relativbewegung zur Lagerung aus dem Induktor befördert werden. Zusätzlich zur Grundplatte wurde eine weitere DOTHERM700 Platte oberhalb der Führungsschiene an der oberen Innenseite des Induktors platziert. Diese diente einerseits der zusätzlichen Wärmeisolierung und sollte andererseits für den Fall einer Platinenverformung während der Erwärmung einen Kontakt zwischen Platine und Induktor verhindern. Für die Kühlung der Zink beschichteten Proben wurde ein Ventilatorgebläse aus der Einrichtungslinie von Volkswagen eingesetzt.

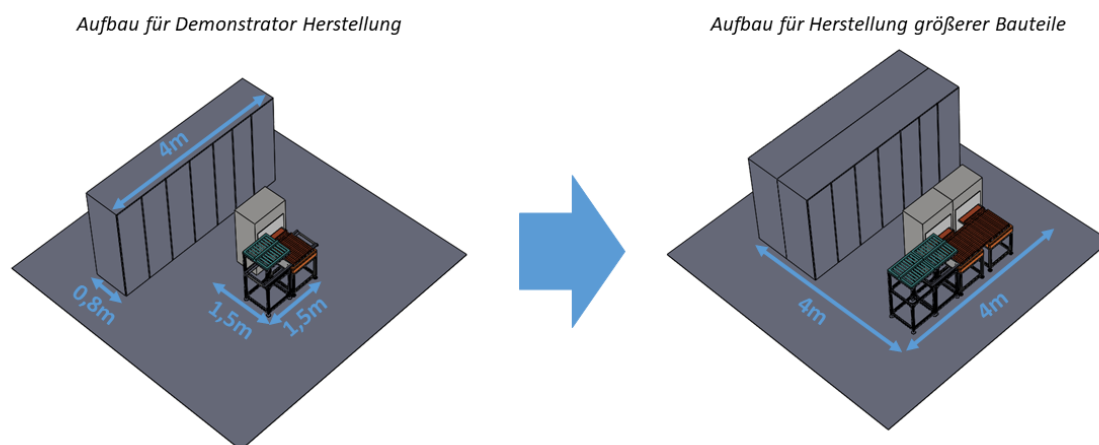


Abbildung 7-2: Abmessungen der Versuchsanlage und einer Anlage zur Herstellung größerer Bauteile

Figure 7-2: Dimensions of the experimental setup and a process layout for the production of bigger parts

Die Gesamtabmessungen des Versuchsaufbaus sind in Abbildung 7-2 dargestellt. Die Induktionseinheit mit Kondensatorbank benötigte eine Grundfläche von ca. 1,5 x 1,5 m bei einer Höhe von 0,9 m. Hinzu kommt der Platzbedarf des Umrichterschranks mit Abmessungen von 4,0 x 0,8 x 2,2 m. Wird der Versuchstand um einen weiteren Umrichter erweitert, um so die Fertigung größerer Bauteile, z.B. einer vollen B-Säule, zu ermöglichen, ergibt sich ein Flächenbedarf von 16 m<sup>2</sup> für die vollständige Anlage. Durch Platzierung der Umrichterschränke ober- oder unterhalb der Induktionseinheit lässt sich der Grundflächenbedarf noch weiter reduzieren.

Bei der Fertigung des Demonstratorbauteils wurden dieselben Werkstoffe und Beschichtungen wie bei der Prozessfensterbestimmung eingesetzt. Diese werden in Kapitel 6.1.2 vorgestellt. Die Vordiffusion der 22MnB5+AlSi-Proben erfolgte ebenfalls

mit den gleichen Parametern. Lediglich die Aufbringung der Beschichtung wurde diesmal durch ein PA-Mitglied durchgeführt. Die Platinengeometrie der Proben wurde per Laserstrahlschneiden aus dem Blech getrennt.

### 7.1.2 Versuchsdurchführung Testing procedure

Um die Eigenschaften der induktiv gefertigten Bauteile vergleichen zu können, wurden zunächst Referenzproben durch Erwärmung im Rollenherdofen gefertigt. Die Temperaturkurven für Proben aus 22MnB5 und 20MnB8 sind in Abbildung 7-3 zu sehen. Diese wurden per Schleppmessung mit Ni-CrNi-Thermoelementen ermittelt. Proben aus 22MnB5 wurden auf 950°C mit einer Ofenhaltezeit von 300 s erwärmt. Die Transportzeit von Ofen zur Presse betrug 5 s. Die Proben hatten daher beim Einlegen ins Werkzeug eine Temperatur von ca. 820 C. Aufgrund der manuellen Bedienung betrug die Pressenschließzeit zwischen 4 s und 5 s. Proben aus 20MnB8 wurden mit einer Ofenhaltezeit von 205 s auf 890°C erwärmt

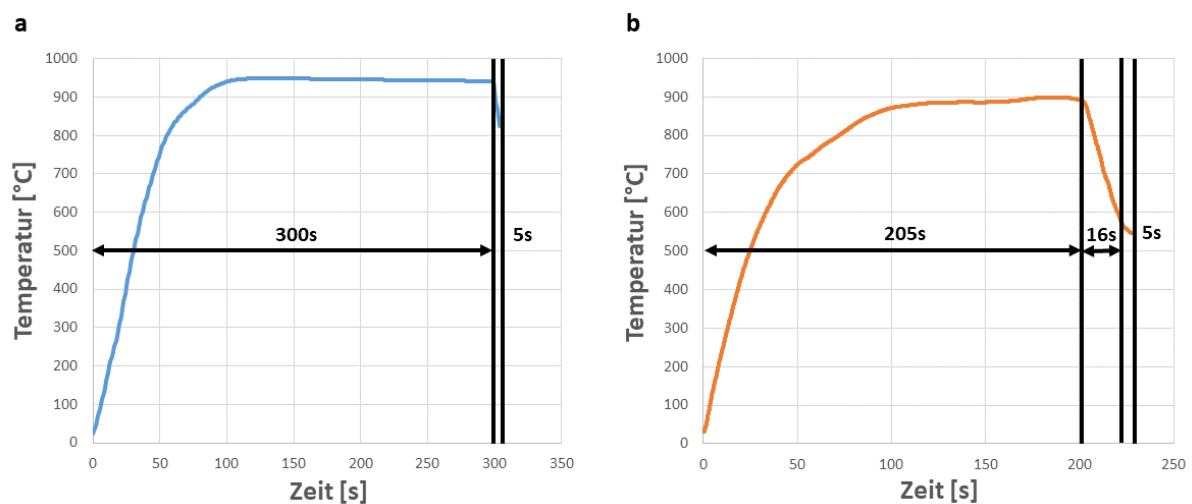


Abbildung 7-3: Temperaturkurven der Referenzproben des Demonstratorbauteils für (a) 22MnB5 und (b) 20MnB8

Figure 7-3: Temperature curve for reference parts of sample component production for (a) 22MnB5 and (b) 20MnB8

Proben aus 20MnB8 wurden mit einer Ofenhaltezeit von 205 s auf 890°C erwärmt. Nach der Erwärmung folgte eine 16 s lange aktive Abkühlung unter Druckluft und ein 5 s Transport zur Presse. Beim Einlegen ins Werkzeug erreichten die Proben eine Temperatur von ca. 550°C. Auch hier betrug die Pressenschließzeit 4 – 5 s.

Die Parameter für die induktive Erwärmung wurden entsprechend der in der Kapitel 6.3 zusammengefassten Schlussfolgerungen ohne Haltezeit und mit maximaler Aufheizrate festgelegt. Nach ersten Vorversuchen zu Homogenität sowie Transport- und Pressenzeiten wurde die Zieltemperatur für 22MnB5 auf 950°C gesetzt, da so die Proben nach dem Transport noch bei Temperaturen von über 750°C in die Presse eingelegt werden konnten. Die Zieltemperatur von Proben aus 20MnB8 wurde auf 890°C festgelegt, um eine Hochtemperaturoxidation zu vermeiden. Die benötigten

Leistungskurven des Umrichters wurden wie schon in der Prozessfensterbestimmung über Ni-CrNi-Thermoelementmessungen ermittelt. Die resultierenden Temperaturkurven sind in Abbildung 7-4 zu sehen.

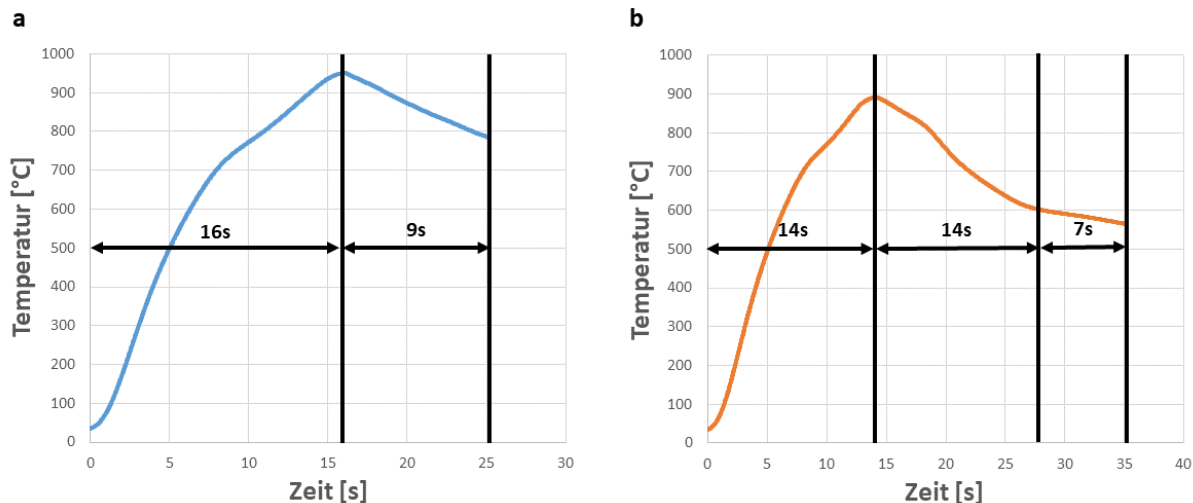


Abbildung 7-4: Temperaturkurven der induktiven Erwärmung des Demonstratorbauteils für (a) 22MnB5 und (b) 20MnB8

Figure 7-4: Temperature curves for inductive heated of the sample component for (a) 22MnB5 and (b) 20MnB8

Die Zieltemperatur von 950°C konnte mittels induktiver Erwärmung innerhalb von 16 s erreicht werden. Für den Transportweg vom Induktor zur Presse wurden 9 s benötigt. Die Proben hatten beim Einlegen in die Presse eine Temperatur von ca. 780°C. Eine Erwärmung auf 890°C konnte innerhalb von 14 s realisiert werden. Hinzu kamen 14 s aktive Abkühlung unter Druckluft sowie 7 s Transportweg von der Kühlvorrichtung zur Presse. Dadurch konnten beim Einlegen in die Presse Temperaturen von 530°C bis 560°C erreicht werden. Für alle Proben betrug die Pressenschließzeit zwischen 4 s und 5 s.

Nach der Erwärmung wurden die Proben mit Hilfe des Transportschlittens aus dem Induktor gezogen und von dort manuell per Zange zur Presse transportiert. Das Presshärten erfolgte im ungekühlten Werkzeug. Die Zeiten der einzelnen Prozessschritte wurden bei jedem Versuch erfasst und dokumentiert. Pro Beschichtung wurden jeweils zwei Referenzbauteile und mindestens drei induktiv erwärmte Bauteile hergestellt.

