



## Abschlussbericht

# Projekt „Entwicklung eines Moduls zur partiellen Erwärmung von beschichteten Blechen in einem Hängebrennofen“

Aktenzeichen: 32978/01-21/0

Projektnummer: 16 5632

Antragsteller: N.Bättenhausen industrielle Wärme- und Elektrotechnik GmbH

Förderer: Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Laufzeit: 24 Monate

Berichtszeitraum: 6 / 2016 – 4 / 2019

Datum: 29.07.2019

Author: C. Bättenhausen

## Inhalt

1	Zusammenfassung .....	6
1	Summary .....	6
2	Einleitung.....	7
2.1	Beschreibung der Ausgangssituation .....	7
2.2	Beschreibung des aktuellen Stands der Technik.....	8
2.2.1	Tailored Tempering.....	10
2.2.2	Tailored welded blanks .....	11
2.3	Aktueller Stand der Technik bei der partiellen Erwärmung.....	12
2.3.1	Öfen mit mehreren unterschiedlichen Temperaturzonen .....	12
2.3.2	Kontaktwärmebehandlung .....	13
2.3.3	Laserhärten.....	14
2.3.4	Nacherwärmung.....	15
2.3.5	Abdeckungen .....	16
2.3.6	Zusammenfassung .....	16
2.4	Beschreibung des Lösungsweges .....	17
2.5	Beschreibung der Vorarbeiten .....	19
2.6	Ziele des Projektes .....	19
2.7	Umweltrelevanz des Projektes .....	19
3	Machbarkeitsanalyse,Konzeptentwicklung, Anforderungsdefinitionen .....	21
3.1	Partielles Kühlen.....	21
3.2	Partielles Heizen durch Strahler .....	23
3.3	Partielles Heizen durch Kontaktierung.....	24
3.4	Entwurf einer Heizplatte:.....	25
3.5	Simulation des Erwärmungsvorganges .....	29
4	Anpassung der bestehenden Anlage an die neue Fahrweise der Platinen durch das Erwärmungsmodul.....	39
4.1	Nachrüstung des Ofenaustrags durch einen Regler gesteuerten Frequenzumrichter.....	39
4.2	Anpassung der Ofensteuerung.....	40
4.3	Nachrüstung von Lichtschranken zur Laufzeiterfassung und Schrittkettenprüfung.....	42
5	Bau einer vollständigen Prototypenanlage .....	43
5.1	Konstruktion des Gehäuses in CAD, Zustellung Feuerfest.....	43
5.2	Auswahl der Beheizungselemente .....	46

5.3	Aufbau des Schaltschranks zur Ansteuerung der Module .....	47
5.4	Aufbau und Labortests der Heizmodule .....	48
6	Durchführung von Taupunktmessungen an der Ofenanlage .....	49
6.1	Versuchsaufbau.....	49
6.2	Versuchsergebnisse mit getrockneter Luft .....	50
6.3	Versuchsergebnisse mit Stickstoff.....	51
6.4	Instrumentierung zur Auswertung der Versuche .....	52
7	Anschluss und Inbetriebnahme des Heizmoduls.....	53
7.1	Prüfung der Anlage.....	53
7.2	Versuche zu Auf- und Abheizgradienten .....	53
7.3	Installation und Parametrierung der Messinstrumentierung .....	55
8	Versuche .....	57
8.1	Auswahl der Materialien .....	57
8.2	Aufheizversuche im Ofenraum .....	58
8.3	Aufheizversuche mittels partieller Erwärmung durch Strahlung .....	59
8.4	Abkühlung an Luft.....	60
8.5	Schleppmessungen zur Ermittlung der Kerntemperaturen .....	62
9	Diskussion und Ausblick.....	68