## 7.2 Ergebnisse der experimentellen Versuche Results of the experimental investigation

Um die Eignung der induktiven Erwärmung für den Presshärteprozess zu ermitteln wurden die Eigenschaften des induktiv erwärmten Bauteils untersucht und mit Referenzbauteilen aus dem Ofenprozess verglichen. Dazu wurden Härtemessungen und Zugversuche durchgeführt sowie das resultierende Beschichtungsgefüge im Bauteil untersucht. Außerdem wurde die Homogenität der Temperaturverteilung bei

induktiver Erwärmung überprüft. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

### 7.2.1 Überprüfung der Homogenität Examination of homogeneity

Zunächst wurde die allgemeine Homogenität der Temperaturverteilung des Demonstratorbauteils untersucht. Dazu wurden sowohl Thermographieaufnahmen mit einer FLIR A325sc Kamera als auch Messungen mit Ni-CrNi-Thermoelementen durchgeführt. Aufgrund des geringen Bauraums im Inneren des Induktors war die Aufnahme von thermographischen Messungen erst nach einem Herausziehen des Bauteils aus dem Induktor möglich. Alle thermographischen Aufnahmen fanden daher ca. 2 s nach Beendigung des Aufheizvorgangs statt.

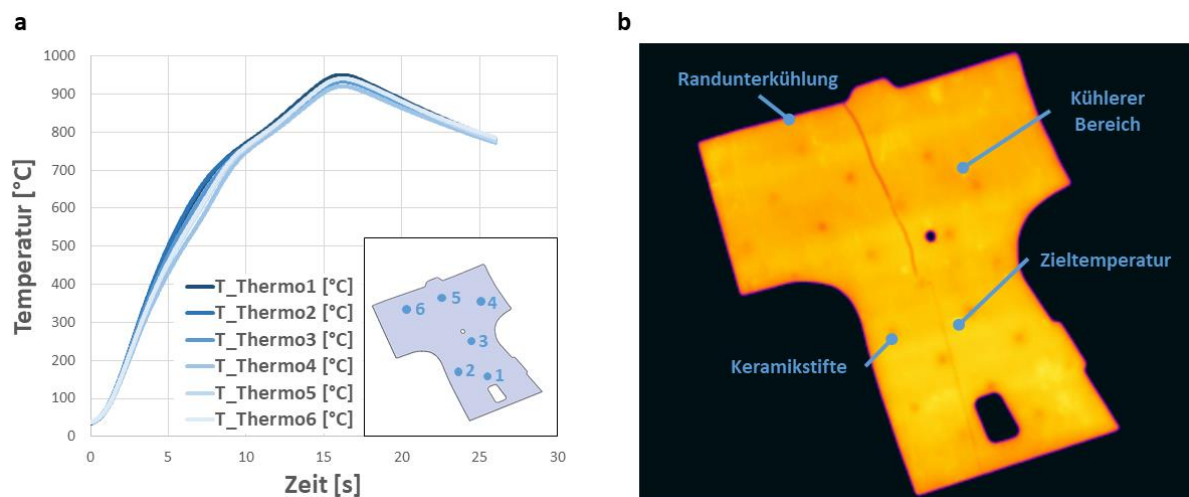


Abbildung 7-5: Homogenität der Temperaturverteilung bei induktiver Erwärmung: (a) Thermoelementmessung, (b) Aufnahme Thermographie-Kamera

Figure 7-5: Homogeneity of temperature distribution during inductive heating: (a) Thermocouple measurement, (b) recording thermal imaging camera

Abbildung 7-5 zeigt die Ergebnisse für eine Probe aus 22MnB5+AlSi bei Erwärmung auf 950°C. Aus der thermographischen Aufnahme in Abbildung 7-5 (b) geht hervor, dass sich am Fuß der Platine ein wärmerer Bereich und am Kopf der Platine ein kühlerer Bereich ausbildet. Außerdem kommt es an den Blechkanten unabhängig davon ob es sich um den Rand der Platine oder Aussparungen handelt sowie an den Kontaktflächen mit den Keramikstiften zu einer Unterkühlung. Unterstützende Thermoelementmessungen, zu sehen in Abbildung 7-5 (a), haben gezeigt, dass der Temperaturunterschied zwischen kühleren und wärmeren Platinenbereichen ca. 30 K beträgt. Der Temperaturabfall an den Blechkanten und den Kontaktflächen zu den Keramikstiften wurde mittels Thermographie mit bis zu 40 K, 2 s nach Beendigung des Aufheizvorgangs, bestimmt. Die Ergebnisse der thermografischen Auswertung und der Thermoelementmessungen sind in guter Übereinstimmung mit den in Kapitel 4 vorgestellten Simulationsergebnissen.

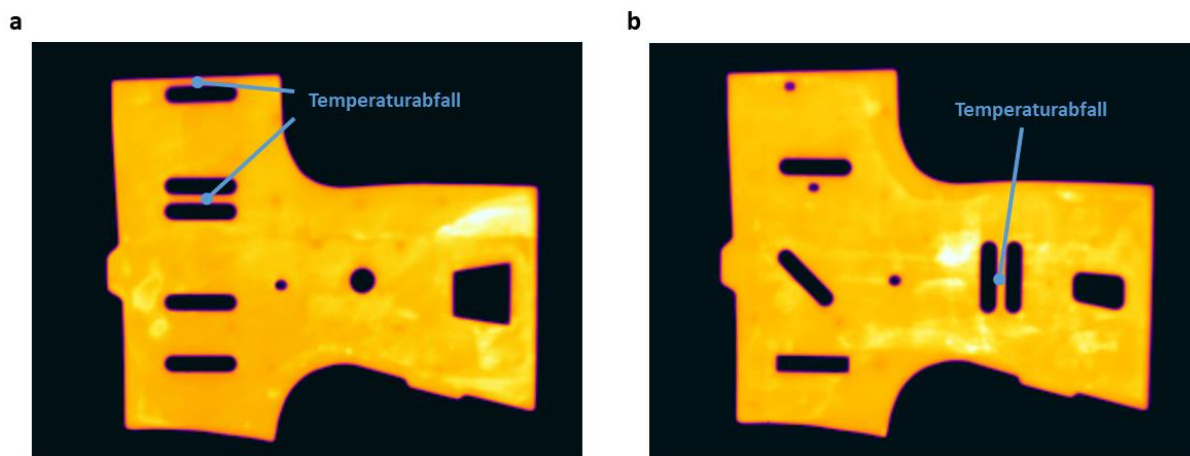


Abbildung 7-6: Temperaturverteilung entlang kritischen Geometrien anhand unterschiedlicher Muster (a, b)

Figure 7-6: Temperature distribution along critical geometries by means of different patterns (a, b)

Zusätzlich wurde der Einfluss unterschiedlicher Geometrien auf die Temperaturverteilung untersucht. Dazu wurden in Platinen gezielt Aussparungen entsprechend des in Kapitel 3 diskutierten Bauteilkatalogs eingebracht. Dabei wurden die Größe, Lage und der Abstand zueinander sowie zum Rand im Rahmen der aus dem Bauteilkatalog hervorgehenden Grenzen variiert. Die resultierenden Muster und Temperaturverteilungen sind in Abbildung 7-6 (a) und (b) zu sehen. Es zeigt sich, dass einzelne Geometrien unabhängig von Form und Lage eine ähnliche Unterkühlung aufweisen wie der Rand der Platine. Problematisch sind lediglich Geometrien mit großer Abmessung, die sehr nah aneinander oder am Rand platziert werden, zu sehen anhand der großen Langlöcher mit geringem Abstand. Diese hatten eine Abmessung von 62 x 18 mm und einen Abstand von 10 mm zueinander bzw. zum Rand. Hier konnten Unterkühlungen auf dem kompletten Trennstreifen von bis zu 100 K festgestellt werden.

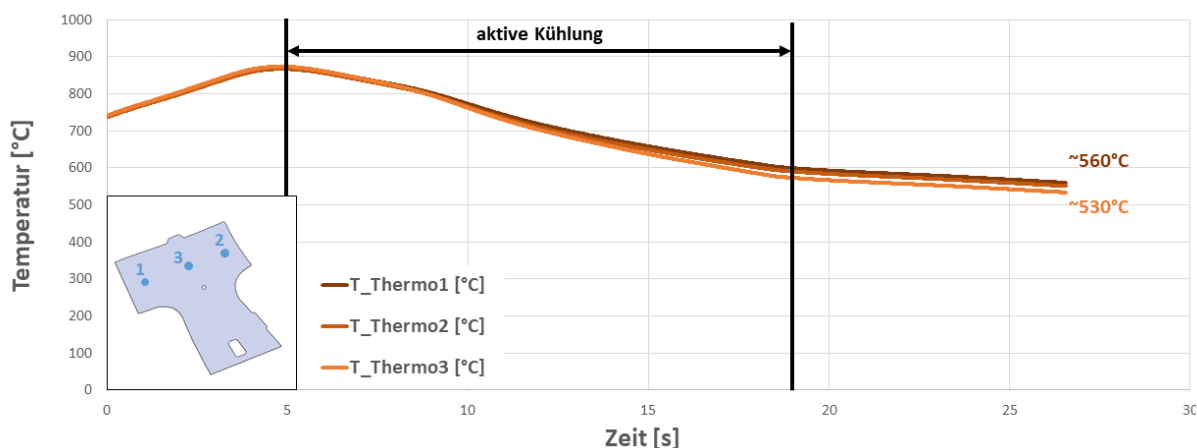


Abbildung 7-7: Homogenität der aktiven Abkühlung von 20MnB8+ZF-Proben

Figure 7-7: Homogeneity of active cooling of 20MnB8+ZF samples

Um die für die Versuche verwendete Abkühlvorrichtung zu validieren, wurde außerdem die Homogenität des aktiven Abkühlvorgangs der Zink beschichteten Platinen untersucht.

Durch die Kombination eines Ventilatorgebläses mit Stahlplatten zur Fokussierung des Luftstroms konnte eine homogene Abkühlung des mittleren Bereichs der Platine, bestehend aus Platinenfuß und der Mitte des Platinenkopfes, realisiert werden. Aus Thermographieaufnahmen ging hervor, dass es im Randbereich des Platinenkopfes zu einer verringerten Abkühlung der Platine kam. Es wurden daher Thermoelementmessungen durchgeführt, um die Auswirkungen der Überhitzung abzuschätzen. Bedingt durch die inhomogene Abkühlung kommt es zu einem Temperaturunterschied von ca. 30 K über die Platinengeometrie. Dies wird als ausreichend gering eingeschätzt, um homogene Materialeigenschaften zu erzielen.