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Exemplarische Prozesskette beim Presshärten [Schwartz].....	8
Abbildung 2 - Typischer Temperaturverlauf beim Presshärten [Thyssen Krupp, EP 2324938].....	8
Abbildung 3 - Rollenherdofen der Firma Ruhstrat GmbH [Ruhstrat].....	9
Abbildung 4 - Wärmebild einer B-Säule beim Tailored Tempering Prozess (Quelle: ThyssenKrupp) .....	11
Abbildung 5 - Beispielhaftes ZTU-Diagramm, das zeigt, dass bei langsamerer Abkühlung vermehrt Bainit statt Martensit entsteht. Wird das Bauteil nicht bis Raumtemperatur abgeschreckt, ist eine vollständige Bainitstruktur erreichbar [Universität Wuppertal] .....	12
Abbildung 6 - Prinzip der Kontaktwärmebehandlung.....	13
Abbildung 7 - Funktionsprinzip des Laserhärtens [Quelle: Trumpf] .....	15
Abbildung 8 - Prinzipskizze des Hängebahnofens mit Modul zur partiellen Erwärmung [Bättenhausen] .....	18
Abbildung 9 - Aufbau des Heizmoduls (eine Seite) .....	26
Abbildung 10 - Elektroplan der Ansteuerung der Heizmodule .....	26
Abbildung 11 - Datenblatt der ausgewählten Heizstäbe [Berghütten].....	27
Abbildung 12 - Leistungsangaben der Heizelemente [Berghütten].....	28
Abbildung 13 - Darstellung der stattfindenden Erwärmungsprozesse .....	30
Abbildung 14 - Temperaturverlauf der Platinen an ruhender Luft .....	31
Abbildung 15 - Betrachteter Simulationsbereich der Platine.....	31
Abbildung 16 - Konfiguration der Fahrweise des Frequenzumrichters .....	39
Abbildung 17 - Fahrweise der Platinen nach Ofenaustrag.....	40
Abbildung 18 - Visualisierung zur Bedienung der manuellen Fahrweise .....	41
Abbildung 19 - Nachrüstung der Ofenaustragsstrecke mit Lichtschranken .....	42
Abbildung 20 - Außengehäuse des Erwärmungsmoduls.....	43
Abbildung 21 - Modul mit Feuerfestzustellung in mehreren Schichten .....	43
Abbildung 22 - Wärmedurchgangsberechnung der Erwärmungsmodule .....	44
Abbildung 23 - Feuerfest Zustellungsplan der Module .....	45
Abbildung 24 - Schematische Aufstellung der Module in der Ofenaustragsstrecke..	45
Abbildung 25 - Gewähltes Heizelement RR 1300 x 508 x 38 [Berghütten].....	46
Abbildung 26 - Heizelement mit Anschlusszubehör.....	46
Abbildung 27 - Schaltplan zur Ansteuerung der Beheizung.....	47
Abbildung 28 - Fertiggestellte Schaltanlage zum Betrieb der Heizmodule .....	48
Abbildung 29 - Komplettaufbau eines Heizmoduls .....	48
Abbildung 30 - Versuchsaufbau zur Taupunktregulierung der Ofenanlage .....	49
Abbildung 31 - Messaufbau Taupunktmessung.....	50
Abbildung 32 - Versuchsergebnisse mit getrockneter Luft .....	51
Abbildung 33 - Versuchsergebnisse mit Stickstoff.....	51
Abbildung 34 - Heizmodul bei Zieltemperatur von 1300 °C .....	53
Abbildung 35 - Aufheizversuch bei Modulabstand 50 mm.....	54
Abbildung 36 - Aufheizversuch bei Modulabstand 150 mm.....	54

Abbildung 37 - Auswertesoftware der Wärmebildkamera .....	55
Abbildung 38 - Versuchsaufbau .....	56
Abbildung 39 - ZTU-Diagramm für 22MnB5 [Vibrans] .....	57
Abbildung 40 - Temperaturverlauf zur Erzeugung einer Martensitstruktur [ArcelorMittal] .....	58
Abbildung 41 - Temperaturverlauf Aufheizen unterschiedlicher Blechdicken .....	59
Abbildung 42 - Temperaturverlauf Aufheizen unterschiedlicher Blechdicken .....	60
Abbildung 43 - Verlauf der Abkühlkurve der Bereiche 1 – 11 .....	60
Abbildung 44 - Temperaturprofil direkt nach Verlassen des Moduls .....	61
Abbildung 45 - Temperaturprofil 10 Sekunden nach Verlassen des Moduls .....	61
Abbildung 46 - Platine mit Schleppelementen vor und nach der Erwärmung .....	62
Abbildung 47 - Elementpositionen Platine oben .....	63
Abbildung 48 - Elementpositionen Platine unten .....	63
Abbildung 49 - Schleppversuch 1 mm Platine .....	64
Abbildung 50 - Schleppversuch 1 mm Platine, Detailansicht .....	64
Abbildung 51 - Schleppversuch 1,8 mm Platine .....	65
Abbildung 52 - Schleppversuch 1,8 mm Platine, Detailansicht .....	65
Abbildung 53 - Übergangsbreite Platine 1 mm .....	66
Abbildung 54 - Übergangsbreite Platine 1,8 mm .....	67