## 7.2.2 Mechanische Eigenschaften Mechanical properties

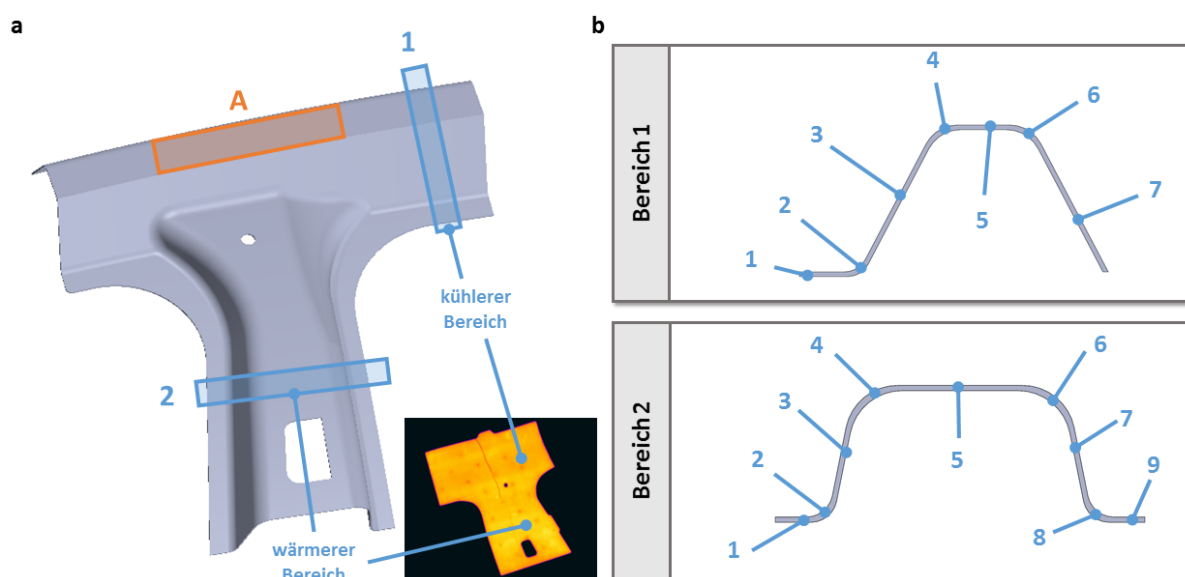


Abbildung 7-8: Prüfkörperentnahme Demonstratorbauteil: (a) Übersicht, (b) Aufteilung Härtemessung

Figure 7-8: Specimen extraction sample component: (a) Overview, (b) partition hardness measurement

Zur Bewertung der mechanischen Eigenschaften wurden Zugversuche und Härtemessungen durchgeführt. Die Zugversuche erfolgten auf einer MTS810 in Anlehnung an DIN EN ISO 6892-1 mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1,125 mm/min und einer Messlänge von 50 mm. Die benötigten Proben wurden, wie in Abbildung 7-8 (a) gezeigt, an Position A aus dem Platinenkopf per Wasserstrahlschneiden herausgetrennt. Die Ermittlung der Härte erfolgte auf einem ATM Carat 930 Härteprüfgerät nach DIN EN ISO 6507. Dazu wurde den Platinen an den in Abbildung



7-8 (a) gezeigten Bereichen 1 und 2 Streifen über den kompletten Querschnitt der Platine entnommen. Dadurch wird gewährleistet, dass sowohl die Eigenschaften des warmen als auch des kalten Bereichs der Platine überprüft werden. Die entnommenen Streifen wurden dann entsprechend Abbildung 7-8 (b) in Teilbereiche unterteilt. Die Härtemessung erfolgte mittels 10 Messpunkten über den Querschnitt jedes Teilbereichs.

Die Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften wurden an allen gefertigten Proben durchgeführt. Die Ergebnisse der Zugversuche und Härtemessung werden im Folgenden vorgestellt.

### 7.2.2.1 Zugversuche Tensile Tests

Wie schon in den Versuchen zur Prozessfensterbestimmung erreichen Proben aus dem Ofenprozess und induktiv erwärmte Proben ähnliche Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen.

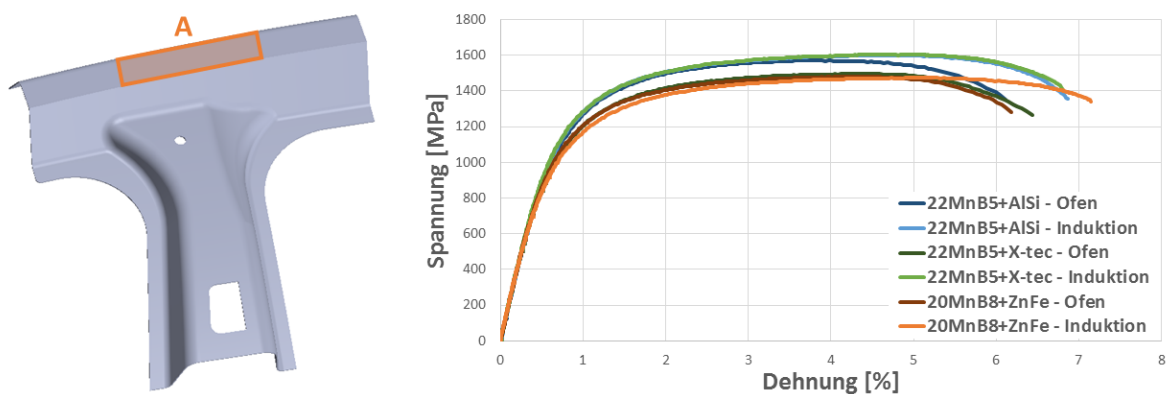


Abbildung 7-9: Zugversuche Demonstrator induktiv und konventionell

Figure 7-9: Tensile strength tests sample component inductive and conventional

Abbildung 7-9 zeigt einzelne Zugversuche je Werkstoff und Beschichtung. Es wird ersichtlich, dass die induktiv erwärmten Proben eine leicht höhere Zugfestigkeit und Bruchdehnung erreichen, als Proben aus dem Ofenprozess. Am größten ist der Unterschied der Zugfestigkeiten bei 22MnB5+nano. Hier erreicht die induktiv erwärmte Probe eine Zugfestigkeit von 1600 MPa bei einer Bruchdehnung von 6,10%. Die Probe aus dem Ofenprozess erreicht hingegen nur eine Zugfestigkeit von 1480 MPa bei einer Zugfestigkeit von 5,52%. Ein ähnlicher Trend ist auch bei 22MnB5+AlSi zu beobachten. Hier ergeben sich Zugfestigkeiten von 1599 MPa und Bruchdehnungen von 6,16% für die Induktion sowie 1570 MPa und 5,40% für den Ofenprozess. Lediglich für 20MnB8+ZF werden mit 1473 MPa für die induktive Probe und 1480 MPa für die konventionelle Probe vergleichbare Werte erreicht. Allerdings zeigt die induktive Probe mit 6,45% zu den 5,52% der Ofenprobe ebenfalls eine höhere Bruchdehnung.

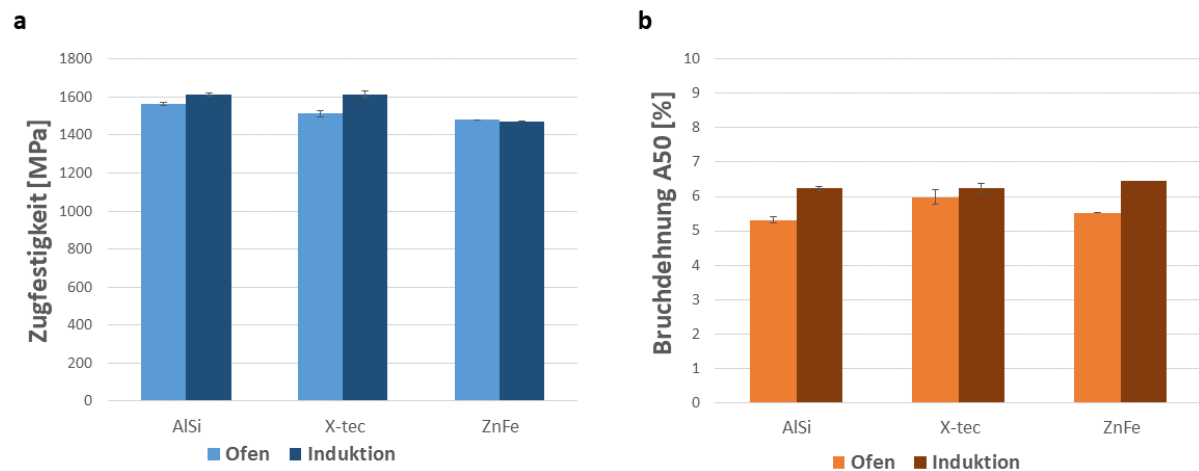


Abbildung 7-10: Mittelwerte Zugfestigkeit und Bruchdehnung Demonstrator induktiv und konventionell

Figure 7-10: Average values tensile strength and elongation at fracture sample component inductive and conventional

Die Ergebnisse der in Abbildung 7-9 vorgestellten Einzelmessungen bestätigen sich auch bei wiederholten Messungen über mehrere Proben. Die mittleren Werte für Zugfestigkeit (a) und Bruchdehnung (b) werden in Abbildung 7-10 gezeigt. Induktive Proben aus 22MnB5 erreichen im Schnitt leicht höhere Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen. Proben aus 20MnB8 erreichen ähnliche Zugfestigkeiten für beide Prozesse, mit leicht geringeren Werten für induktive Proben. Sie weisen allerdings ebenfalls höhere Bruchdehnungen auf.

### 7.2.2.2 Härtemessungen Hardness measurements

Auch die Ergebnisse der Härtemessung decken sich mit den Beobachtungen der Prozessfensterbestimmung. Abbildung 7-11 zeigt die die mittleren Härtewerte in Bereich 1 über alle Proben aus 22MnB5+AlSi. Es ergeben sich vergleichbare Werte für induktive und konventionelle Erwärmung.

Die Werte der induktiven Erwärmung für 22MnB5+AlSi-Proben in Bereich 1 liegen zwischen  $488 \pm 13$  HV5 im Teilbereich 7 und  $503 \pm 9$  HV5 im Teilbereich 4. Konventionelle Proben erreichen ihr Minimum ebenfalls im Teilbereich 7 mit  $475 \pm 8$  HV5 und ihr Maximum mit  $509 \pm 3$  MPa im Teilbereich 1. Im Schnitt liegen die Härtewerte für induktiv gefertigte Proben leicht über denen der Referenzproben.

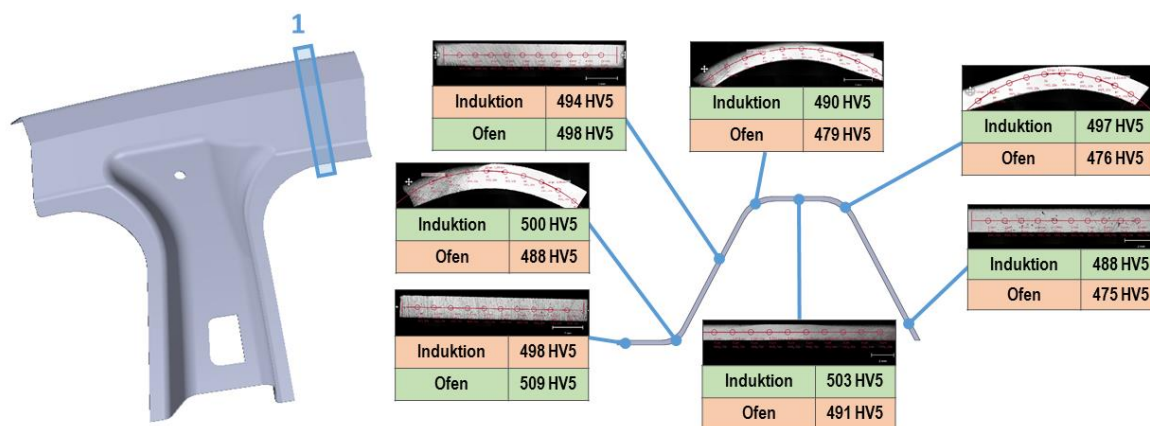


Abbildung 7-11: Ergebnis Härtemessung Demonstrator induktiv und konventionell: 22MnB5+AlSi Bereich 1

Figure 7-11: Results hardness measurement sample component inductive and conventional: 22MnB5+AlSi Area 1

Ähnliche Resultate ergeben sich für die Messung im Bereich 2 für Proben aus 22MnB5+AlSi, welche in Abbildung 7-12 zu sehen sind. Auch hier zeigen die induktiven Proben im Durchschnitt leicht höhere Mittelwerte als Proben aus dem Ofenprozess. Die höchste Härte erreichen sie mit  $498 \pm 9$  HV5 im Teilbereich 2, die niedrigste mit  $478 \pm 5$  HV5 im Teilbereich 1. Die Mittelwerte für Ofenproben liegen zwischen  $471 \pm 4$  HV5 in Teilbereich 4 und  $502 \pm 7$  HV5 in Teilbereich 8.