## **1 Zusammenfassung**

Bestandteil dieses Projektes ist die Entwicklung und Tests der Funktionsweise eines Prototyps für die partielle Erwärmung von Automobilteilen. Die zu behandelnden Platinen sollen zuvor in einem Hängebahnofen auf eine Temperatur knapp unterhalb der Austenitisierungstemperatur  $AC_1$  bzw.  $AC_3$  erwärmt und anschließend durch eine im Rahmen dieses Projektes zu entwickelnde Vorrichtung transportiert werden, um die Temperatur im Material an definierten Stellen weiter zu erhöhen. Durch anschließendes Presshärten können so in den erwärmten Bereichen der Platine eine hohe Festigkeit erreicht werden, während die restlichen Bereiche flexibel bleiben.

## **1 Summary**

Part of this project is the development and testing of the functionality of a prototype for partial heating of automotive parts. The blanks to be treated will first be heated in an overhead furnace to a temperature just below the austenitizing temperature  $AC_1$  or  $AC_3$  and then transported through a device to be developed within the scope of this project in order to further increase the temperature in the material at defined points. By subsequent press hardening, high strength can be achieved in the heated areas of the blank, while the remaining areas remain flexible.

## 2 Einleitung

### 2.1 Beschreibung der Ausgangssituation

Die zwei wichtigsten aktuell angestrebten Entwicklungsziele im Karosseriebau sind Gewichtsreduzierung und gleichzeitige Verbesserung der Crashesicherheit. Hierzu werden Stähle verwendet, die durch Wärmebehandlung und spezielle Fertigungstechniken hochverfestigt werden (sog. Presshärten). Die hohe Festigkeit ermöglicht reduzierte Bauteildicken und somit eine Gewichtsersparnis.

Das Presshärten von Blechen erfolgt durch die Kombination von Wärmebehandlung und Formgebung und hat sich im Automobilbau im Sinne der Umsetzung automobiler Leichtbaukonzepte großtechnisch durchgesetzt. Dabei wird im Wesentlichen der Stahl 22MnB5 verwendet.

Um die Eigenschaften der pressgehärteten Bauteile noch besser an die Einsatzbedürfnisse anzupassen, ist es vorteilhaft, die Platinen an verschiedenen Stellen verschieden stark (oder ggf. überhaupt nicht) zu härten. Dies ist zum Beispiel zu erreichen, indem nur die zu härtenden Stellen auf die Austenitisierungstemperatur  $AC_1$  bzw.  $AC_3$  erwärmt werden, so dass die Härtung nur an diesen Stellen erfolgt.

Bisherige Methoden hierfür sind jedoch mangelhaft hinsichtlich Flexibilität, Effektivität und Qualität. Außerdem sind sie für den Einsatz in den industriell vorherrschenden Rollenherdöfen gedacht und somit ungeeignet für die Anwendung in den von der Firma Bättenhausen entwickelten Hängebahnöfen.

Im Rahmen eines ZIM-Projektes (EP131303) hat Bättenhausen einen Hängebahnofen entwickelt, der die prozesstechnischen Nachteile von Rollenherdöfen nahezu vollständig eliminiert. Diese sind etwa hohe Wartungskosten wegen Rollenverschleiß, Schwierigkeiten bei der Verarbeitung beschichteter Bleche und eine hohe On-Air-Zeit durch den Transport der Platinen zur Presse durch einen Roboter, wodurch die Blechdicke nicht weiter reduziert werden kann.

Das Projekt lief von Januar 2014 bis Februar 2015 und wurde erfolgreich abgeschlossen. Es steht ein erster Prototyp des Hängebahnofens, so dass das Konzept einer Hängebahn als solche erfolgreich getestet wurde. Durch die vertikale Aufhängung der Bleche ergab sich die Idee, auch eine neuartige Lösung für die partielle Erwärmung zu entwickeln, da sich durch die freie Zugänglichkeit der Bleche von beiden Seiten völlig neue Möglichkeiten ergeben.

Ein hinter dem Ofen platziertes Modul, welches die ausfahrenden vorgewärmten Platinen partiell weiter erwärmt, nutzt die Vorteile, die ein Hängebahnofen bietet, optimal aus, um eine möglichst flexible und effektive gezielte Temperatureinstellung zu erreichen und damit die Bauteileigenschaften zu optimieren. Durch den Prozess sind zum einen Energieeinsparungen in der Herstellung möglich und zum anderen eine signifikante Gewichtsreduzierung der Bauteile erreichbar.

## 2.2 Beschreibung des aktuellen Stands der Technik

Der gängige Prozessablauf beim konventionellen Presshärten ist in Abbildung 1 dargestellt. Nach dem groben Zuschneiden der Stahlplatten werden diese bei großen Formänderungen zunächst kalt vorverformt. Dieser Schritt entfällt bei kleinerem Verformungsgrad. Anschließend werden sie von Robotergreifern in den Ofen eingebracht, wo sie auf die nötige Austenitisierungstemperatur von etwa 950°C gebracht werden. Die glühenden Bleche werden anschließend weiter in die Warmumformpresse bewegt, in der das Bauteil verformt und durch Kühlmittelzufuhr rasch abgekühlt wird. Hierdurch entsteht durch den höheren gelösten Kohlenstoffanteil im Austenit ein verspanntes martensitisches Gefüge, das für die hohe Festigkeit des Materials sorgt. Bei etwa 150°C wird das Bauteil aus der Presse entnommen, die für den Pressvorgang nötigen Überstände werden abgetrennt und es wird langsam bis zur Raumtemperatur gekühlt. Neben der gesteigerten Festigkeit ermöglicht die Warmverformung auch wesentlich höhere maximale Verformungsgrade, so dass weniger Bearbeitungsschritte als bei einer Kaltverformung nötig sind, da im Vergleich nur rund 25 Prozent der Presskraft nötig sind. Durch den Formhärteprozess werden mit 1.650 MPa oder mehr deutlich höhere Bauteilfestigkeiten erzeugt als mit der herkömmlichen Kaltumformung, die lediglich Festigkeiten von 1.100 MPa erreicht.