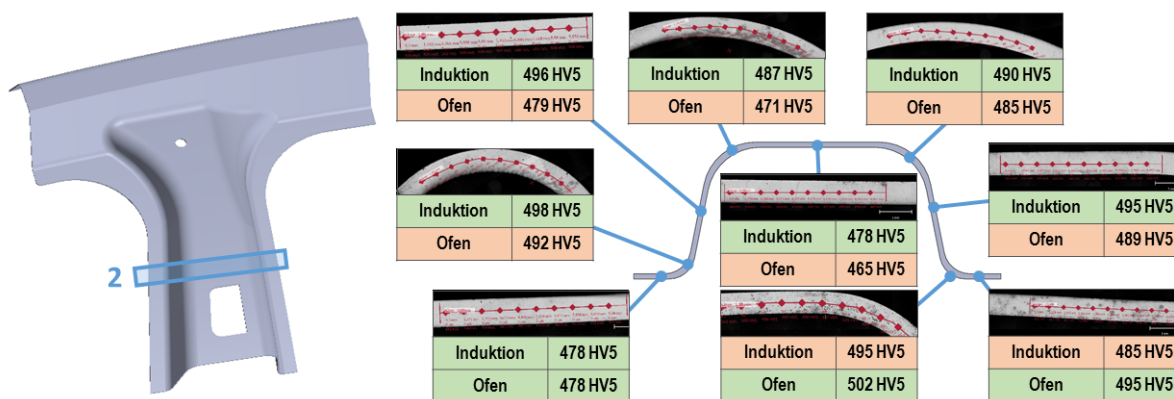


Abbildung 7-12: Ergebnis Härtemessung Demonstrator induktiv und konventionell: 22MnB5+AlSi Bereich 2

Figure 7-12: Results hardness measurement sample component inductive and conventional: 22MnB5+AlSi Area 2

Der bei Proben aus 22MnB5+AlSi beobachtete Trend zeigt sich auch bei den anderen Werkstoff-Beschichtungs-Kombinationen. Tabelle 7-1 zeigt die Härte werte aller Proben über Bereich 1 und Bereich 2 gemittelt pro Beschichtung. Im Schnitt liegen die Ergebnisse der induktiven Proben über der Referenz. Insgesamt sind die Ergebnisse aber vergleichbar.

Tabelle 7-1: Mittlere Härte HV5 induktiv und konventionell pro Bereich und Beschichtung

Table 7-1: Average Hardness HV5 inductive and conventional for each area and coating

Mittlere Härte [HV5]	Aluminium-Silizium		nano-Beschichtung		Zink	
	Induktion	Ofen	Induktion	Ofen	Induktion	Ofen
Bereich 1	496±13	488±15	495±12	475±12	462±9	457±15
Bereich 2	489±19	484±14	488±13	482±15	472±18	460±18

Es lässt sich außerdem keine signifikante Veränderung der Härtewerte in Abhängigkeit der Temperaturverteilung bei der induktiven Erwärmung feststellen. Unabhängig von Bereich und Teilbereich ergeben sich vergleichbare Ergebnisse für beide Fertigungsverfahren. Da die Bereiche zur Härtemessung gezielt ausgewählt wurden, um einen möglichst großen Temperaturbereich abzudecken, ist davon auszugehen, dass über das Bauteil eine mit dem Ofenprozess vergleichbare homogene Härteverteilung vorliegt.

### 7.2.3 Beschichtungsausbildung Coating texture

Die aus Bereich 1 und 2 herausgetrennten Querschnitte wurden neben der Härtemessung auch zur Untersuchung des sich einstellenden Gefüges der Beschichtungen verwendet. Dies diente zum einen der Überprüfung, ob sich durch Temperaturunterschiede bei der induktiven Erwärmung ein unterschiedliches Beschichtungsgefüge ausbildet, und zum anderen der Untersuchung des Umformverhaltens der induktiv erwärmten Beschichtungen, welches während der Prozessfensteruntersuchung nicht berücksichtigt wurde.

Für Bauteile mit Aluminium-Silizium-Beschichtung ließen sich keine Unterschiede in der Beschichtungsstruktur über die Querschnitte der beiden Bereiche feststellen. Insgesamt stellte sich ein Gefüge ein, das mit den in Kapitel 6.2.2.2 für Proben mit den gleichen Heizparametern vergleichbar ist. Ein Vergleich zwischen der Beschichtungsstruktur für Proben aus der Prozessfensterbestimmung und dem Demonstratorbauteil aus Induktions- und Ofenprozess ist in Abbildung 7-13 (a) dargestellt. Wie in den Vorversuchen erreichten die induktiv erwärmten Bauteile im Schnitt eine Gesamtschichtdicke von 25 – 35 µm. Proben aus dem Ofenprozess wiesen eine Schichtdicke von 30 – 40 µm auf.

Abbildung 7-13 (b) zeigt die Ausbildung der Aluminium-Silizium-Beschichtung in Bereichen mit hohen Umformgraden und damit mit hoher Belastung. Sowohl bei induktiver und konventioneller Erwärmung haben sich bedingt durch die spröden intermetallischen Aluminium-Silizium-Phasen Risse gebildet, die bis in die Diffusionsphase, nicht aber bis ins Grundmaterial voranschreiten. Bei konventionell erwärmten Bauteilen scheinen die Risse wesentlich breiter zu sein, während sie bei induktiver Erwärmung feiner aber dafür häufiger auftreten.

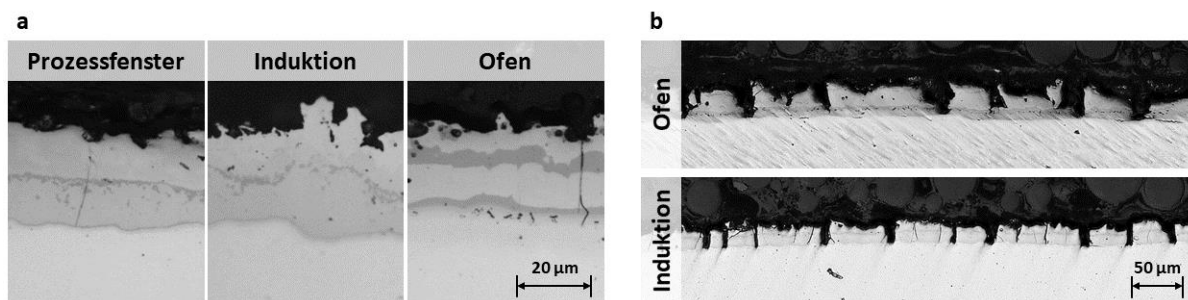


Abbildung 7-13: Ausbildung Beschichtung Demonstrator 22MnB5+AlSi: (a) Vergleich Fertigungsverfahren, (b) Bereiche mit hoher Belastung

Figure 7-13: Coating development sample component 22MnB5+AlSi: (a) Comparison of different production processes, (b) areas of high strain

Auch bei beschichteten Proben lässt sich, wie in Abbildung 7-14 (a) zu sehen, kein signifikanter Unterschied zu den während der Prozessfensterbestimmung gemachten Beobachtungen feststellen. Über den kompletten Bauteilquerschnitt ergeben sich vergleichbare Beschichtungsstrukturen. Die Einflusszone der Beschichtung ist nach der Ofenerwärmung mit bis zu 50 µm sogar noch größer als bei den Vorversuchen. In den in Abbildung 7-14 (b) gezeigten Bereichen hoher Belastung lässt sich keine Veränderung der Beschichtung im Vergleich zu weniger stark belasteten Bereichen feststellen. Weder bei Bauteilen aus dem Ofen- noch aus dem Induktionsprozess konnte eine Verzunderung während der Erwärmung festgestellt werden.

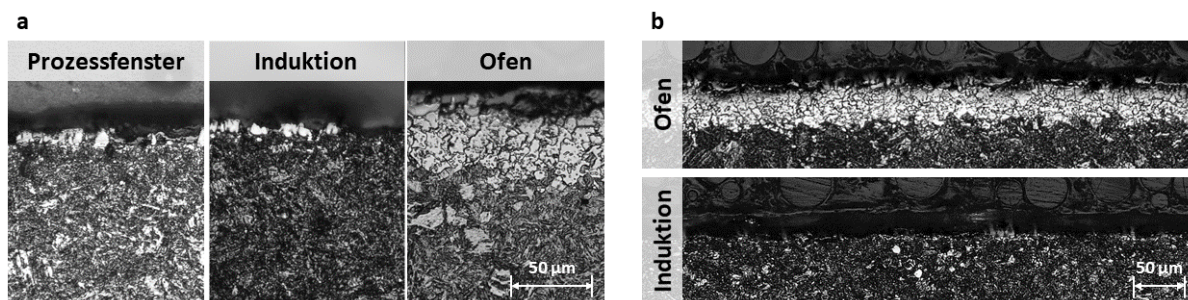


Abbildung 7-14: Ausbildung Beschichtung Demonstrator 22MnB5+nano: (a) Vergleich Fertigungsverfahren, (b) Bereiche mit hoher Belastung

Figure 7-14: Coating development sample component 22MnB5+nano: (a) Comparison of different production processes, (b) areas of high strain

Zink beschichtete Proben zeigten erneut einen dreiphasigen Aufbau bei induktiver Erwärmung und einen zweiphasigen, größtenteils aus  $\alpha$ -Fe(Zn) bestehenden Aufbau bei Erwärmung im Ofen. Ein Vergleich der resultierenden Gefüge ist in Abbildung 7-15 (a) zu sehen. In beiden Prozessen erreichte die Beschichtung eine Schichtdicke von 15 – 20 µm.

Das Auftreten einer dritten zinkreichen Phase ist vor allem während der Umformung relevant. Der durch den hohen Zinkanteil bedingte niedrigere Schmelzpunkt der Beschichtung erhöht die Gefahr der Flüssigversprödung in Bereichen großer

Umformung. Es ist daher für die induktiv gefertigten Bauteile noch wichtiger eine ausreichend niedrige Umformtemperatur zu erreichen als im konventionellen Prozess.

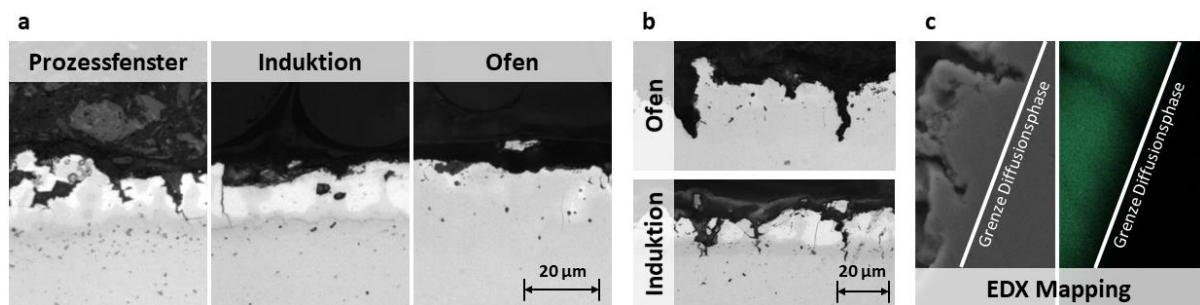


Abbildung 7-15: Ausbildung Beschichtung Demonstrator 20MnB8+ZF: (a) Vergleich Fertigungsverfahren, (b) Bereiche mit hoher Belastung, (c) Überprüfung LMIE (EDX)

Figure 7-15: Coating development sample component 20MnB8+ZF: (a) Comparison of different production processes, (b) areas of high strain. (c) examination of LMIE (EDS)

Abbildung 7-15 (b) zeigt die Zinkbeschichtung in Bereichen hoher Belastung für Bauteile aus dem Ofen- und dem Induktionsprozess. Bei beiden bilden sich Risse, die aber nur bis in die  $\alpha$ -Fe(Zn)-Diffusionsphase vorzudringen scheinen. Zusätzliche EDX-Untersuchungen induktiv erwärmter Teile bestätigen den Verdacht, dass entlang der Risse kein flüssiges Zink bis ins Grundmaterial vorgedrungen ist. Eine Flüssigversprödung kann damit ausgeschlossen werden.

Da alle Beschichtungen eine über den Querschnitt beider untersuchten Bauteilbereiche konstante Ausprägung aufweisen und in ihrer Struktur ähnlich zu den Proben gleicher Heizparameter der Prozessfensterbestimmung sind, kann davon ausgegangen werden, dass sie ebenfalls vergleichbare Eigenschaften in Bezug auf Schweißbarkeit und Korrosionsschutz erreichen. Da außerdem kein verschlechtertes Verhalten induktiv erwärmter Beschichtungen in Bereichen hoher Belastung festgestellt werden konnte, ist anzunehmen, dass die Funktionsfähigkeit der Beschichtungen nach induktiver Erwärmung voll gegeben ist.

#### 7.2.4 Partielle Erwärmung Partial heating

Wie in Kapitel 4.3.6 erläutert, benötigt die gezielte Einstellung gradierter Temperaturprofile während der Erwärmung entweder einen Aufbau aus zwei oder mehr Induktoren oder einen Induktor mit unterschiedlichen Koppelabständen. Obwohl in diesem Forschungsprojekt nur ein Aufbau aus einem einzelnen Umrichter und einem einfachen Induktor verfügbar war, wurden erste Versuche zur Abschätzung des Potentials der partiellen Erwärmung durchgeführt.

Die Platine wurde während der Erwärmung nur teilweise in den Induktor eingelegt. Sowohl während der Erwärmung als auch beim Transport sowie dem Presshärten wurden dieselben Prozessparameter gewählt wie zur Herstellung der vollständig erhitzten Bauteile. Die Untersuchung wurde an Platinen aus 22MnB5+AlSi durchgeführt. Schon bei der optischen Betrachtung wird ersichtlich, dass sich zwei

definierte Temperaturbereiche einstellen. Dies wird auch durch thermographische Aufnahmen, wie beispielhaft in Abbildung 7-16 (a) gezeigt, bestätigt. Es stellt sich ein definierter Bereich mit der Zieltemperatur von 950°C im Fuß der Platine und ein Bereich mit einer Temperatur von unter 300°C im Platinenkopf ein. Dazwischen liegt ein schmaler Übergangsbereich.

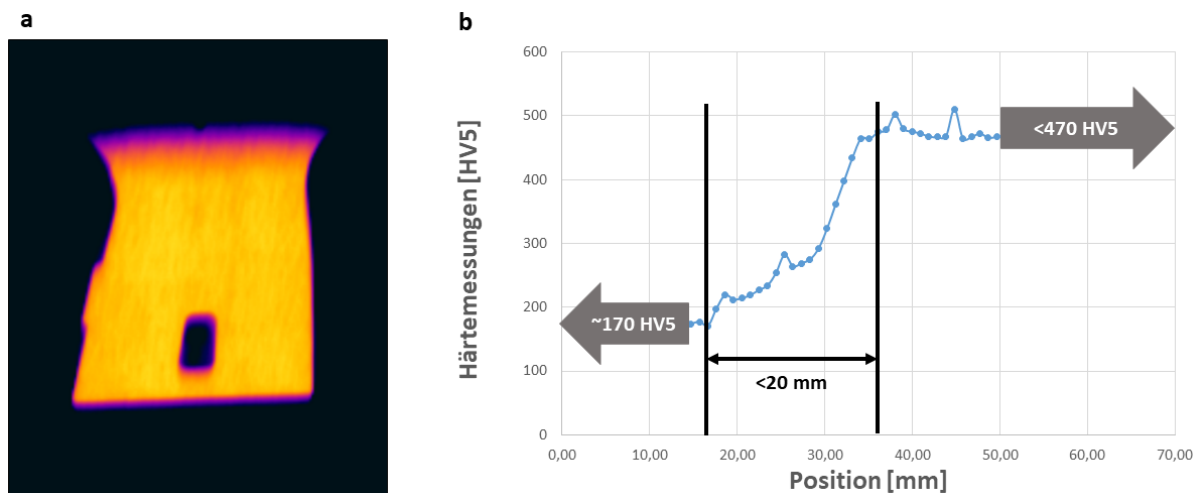


Abbildung 7-16: Partielle induktive Erwärmung: (a) Thermographie Aufnahme, (b) Härteverlauf im Übergangsbereich

Figure 7-16: Partial inductive heating: (a) Thermographic recording, (b) hardness development over transition zone

Um die Breite des Übergangsbereiches abzuschätzen, wurden im Anschluss an mehreren Bauteilen Härtemessungen entlang des Bauteils mit jeweils 1 mm Abstand durchgeführt. Es ergab sich ein Übergangsbereich von weniger als 20 mm für alle Proben. Abbildung 7-16 (b) zeigt den Härteverlauf im Übergangsbereich für eine partiell erwärmte Probe. Im Bereich der Zieltemperatur werden Härtewerte von mehr als 470 HV5 erreicht. Im nicht erwärmten Bereich zeigt das Bauteil eine Härte von ungefähr 170 HV5, was der Härte des Materials im Ausgangszustand entspricht. Der sich einstellende Übergangsbereich liegt bei ca. 19 mm.

Dies zeigt, dass sich die induktive Erwärmung gut zum Einstellen unterschiedlicher globaler Temperaturzonen, wie z.B. im Kopf und im Fuß der Platine, eignet. Eine lokale Temperaturänderung, z.B. in Fügezonen oder Flanschbereichen, ist mit dem aktuellen Aufbau nicht realisierbar.

### 7.3 Zusammenfassung der Demonstratorherstellung Summary of the sample component production

Im Rahmen der Demonstratorherstellung wurden induktiv erwärmte B-Säulen-Köpfe mit verschiedenen Grundmaterialien und Beschichtungen gefertigt, um den Prozess der induktiven Erwärmung unter seriennahen Bedingungen zu validieren. Zu diesem Zweck wurde beim Projektpartner Volkswagen in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern SMS Elotherm, Kirchoff Automotive, DOCERAM und DOTHERM eine Versuchsanlage errichtet. Die gefertigten Bauteile wurden auf mechanische

Eigenschaften und Beschichtungsstruktur untersucht und mit Referenzbauteilen aus dem Ofenprozess verglichen. Außerdem wurde die Homogenität der induktiven Erwärmung des Bauteils sowie kritischer Geometrien, welche sich aus der in Kapitel 3 vorgestellten Klassifizierung des Bauteilspektrums ergaben, untersucht.

Es konnte gezeigt werden, dass bei der induktiven Erwärmung eine ausreichend homogene Temperaturverteilung, welche in Übereinstimmung mit den zuvor durchgeführten Simulationen ist, erreicht werden kann. Auch eine Variation eingebrachter Geometrien in die Platine führte zu keinen negativen Auswirkungen auf die Temperaturverteilung. Die einzige Ausnahme bilden große Aussparungen, wie z. B. Langlöcher, welche in einem Abstand von 10 mm oder weniger zueinander oder zum Rand platziert werden. Die induktive Erwärmung ist außerdem unabhängig von der Bauteilform, solange die Mindestabstände zwischen Bauteil und Induktorwindungen eingehalten werden. Die Zieltemperaturen konnten innerhalb von 16 s bzw. 14 s erreicht werden. Dies ermöglicht eine Erwärmung der Bauteile im Presskontakt. Erste Untersuchungen zur Nutzung der Induktion zur partiellen Erwärmung zeigten, dass partielle Eigenschaften im Bauteil auf globaler Ebene sehr gut per Induktion einstellbar sind.

Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften ergab, dass homogene Eigenschaften über das komplette Bauteil erzielt werden können, unabhängig von leichten Temperaturschwankungen. Induktive Bauteile zeigten im Schnitt vergleichbare oder leicht bessere Eigenschaften als Bauteile aus dem Ofenprozess. Für alle drei betrachteten Beschichtungssysteme konnte ein vergleichbarer Aufbau wie in der Prozessfensterbestimmung beobachtet werden. Auch in Bereichen hoher Umformung ließen sich keine Nachteile bei den Beschichtungen induktiv erwärmter Bauteile feststellen.

Die induktive Erwärmung mittels Längsfeldinduktor kann damit als geeignet für die Erwärmung seriennaher Bauteile im Presshärteprozess bewertet werden.

Mit dem Abschluss der Untersuchungen am Demonstratorbauteil ist auch der Meilenstein 3 des Projektes erreicht.



## **8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Economic efficiency analysis**

Aufgrund geänderter Richtlinien zu kartellrechtlichen Absprachen konnte eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, wie in der Antragsstellung vorgesehen, im Rahmen des Forschungsprojektes nicht durchgeführt werden. Es wurde daher in Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss und den Fördervereinigungen beschlossen auf eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu verzichten. In Kapitel 4.5 wird stattdessen eine energetische Betrachtung des Verfahrens durchgeführt.

## 9 Zusammenfassung Summary

Ziel des Projektes war die Entwicklung eines induktiven Verfahrens zur flexiblen Erwärmung seriennaher Realbauteile für den Presshärteprozess. Im ersten Arbeitsschritt wurden daher die typische Bauteilgeometrien der Platinen pressgehärteter Bauteile vom projektbegleitenden Ausschuss bereitgestellt. Diese wurden von den Forschungsstellen klassifiziert und eingeordnet. Der daraus resultierende Bauteilkatalog diente zum einen als Grundlage für die Wahl des zu fertigenden Demonstratorbauteils und stellte zum anderen die Randbedingungen für die Simulation und Auslegung des Induktionsprozesses. Als repräsentatives Bauteil wurde eine B-Säule für die Fertigung des Demonstratorbauteils gewählt. Aufgrund der geringen Leistung des im Projekt bereitgestellten Umrichters wurde beschlossen die Untersuchungen auf den Kopf der B-Säule zu beschränken.

Während der Entwicklung des Induktionsprozesses wurden zunächst unterschiedliche Induktionskonzepte untersucht und bewertet. Die induktive Einzelteilerwärmung im Längsfeld wurde als vielversprechendstes Konzept für das Projekt ausgewählt. Es wurden im Folgenden diverse Simulationen zum Einfluss der zuvor ermittelten Bauteilgeometrien sowie der Induktorgeometrie durchgeführt, welche ebenfalls anhand experimenteller Untersuchungen validiert wurden. Die Ergebnisse wurden genutzt, um den Induktionsprozess zu optimieren und die Erwärmung des Demonstratorbauteils simulativ zu untersuchen. Es hat sich gezeigt, dass bei seriennahen Realbauteilen mit Temperaturabweichungen von  $\pm 4\%$ , abhängig von der Geometrie, zu rechnen ist. Der Induktor ist allerdings innerhalb dieser Grenzen auch unabhängig von der Bauteilgeometrie, solange ein ausreichend großer Abstand des Bauteils zu den Windungen des Induktors eingehalten wird. Simulative Untersuchungen zur partiellen Erwärmung ergaben, dass sich gezielte Temperaturunterschiede auf globaler Ebene sehr gut durch mehrere Induktoren unterschiedlicher Geometrie oder mit unterschiedlicher Ansteuerung realisieren lassen.