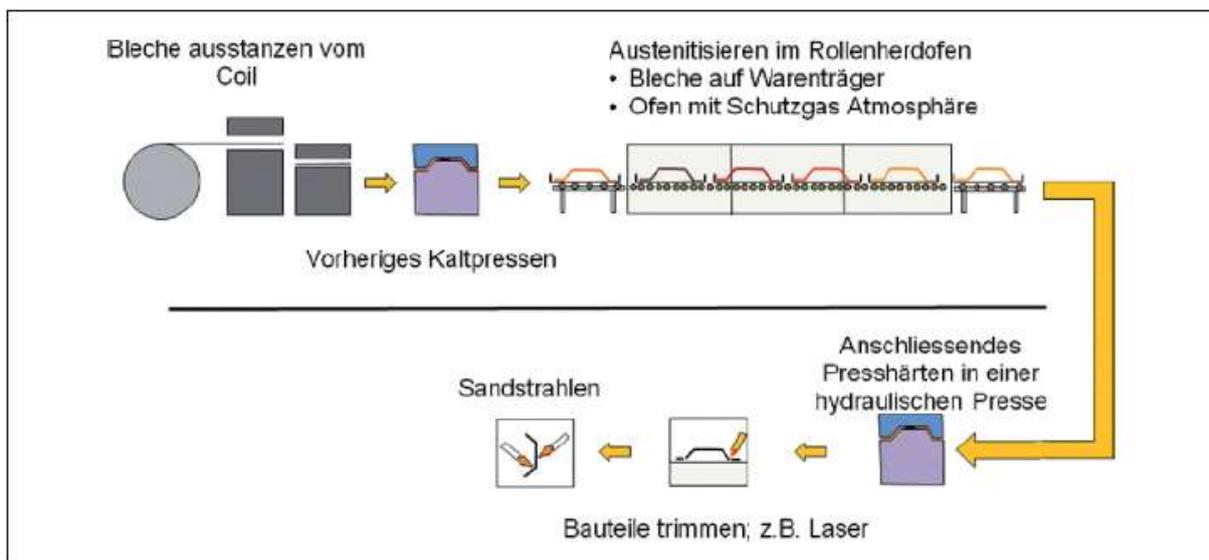
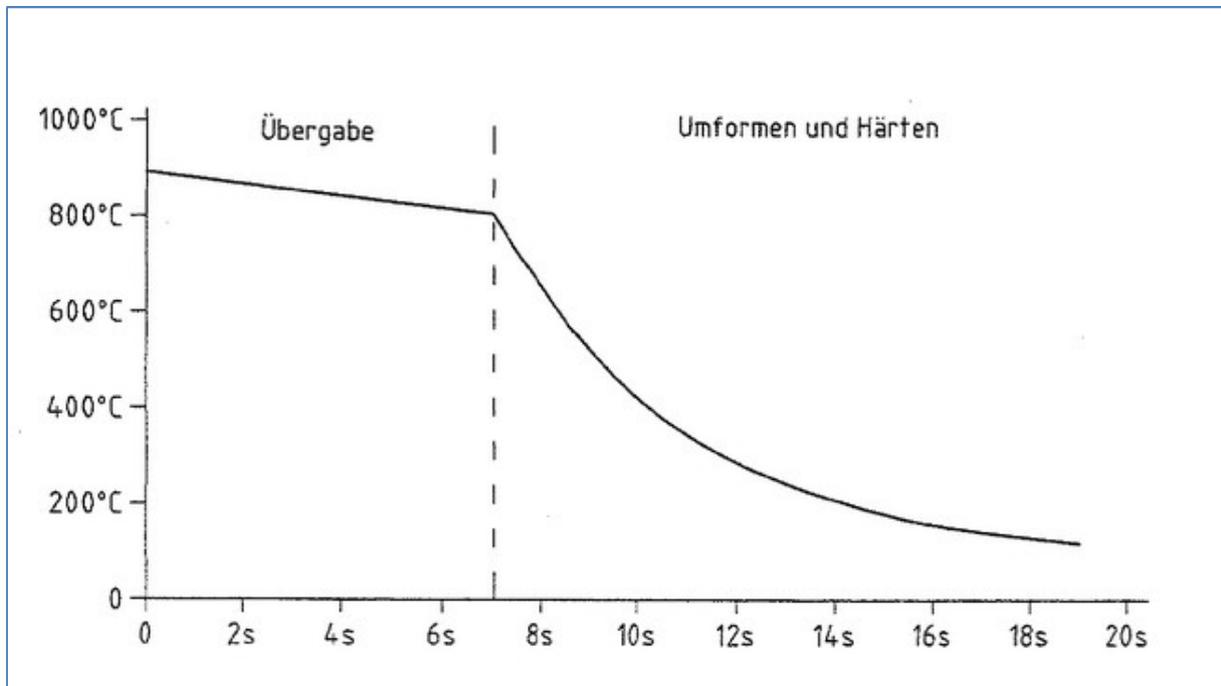


Abbildung 1 - Exemplarische Prozesskette beim Presshärten [Schwartz]

Abbildung 2 zeigt ein typisches Temperatur-Zeit-Diagramm für den Presshärteprozess. Von besonderem Interesse ist hierbei, wie später erläutert wird, die „On-Air“-Time zwischen Entnahme aus dem Ofen und dem Schließen des Werkzeuges, da hierbei die Temperatur des Werkstückes bereits wieder abnimmt.



Üblicherweise werden für die Erwärmung sogenannte Rollenherdöfen (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) eingesetzt, zum Teil werden auch Kammeröfen benutzt. Alle anderen Konzepte, wie Hubbalkenöfen, Kettenträgeröfen, etc. haben sich nicht durchgesetzt.



Abbildung 3 - Rollenherdofen der Firma Ruhstrat GmbH [Ruhstrat]

Neben der einfachen Bauweise und der flexiblen Energieversorgung (Gas, Öl, Hybrid, ...) hat sich beim Rollenherdofen der positive Einfluss der Keramikrollen, die der Beförderung der Platinen dienen, auf eine gleichmäßige Wärmeverteilung als Vorteil herausgestellt.

In den Öfen müssen die Platinen etwa 200°C über die Austenitisierungstemperatur erwärmt werden, da das Material mit etwa 70 °C/s wieder abkühlt, nachdem es den Ofen verlassen hat und in die Presse transportiert wird. Dies stellt einen sehr hohen Energieverlust dar, der sich durch eine Verkürzung der Transportzeit verringern lässt.