Für experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung des Prozessfensters der induktiven Erwärmung wurde auf Basis der Ergebnisse aus der Simulation ein Versuchsstand im Labormaßstab aufgebaut. Es wurde ein Versuchsprogramm mit unterschiedlichen Temperaturen, Aufheizraten und Haltezeiten aufgestellt und durchgeführt, um den Einfluss der Prozessparameter auf die mechanischen sowie Gefüge- und Beschichtungseigenschaften zu bestimmen. Untersucht wurden die Bor-Mangan-Stähle 22MnB5 mit Beschichtungen aus Aluminium-Silizium (vordiffundiert) und nano-beschichtet sowie 20MnB8 mit einer Zink-Beschichtung. Es ergaben sich für alle gewählten Versuchsparameter ähnliche mit dem konventionellen Prozess vergleichbare mechanische Eigenschaften. Auch bei den Beschichtungen zeigte sich eine ähnliche Ausbildung bei induktiv und im Ofen erwärmten Proben. Leichte Abweichungen im Beschichtungsgefüge resultierten nicht in einer negativen Beeinflussung der Beschichtungseigenschaften. Dies bedeutet zum einen, dass eine induktive Erwärmung mit hohen Aufheizraten und ohne zusätzliche Haltezeiten möglich ist, zum anderen, dass eine potenzielle Temperaturabweichung von  $\pm 4\%$ , wie sie in der

simulativen Prozessauslegung ermittelt wurde, nicht zu inhomogenen Bauteileigenschaften führen muss.

Auf Basis der Simulationsergebnisse und der Untersuchungen der Prozessfensterbestimmung wurde dann bei einem Projektpartner eine Anlage zur Fertigung des festgelegten Demonstratorbauteils aufgebaut. Es wurden Bauteile aus der induktiven Erwärmung sowie dem Ofenprozess umgeformt und gehärtet. Eine Überprüfung der Homogenität während der Erwärmung zeigte, dass über das Bauteil ein Temperaturunterschied von ca. 30 K vorliegt. Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften sowie der Beschichtungsbildung bestätigte die Ergebnisse aus der Prozessfensterbestimmung. Es konnten homogene Bauteil- und Beschichtungseigenschaften mit Hilfe der induktiven Erwärmung erreicht werden. Es konnten außerdem keine signifikanten Unterschiede in den Eigenschaften induktiv und konventionell erwärmter Bauteile festgestellt werden. Eine Erwärmung auf 950°C konnte mittels Induktion innerhalb von 16 s realisiert werden. Untersuchungen zur partiellen Erwärmung bestätigten die Simulationsergebnisse und zeigten, dass eine globale Einstellung der Bauteileigenschaften durch mehrere Induktoren prinzipiell möglich ist.

Der in diesen Untersuchungen eingesetzte Aufbau aus Induktor und Umrichter war aufgrund der Leistung nicht für die Fertigung größerer Bauteile geeignet. Eine Erhöhung der Leistung, z. B. durch den Einsatz eines Systems aus mehreren Umrichtern, ist aber denkbar und ermöglicht einerseits die Erwärmung größerer Bauteile bei gleichbleibenden Aufheizzeiten und andererseits die partielle Erwärmung des Bauteils durch einen Multi-Induktor-Aufbau. Selbst bei einem Aufbau aus mehreren Umrichtern ist der benötigte Platzbedarf der Anlage gering. Der Platzbedarf für eine Anlage, welche die Fertigung einer kompletten B-Säule erlaubt, beträgt ca. 8 m<sup>2</sup>, wenn der Umrichterschrank über bzw. unter der Induktionseinheit positioniert wird.

Aufgrund der guten erreichten Bauteileigenschaften, der kurzen Aufheizzeiten, die eine Erwärmung im Pressentakt ermöglichen, und des geringen Platzbedarfs, stellt die induktive Erwärmung im Längsfeld daher eine realistische Alternative zur konventionellen Erwärmung im Rollenherdofen dar.

## **10 Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen List of publications related to the project**

### Konferenzen und Tagungen

- [Die17a] Dietrich, A.; Nacke, B.; Pfeifer, F.; Marten, T.; Tröster, T.: Investigation of geometrical discontinuities in blanks for hot sheet metal forming process under the influence of induction heating, 5th International Conference on Steels in Cars and Trucks, Noordwijkerhout/Amsterdam, June 2017
- [Die17b] Dietrich, A.; Nacke, B.; Pfeifer, F.; Marten, T.; Tröster, T.: Effects of Holes in Blanks for Press Hardening Process due to Induction Heating, XVIII International UIE-Congress Electrotechnologies for Material Processing, Hannover, pp. 327-332, June 2017
- [Die17c] Dietrich, A.; Nacke, B.: Untersuchung des Einflusses von Unstetigkeiten in Platinen beim induktiven Erwärmen zum Presshärten, Tagungsband, Workshop Elektroprozessechnik, Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Elektrothermische Energiewandlung, Ilmenau, 5.-6. Oktober 2017
- [Die17d] Dietrich, A.; Nacke, B.: Numerical investigation of effects on blanks for press hardening process during longitudinal flux heating, Proceedings of the VIII International Scientific Colloquium Modelling for Material Processing, Riga (Latvia), pp. 179-184, September 2017
- [Die18b] Dietrich, A.; Nacke, B.: Einstufige induktive Längsfelderwärmung von Formplatinen für den Presshärteprozess, Proceedings of the 36th CADFEM Ansys Simulation Conference 2018
- [Nac18a] Nacke, B.; Dietrich, A.: Potentials of induction heating for hot metal forming of car body parts, Proceeding of ASM 4th International Conference on Heat Treatment and Surface Engineering in Automotive Applications, June 5-7, 2018, Spartanburg, USA, pp. 32-41
- [Nac19a] Nacke, B.; Dietrich, A.: Optimal design of induction heating process for hot metal forming of steel blanks, Proceedings of International Conference "Complex system: Control and modeling problems" CSCMP 2019, Samara, Russia, September 03-06, 2019, p. 59-6
- [Nac19b] Nacke, B.; Dietrich, A.: Efficient induction heating for hot metal forming of car body parts, Proceedings of International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources, Padua, Italy, May 22-24, 2019, pp. 427-432
- [Pfe19] Pfeifer, F., Marten, T., Tröster, T., Dietrich, A., Nacke, B.: Investigation on Inductive Heating of Sheet Metal for an Industrial Hot Stamping Process, Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, Luleå, Sweden, June 2-5, 2019, pp. 585-93

Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen

List of publications related to the project

---

#### Zeitung/Journals

- [Die18a] Dietrich, A.; Nacke, B.: Numerical investigation of effects on blanks for press hardening process during longitudinal flux heating, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 355, 2018
- [Nac18b] Nacke, B.; Dietrich, A.: Potentials of single stage induction heating for press hardening of steel blanks, 9th international conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM 2018, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 424, 2018

#### Vorgesehene Veröffentlichungen:

- Dietrich, A.: Induktive Längsfelderwärmung von Formplatinen für den Presshärteprozess. PhD Thesis, Institut für Elektroprozessentechnik, Abgabe voraussichtlich August 2020
- Pfeifer, F., Marten, T., Tröster, T., Dietrich, A., Nacke, B.: Investigation on Hot Sheet Metal Forming by Means of a Longitudinal Flux Inductor, Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference on Steels in Cars and Trucks, Januar 2021

## 11 Ergebnistransfer in die Wirtschaft Transfer to economy

### Maßnahmen während der Projektlaufzeit

#### Maßnahme A: Publikation der Ergebnisse auf Fachkonferenzen und Tagungen

Fachkonferenzen und Tagungen	<b>A1</b> Präsentation des Forschungsthemas auf der „ 5th International Conference on Steels in Cars and Trucks“	Jun. 2017
	<b>A2</b> Präsentation des Forschungsthemas auf dem „XVIII International UIE-Congress Electrotechnologies for Material“ Processing,	Jun. 2017
	<b>A3</b> Präsentation des Forschungsthemas auf dem „VIII International Scientific Colloquium Modelling for Material Processing“	Okt. 2017
	<b>A4</b> Präsentation des Forschungsthemas auf dem Workshop Elektroprozessechnik, Technische Universität Ilmenau	Sep. 2017
	<b>A5</b> Präsentation des Forschungsthemas auf der „36th CADFEM Ansys Simulation Conference“	Jun. 2018
	<b>A6</b> Präsentation des Forschungsthemas auf der “4th International Conference on Heat Treatment and Surface Engineering in Automotive Applications”	Jun. 2018
	<b>A7</b> Präsentation des auf der “International Conference: Complex system: Control and modeling problems”	Mai. 2019
	<b>A8</b> Präsentation des Forschungsthemas auf der “7th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High Performance Steel”	Jun. 2019
	<b>A9</b> Präsentation des Forschungsthemas auf dem “International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources”	Sep. 2019

**Maßnahme B: Veröffentlichung der Ergebnisse durch Fachbeiträge in Fachzeitschriften**

Fachzeitschriften	Nicht während der Projektlaufzeit durchgeführt, aufgrund von Verzögerungen im Projekt	
-------------------	---	--

**Maßnahme C: Schnelle und umfassende globale Informationsverbreitung im Internet**

Online Veröffentlichungen	<b>C1</b> Institutsseiten <b>C2</b> Newsletter der Lehrstühle	durchgeführt
---------------------------	--	--------------

**Maßnahme D: Projektbegleitender Ausschuss PbA**

Die genauen Forschungsdetails sowie die Forschungsergebnisse wurden fortlaufend im PbA ausführlich diskutiert.	<b>D1</b> 1. PbA-Sitzung in Paderborn	18.05.16
	<b>D2</b> 2. PbA-Sitzung in Hannover	01.12.16
	<b>D3</b> 3. PbA-Sitzung in Paderborn	27.06.17
	<b>D4</b> 4. PbA-Sitzung in Paderborn	19.09.18
	<b>D5</b> Abschlussitzung Web-Konferenz	11.03.20

**Maßnahme E: Technology Days**

Workshops an der Universität	<b>E1</b> Seminar für Elektroprozess-technik	Februar 2017
	<b>E2</b> Arbeitskreis Strömungssimulation, Stahlinstitut VDEh	September 2017
	<b>E3</b> Seminar für Elektroprozess-technik	Februar 2018
	<b>E4</b> Seminar für Elektroprozess-technik	Februar 2020

**Maßnahme F: Transfer in die Industrie seitens der FOSTA**

Veröffentlichungen	<b>F1</b> Publikationsreihe (jährlich) <b>F2</b> Newsletter (halbjährlich)	durchgeführt
--------------------	---	--------------

**Maßnahme G: Einbeziehung der Ergebnisse in die akademische Lehre**

<p>Das Institut Leichtbau im Automobil und das Institut für Elektroprozessstechnik bilden Ingenieure in Bachelor- und Masterstudiengängen aus. Die Ergebnisse wurden in den entsprechenden Vorlesungen vorgestellt. Weiterhin wurden mehrere Bachelor- und Masterarbeiten im Verlauf des Projektes erstellt.</p>	<p><b>G1</b> Übernahme in die akademische Lehre (Vorlesungen)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elektrochemische Prozessstechnik</li> <li>- Industrielle Elektrowärme</li> <li>- Karosserietechnologie</li> <li>- Materialauswahl</li> </ul> <p><b>G4</b> Masterarbeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- „Experimentelle Untersuchung der Auswirkung der induktiven Erwärmung auf die Temperaturverteilung in der Nähe von geometrischen Unstetigkeiten bei Formplatinen</li> </ul> <p><b>G5</b> Bachelorarbeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- „Numerische Analyse des Potentials der induktiven Erwärmung zur Einstellung gradierteter Temperaturverläufe bei metallischem Flachgut</li> </ul> <p><b>G6</b> Bachelorarbeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- „Numerische Untersuchung der induktiven Erwärmung von unregelmäßigen Flachgutgeometrien</li> </ul> <p><b>G7</b> Masterarbeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- „Numerische Untersuchung von Effekten bei induktiv erwärmten Formplatinen</li> </ul> <p><b>G8</b> Bachelorarbeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- „Untersuchung des industriellen Ablaufes zur Erwärmung von Formplatinen mittels induktiver Verfahren und Gegenüberstellung der Kosten zu konventionellen Anlagen</li> </ul>	<p>seit WS 16</p> <p>seit WS 14/15</p> <p>SS 14</p> <p>Feb. 17- Jul. 17</p> <p>Feb. 17 – Jul. 17</p> <p>Mai 17 – Okt. 17</p> <p>Jun. 17 – Nov. 17</p>
--	---	---



Ergebnistransfer in die Wirtschaft  
Transfer to economy

---

	<b>G9</b> Bachelorarbeit: - „Konzeptionierung eines Transportsystems für Platinen bei der induktiven Erwärmung von Platinen für den Warmformprozess	Okt. 17 – März 18
--	---	----------------------

Maßnahmen nach der Projektlaufzeit

**Maßnahme G: Publikation der Ergebnisse auf Fachkonferenzen und Tagungen**

Fachkonferenzen und Tagungen	<b>G1</b> 6th International Conference on Steels in Cars and Trucks	Jan. 2021
------------------------------	---	-----------

**Maßnahme H: Veröffentlichung der Ergebnisse durch Fachbeiträge in Fachzeitschriften**

Fachzeitschriften	<b>H1</b> Veröffentlichung in ATZ, HTM oder CIRP geplant	2020
-------------------	--	------

**Maßnahme I: Schnelle und umfassende globale Informationsverbreitung im Internet**

Online Veröffentlichungen	<b>I1</b> Institutsseiten <b>I2</b> Newsletter der Lehrstühle	fortlaufend
---------------------------	--	-------------

**Maßnahme J: Transfer in die Industrie seitens der FOSTA**

Veröffentlichungen	<b>J1</b> Publikationsreihe (jährlich) <b>J2</b> Newsletter (halbjährlich)	fortlaufend
--------------------	---	-------------

**Maßnahme K: Dissertationen durch die wissenschaftlichen Mitarbeiter der Forschungsstellen**

Dissertationen	<b>K1</b> Dissertation zum Thema induktive Längsfelderwärmung	2020
----------------	---	------

Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Estimation of the feasibility of the suggested transfer concept

---

## **12 Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts**

### **Estimation of the feasibility of the suggested transfer concept**

Aufgrund der oben genannten vielfältigen Transfermaßnahmen in die Wirtschaft werden die Anforderungen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und insbesondere zu kleinen und mittleren Unternehmen erfüllt.

### **13 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten Presentation of the scientific-technological and economical benefits of the results achieved especially for SME, innovative contribution, and possibilities for application in industry**

Durch den erfolgreichen Abschluss des Projekts konnten Unsicherheiten in Bezug auf den induktiven Erwärmungsprozess ausgeräumt werden. Die Unsicherheiten lagen insbesondere in der Temperaturhomogenität, der Ausbildung der Beschichtung sowie der Austenitisierung des Werkstoffs. Sowohl durch numerische Berechnung als auch experimentelle Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass es im Bereich von geometrischen Unstetigkeiten zu keinen mechanischen Einschränkungen kommt. Auch führten die schnellen Aufheizzeiten weder bei der Austenitisierung des Grundwerkstoffes noch bei der Beschichtungsausbildung zu negativen Auswirkungen. Auf Basis der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse wurden Konstruktionsrichtlinien für die induktive Erwärmungseinheit abgeleitet, wodurch den Unternehmen ermöglicht wird entsprechende Systeme zu konstruieren und zu verwenden. Dadurch profitieren vor allem Unternehmen aus der Thermoprozesstechnikbranche, der Keramikindustrie sowie Automobilhersteller und Zulieferer der Automobilbranche.

Bei Unternehmen der Thermoprozesstechnikbranche handelt es sich häufig um klein- und mittelständische Unternehmen (KMU), die selten eine umfangreiche Forschungsabteilung besitzen. Dieses Projekt konnte eine wissenschaftliche Grundlage für die Auslegung der induktiven Erwärmung für den Presshärteprozess schaffen und so eine deutlich größere Sicherheit bei der weiteren Entwicklung der Technologie für den produktiven Einsatz herstellen. Durch den möglichen Einsatz der induktiven Erwärmung im Presshärteprozess ergeben sich zudem neue Geschäftsfelder für die Herstellung von Induktoren und Umrichtern.

Auch Unternehmen aus der Keramikindustrie sind häufig im Bereich der KMU angesiedelt. Sie sind oftmals als Zulieferer bei induktiven Erwärmungssystem beteiligt, haben aber keinen direkten Kontakt mit dem Erwärmungssystem. In diesem Projekt wurden temperaturbeständige Werkstoffe zur Lagerung und zum Transport von Platinen eingesetzt. Diese wurde unter realen Bedingungen getestet und die Erfahrungen direkt mit den Unternehmen besprochen. Aus den Diskussionen resultierten wertvolle Ergebnisse für den Aufbau keramischer Transport- und Lagerungssysteme für den Induktionsprozess. Da außerdem bei der induktiven Erwärmung temperaturbeständige, elektrisch nichtleitende Materialien zwingend erforderlich sind, profitieren auch diese Unternehmen von einer potentiellen Erweiterung des Geschäftsfeldes.

Durch die in diesem Projekt nachgewiesene Eignung der induktiven Erwärmung als Substitution für den Rollenherdofen profitieren vor allem Hersteller von

Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrages und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Presentation of the scientific-technological and economical benefits

---

pressgehärteten Bauteilen, worunter hauptsächlich Automobilhersteller und Zulieferer der Automobilbranche fallen. Diesen Unternehmen wird durch das entwickelte Verfahren eine alternative platzsparende Prozessroute zur Herstellung von Bauteilen geboten. Die hohe Flexibilität der induktiven Erwärmung ermöglicht außerdem die problemlose Produktion von selbst kleinsten Chargen im einstelligen Bereich. Ein Anfahren und Aufheizen der Anlage, wie im bestehenden Rollenherdofenprozess, ist nicht notwendig. Somit kann dieses Verfahren auch interessant für KMU sein, die häufig unterschiedliche Bauteile in kleinen Stückzahlen herstellen. Des Weiteren konnten der Platzbedarf sowie der Bedarf an Materialien und Anlagentechnik für den Aufbau einer Induktionsanlage ermittelt werden. Dies erleichtert die Planung zukünftiger Anlagen und die Integration in einen bestehenden Prozess sowohl für die Hersteller als auch für die Anwender.

Bei dem entwickelten Verfahren wird für die Erwärmung ausschließlich elektrische Energie eingesetzt. Dadurch ergibt sich bei Nutzung von regenerativen Energiequellen die Möglichkeit einer CO<sub>2</sub> freien Erwärmung von Bauteilen. Daraus kann sich im Hinblick auf steigende Abgaben auf CO<sub>2</sub> verursachende Verfahren auch ein ökonomischer Vorteil entwickeln.

## 14 Literaturverzeichnis Bibliography

- [And16] Andreiev, A. et al.: Evolution of Microstructure and Properties of Steel 22MnB5 due to Short Austenitization with Subsequent Quenching. In: Steel Res. Int. 87 (2016), Seite 1733-1741
- [Arc16] N.N.: Steels for hot stamping – Usibor and Ductibor, Werkstoffdatenblatt, ArcelorMittal S.A., Luxemburg, 2016
- [Bar12] Bargel, H.J.; Schulze, G.: Werkstoffkunde, 11. Auflage, Berlin: Springer Verlag, 2012
- [Beh12] Behrens, B.-A. et al.: Neue Entwicklungen beim Formhärten. In: Tagungsband zum 7. Erlanger Workshop Warmblechumformung, Bamberg: Meisenbach-Bamberg-Verlag, 2012
- [Beh14] Behrens, B.-A.; Hübner, S.: Konduktive Erwärmung von Formplatinen für das Presshärten –EFB-Forschungsbericht Nr. 400. Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Hannover, 2014
- [Ben90] Benkowsky, G.: Induktionserwärmung. Härten, Glühen, Schmelzen, Löten, Schweißen; Grundlagen und praktische Anleitungen für Induktionserwärmungsverfahren, insbesondere auf dem Gebiet der Hochfrequenzerwärmung. 5., stark bearb. Aufl. Berlin: Verl. Technik, 1990
- [Ber08] Berglund, G.: The history of hardening of boron steels in northern Sweden, 1st Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, October 22-24, 2008, Kassel, Germany, Seite 175 - 177
- [DIN4885] Norm DIN EN ISO 4885, Eisenwerkstoffe – Wärmebehandlung – Begriffe, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2018
- [DIN8580] Norm DIN EN ISO 8580, Fertigungsverfahren –Begriffe, Einteilungen, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2020
- [DIN8584-3] Norm DIN 8584-3, Fertigungsverfahren Zugdruckumformen Teil 3: Tiefziehen, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003
- [Dot14] N.N.: Technische Informationen – DOTHERM700, Werkstoffdatenblatt, DOTHERM GmbH & Co. KG, Dortmund, 2014
- [Dril08] Drillet P. et al.: Patent WO08053273
- [Elo18] SMS Elotherm GmbH
- [Fad08] Faderl, J. et al.: Press hardening of hot dip galvanized 22MnB5: A stable and reproducible process, In: Proceedings 1<sup>st</sup> International Conference on Hot sheet metal forming of high-performance steel, Kassel, 2008, Seite 199-205
- [Fad09] Faderl, J. et al.: phs-ultraform – Continuous galvanizing meets press hardening, In: Proceedings 2<sup>nd</sup> International Conference on Hot sheet metal forming of high-performance steel, Luleå, 2009, Seite 283-292

- [Fan10] Fan, D.W. et al: Coating Degradation in Hot Press Forming. In: ISIJ International, Vol. 50 (2010), No. 4, Seite 561–568
- [Fan12] Fan, D. W.; De Cooman, B.: State of the Knowledge on Coating Systems for Hot Stamped Parts, In: Steel Res. Int. 83 (2012), Seite 412-433
- [Fas91] Fasholz, Jörg; Orth, Gerhard; RWE Verfahrensinformation: Induktive Erwärmung - Physikalische Grundlagen und technische Anwendung; 4. Aufl. Essen: RWE Energie A; 1991
- [Feu12] Feuser, P. S.: Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge, Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung, Bamberg: Meisenbach Verlag, 2012
- [Feu13] Feuser, P.; Bold, J.: Presshärten bei Daimler – noch immer ein heißes Thema. 8. Erlanger Workshop Warmblechumformung, Erlangen, 12. November 2013.
- [Gei12] Geiger, M. et al: Basic Investigations on the Hot Stamping Steel 22MnB5. In: Advanced Materials Research (2005), Vol. 6-8, Seite. 795-804
- [Goe08] S. Goedicke et al.: Wet chemical coating materials for hot sheet metal forming - anti scaling and corrosion protection. In: Proceedings 1<sup>st</sup> International Conference on Hot sheet metal forming of high performance steel, Kassel, 2008, Seite 37-44
- [Goe09] S. Goedicke et al.: Development of an anti-scaling coating with active corrosion protection for hot sheet metal forming. In: Proceedings 2<sup>nd</sup> International Conference on Hot sheet metal forming high-performance steel, Luleå, 2009, Seite 265-271
- [Gri11] Grigorieva R. et al. In: Proceedings 8<sup>th</sup> International conference on zinc and zinc alloy coated steel sheet, Genova, Italy, 2011, Seite 353-362
- [Guk17] Guk, A. et al.: Influence of inductive heating on microstructure and material properties in roll forming processes. In: AIP Conference Proceedings 1896:1, 2017
- [Hen13] Hensen, G. et al.: Developing Zinc Coated Boron Steel: Balancing Microcrack Performance and Corrosion Protection, In: Proceedings 4<sup>th</sup> International Conference on Hot sheet metal forming of high-performance steel, Luleå, 2013, Seite 463-470
- [Im09] Im, H. J. et al In: Proceedings Current Advances of Materials and Processes ISIJ Vol. 22 (2009), Seite 595
- [Jen10] Jenner, F. et al.: Evolution of Phases, Microstructure, and Surface Roughness during Heat Treatment of Aluminized Low Carbon Steel. In: Metall and Mat Trans A 41 (2010), Seite 1554–1563
- [Kar10] Karbasian, H., Tekkaya, A.E.: A review on hot stamping. In: Journal of Materials Processing Technology 210 (2010) No. 15, Seite 2103-2018.

- [Kat12] Karlsruher Institut für Technologie; Flexible Wärmebehandlung zur gezielten Gestaltung von Bauteileigenschaften und zur Erhöhung der Energieeffizienz der Prozesskette Warmumformen (FlexWB); 2012
- [Kir16] Kirchhoff Automotive GmbH
- [Kol09] Kolleck R. et al.: Investigation on Induction Heating for Hot Stamping of Boron Alloyed Steels. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology 58 (2009) No. 1, Seite 275–278.
- [Kol11] Kolleck, R., Veit, R.: Current and Future Trends in the field of Hot Stamping of Car Body Parts, 3rd International Conference on Steels in Cars and Trucks, June 5-9, 2011, Salzburg, Austria.
- [Kon11] Kondratiuk, J. et al.: Zinc Coatings for Hot Sheet Metal Forming: Comparison of Phase Evolution and Microstructure during Heat Treatment. In: Surface & Coatings Technology 205 (2011), Seite 4141–4153.
- [Kur15] Kurz, T. et al.: Zinc Coated Press-Hardening Steel – Challenges and Solutions, 5th Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, May 31-June 3, 2015, Toronto, Canada, Seite 345-353.
- [Läp14] Läßle, V.: Wärmebehandlung des Stahls, 11. Auflage, Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2014
- [Lee12] Lee, C.W. et al.: Liquid-Metal-Induced Embrittlement of Zn-Coated Hot Stamping Steel. In: Metall and Mat Trans A 43 (2012), Seite 5122–5127
- [Len08] F.-J. Lenze, S. Sikora, J. Banik, D. Sauer: Development tendencies as to processing of press hardening under application of coated steel, In: Proceedings 1<sup>st</sup> International Conference on Hot sheet metal forming of high-performance steel, Kassel, 2008, Seite 15-21
- [Mak11] Maki, J. et al.: Effect of Heating Condition and Hot Forming on Corrosion Resistance of Hot Stamped Aluminized Steels. In: Proceedings 3<sup>rd</sup> International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 2011, Seite 499-507
- [Mar00] Marder, A.R.: The metallurgy of zinc-coated steel. In: Progress in Materials Science 45 (2000), Seite 191-271
- [Mor17] Mori, K. et al.: Hot stamping of ultra-high strength steel parts. In: CIRP Annals 66 (2017) Issue 2, Seite 755-777
- [Nac14] Nacke, B.; Baake, E.: Induktives Erwärmen, Vulkan Verlag, 2014
- [Nad07] Naderi, M.: Hot Stamping of Ultra High Strength Steels, unv. Diss., Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2007
- [Nan16] N.N.: Produktinformation AISi Coat 4001, Datenblatt, NANO-X GmbH, Saarbrücken, 2016
- [Nau00] Nauvertat, G.: Optimiertes Design industrieller induktiver Quersfeld-Bänderwärmungsanlagen. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2000, Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 19, Wärmetechnik/Kältetechnik, 129).



- [Nie18] Niewel, Jörg: Untersuchungen zur induktiven Erwärmung im Warmformprozess: Schriftenreihe Institut für Leichtbau mit Hybridsystemen, 2018
- [Neu09] Neugebauer, R.; Schieck, F.: Hydro Forming at Elevated Temperatures. Conference paper, 4th International Conference on Tube Hydroforming, Kaohsiung, Taiwan, September 6-9, 2009
- [Opi15] Opitz, T.; Vibrans, T.: Induktive Schnellerwärmung von Formplatinen für die Warmumformung im Karosseriebau. In: HTM Journal of Heat Treatment and Materials 70 (2015), No. 6, Seite 261-266.
- [Ost08] Osten, J.: Werkstoffstrukturen und Eigenschaften beim lasergestützten Clinchen von hochfesten Stahl/Aluminium-Mischverbindungen, Aachen: Shaker-Verlag, 2018
- [Pal17] Palm, C. et al.: Increasing performance of hot stamping systems, International Conference on the Technology of Plasticity, September 17-22, 2017, Cambridge, United Kingdom.
- [Pel16] Pelcastre, L. et al.: Influence of microstructural evolution of Al-Si coated UHSS on tribological behaviour against tool steel at elevated temperatures. In: Journal of Materials Processing Technology 228 (2016), Seite 117–124
- [Rad16] Radlmayr, K.M. et al.: Warmumformung verzinkter Stähle. In: Lightweight Design, 9 (2016), Seite 16–25
- [Rud17] Rudnev, V. et al.: Handbook of Induction Heating, Second Edition. Boca Roca : CRC Press, 2017 (Manufacturing Engineering and Materials Processing)
- [Sal19] N.N.: Borlegierte Vergütungsstähle – 22MnB5, Werkstoffdatenblatt, Salzgitter Flachstahl GmbH, Salzgitter, 2019
- [Sch11] Schülbe, H.; Jestremski, M.; Nacke, B.; Numerische Untersuchung induktiver Erwärmungsprozesse für das Presshärten; elektrowärme international; 3-2011, S. 283-288
- [Sch13] Schwinghammer, H. et al.: Zinc Coated Press Hardening Steel for the Direct Process. In: Proceedings 4<sup>th</sup> International Conference on Hot sheet metal forming of high-performance steel, Luleå, 2013, Seite. 527-536
- [Sjö18] Sjölin, U. et al.: The All New V60 2018 Car Body, EuroCarBody, October 16-18, 2018, Bad Nauheim, Germany
- [Som01] Somani, M.C. et al.: Dimensional changes and microstructural evolution in a B-bearing steel in the simulated forming and quenching process. In: ISIJ International 4 (2001), Seite 361–367
- [Ste07] K. Steinhoff: Anwendungszentrum Metallformgebung - Forschungs- und Entwicklungskompetenz von der Idee bis zur Serienreife. In: Hessen-Nanotech NEWS, Ausgabe 1 (2007)
- [Stö09] Stöhr T et al.: Investigations on Different Strategies for Influencing the Microstructural Properties with Respect to Partial Hot Stamping. In:

- Proceedings of 2nd International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel (2009), Luleå, Seite 273–281.
- [Sue03] Suehiro, M. et al.: Properties of Aluminum-coated Steels for Hot-forming. In: Nippon Steel Technical Report No. 88 (2003), Seite 16-21
- [Sun14] Sun, C.; Zhang, H.: Microstructural Evolution and Quenching Properties of 22MnB5 Steel for Hot Stamping during Resistance Heating. In: Advanced Materials Research (2014), Vol. 849, Seite 75-80
- [Tak04] Takagi K. et al.: Patent EP1380666,2004
- [Tak13] Takabashi, M. et al.: Liquid Metal Embrittlement Behavior and Bendability of Hot V-Bent Galvannealed Boron Steel, In: Proceedings 4<sup>th</sup> International Conference on Hot sheet metal forming of high-performance steel, Luleå, 2013, Seite 453-470
- [Thy19] N.N.: MBW – Produktinformation Mangan-Bor-Stähle für die Warmumformung, Werkstoffdatenblatt, Thyssenkrupp AG, Essen, 2019
- [Tod15] Todzy, T.: Prozessfenster beim Presshärten bei schneller Erwärmung von Stahlplatinen mit Aluminium-Silizium-Beschichtung, Aachen: Shaker Verlag, 2016.
- [Trö04] Tröster, T.; Rostek, W.: Innovative Warmumformung, In: Tagungsband zur Veranstaltung Internationale Konferenz Neuere Entwicklungen in der Blechumformung, Mai 11-12, 2004, Stuttgart, Germany
- [Trö12] Tröster, Thomas; Wirbelbetterwärmung von Platinen für das Presshärten; Düsseldorf: Verl. und Vertriebsges. mbH (Forschung für die Praxis / Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. im Stahl-Zentrum, 850), 2012
- [Trö14] Tröster, Thomas; Niewel, Jörg; Salomon, Rainer: Forschung für die Praxis / Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. im Stahl-Zentrum. Bd. 805: Einsatz des induktiven Erwärmens von Platinen und Ermittlung der entsprechenden Prozessfenster für das Presshärten; Düsseldorf: Verl. und Vertriebsges. mbH, 2014.
- [Trö19] Tröster, Thomas; Niewel, Jörg; Salomon, Rainer: Forschung für die Praxis / Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. im Stahl-Zentrum. Bd. 920: Einsatz neuartiger Stähle und Generierung gradierter Leichtbaustrukturen im Presshärteprozess, Düsseldorf: Verl. und Vertriebsges. mbH, 2019
- [Vei11-1] Veit, R. et al.: Phase Formation of Al/Si-Coatings during Induction Heating of Boron Alloyed Steel Sheets. In: Tools and Technologies for Processing Ultra High Strength Materials, 2011, Seite 225-233
- [Vei11-2] Veit, R. et al.: Development of a Close-to-production Prototype of an Induction Heating Device for Hot Stamping of Boron Alloyed Steels, 3rd International Conference on Steels in Cars and Trucks, June 5-9, 2011, Salzburg, Austria.
- [Ver01] Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Taschenbuch der Stahl-Eisen-Werkstoffblätter, 10. Auflage, Stahleisen Düsseldorf, 2001

- [Voe18] N.N.: Feuerverzinktes Stahlband - phs-ultraform, Werkstoffdatenblatt, voestalpine Stahl GmbH, Linz, 2018
- [Voe18-2] N.N.: Feuerverzinktes Stahlband - phs-directform 1500, Werkstoffdatenblatt, voestalpine Stahl GmbH, Linz, 2018
- [Vib16-1] Vibrans, Tobias ; Malek , Roland ; Kotzian , Mathias ; Vogt , Christian ; Langejürge ,Markus: Entwicklung einer Anlage zur induktiven Erwärmung von Formplatinen. In: Elektrowärme International 74 (2016), Nr. 1
- [Vib16-2] T. Vibrans, Induktive Erwärmung von Formplatinen für die Warmumformung, PhD thesis, Technische Universität Chemnitz, 2016
- [Zok12] Zok, E. et al.: Energieeffiziente Leistungsversorgung induktiver Härte- und Erwärmungsprozesse. In: Elektrowärme International (03-2012), Nr. 70, S. 69-75

## **15 Danksagung Acknowledgement**

Die Forschungsstellen bedanken sich bei allen Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses, welche das Projekt stets durch konstruktive Diskussionen, zur Verfügung gestelltes Fachwissen, Hilfe bei der Durchführung von Versuchen und die Bereitstellung von Materialien und Anlagen unterstützt haben.