Die vollständige Durchhärtung hat gleichzeitig den Nachteil, dass die Bruchdehnung in kritischen Bereichen geringer als gewünscht wird (etwa 6 – 8 Prozent). Dies ist insbesondere hinsichtlich der Crashesicherheit und der dafür benötigten definierten Verformungen in den Knautschzonen von Nachteil. So muss zum Beispiel die B-Säule eines Automobils im unteren Drittel Energie durch plastische Verformung abbauen, im oberen Bereich dagegen die Fahrgastzelle mit hoher Festigkeit stabilisieren. Weitere Beispiele sind A-Säulen, Seitenaufprallschutzträger in Türen, Schweller, Rahmenteile, Stoßstangenfänger, Querträger für Boden und Dach sowie vordere und hintere Längsträger. Um eine gezielte Einstellung unterschiedlicher lokaler Festigkeits- und Duktilitätswerte in einem einzigen Arbeitsschritt aus einem homogenen Blech zu erreichen, werden in der jüngeren Vergangenheit verschiedene neuartige Möglichkeiten untersucht. Diese lassen sich in drei Vorgehens-Klassen unterscheiden:

### 2.2.1 Tailored Tempering

Beim Tailored Tempering, das in den Patenten WO 2012010418 A1 der Thyssen Krupp Steel Europe AG sowie DE 102009018798 A1 der Daimler AG beschrieben ist, werden Pressenwerkzeuge verwendet, die durch eingearbeitete Heizkanäle eine lokal unterschiedliche Temperatur und Abkühlrate aufweisen, vgl. Abbildung 4. Hierdurch ist es möglich, in bestimmten Bauteilbereichen höhere Zähigkeitswerte wie Bruchdehnung, Schlagzähigkeit und Dauerfestigkeit zu erreichen, weil eine Phasenumwandlung in die bainitische Zwischenphase anstelle von Martensit erfolgt. Die unterschiedlichen entstehenden Gefügephasen hängen von der Abkühlgeschwindigkeit und der Abkühltemperatur ab, wenn von einem Niveau oberhalb der Austenitisierungstemperatur abgeschreckt wird, wie Abbildung 5 zeigt. Diese Vergütungsform wird beim Presshärten durch Erwärmen auf Austenitisierungstemperatur mit anschließendem partiellen Abschrecken auf den Zwischenstufenbereich sowie Halten auf diesem Temperaturniveau für etwa 2 bis 20 Minuten erreicht. Dabei weisen alle Verfahren, die ein partiell beheiztes Werkzeug benutzen, den Nachteil auf, dass das Bauteil mit Verzug behaftet ist, da das Bauteil mit partiell unterschiedlichen Temperaturen von ca. 300°C bis 500°C im weichen Bereich und von ca. 100°C in martensitischen Bereichen dem Werkzeug entnommen wird und außerhalb des Formzwangs weiter abkühlt. Darüber hinaus wird die Taktzeit des Verfahrens verlängert, da das schnelle Abkühlen zugunsten der Perlit-Ferrit-Bildung verlangsamt wird, womit im gleichen Zug die Wirtschaftlichkeit reduziert wird. Zusätzlich sind solche Werkzeuge sehr komplex und damit teuer und störanfällig. Dieses Verfahren wird dennoch mittlerweile auch in der Großserienproduktion eingesetzt.

## 2.2.2 Tailored welded blanks

Bei Tailored Welded Blanks werden an den betreffenden Stellen Bauteile angeschweißt, die durch ihren niedrigen Kohlenstoffgehalt nicht aufhärtbar sind. De facto handelt es sich dabei aber nicht mehr um eine Integralbauweise und der Fertigungsaufwand steigt. Außerdem ist an den nichtgehärteten Teilen keinerlei Festigkeitssteigerung möglich. Zudem entstehen mit den nötigen Schweißnähten neue Schwachstellen.

Bei der Teilaustenitisierung werden Teile der Platine während dem sogenannten „partiellen Erwärmen“ bei geringerer Temperatur austenitisiert oder ggf. gar nicht austenitisiert, entweder durch Verkleidung mit einer Absorptionsmasse oder durch andere Kühlmechanismen, wodurch bei gleicher Haltedauer Restferrit im Gefüge verbleibt. Hierdurch wird die beim Abschrecken entstehende Martensitstruktur mit Ferrit durchsetzt und bleibt duktil. Hierfür ist eine genauere und lokal fein justierbare Temperaturführung im Ofen vorteilhaft, um Energie zu sparen. Dies ist mit den gegenwärtigen Rollenherdöfen nur schwer erreichbar, da durch die horizontale Lage der Bleche prinzipiell eine sehr homogene Wärmeverteilung vorliegt. Durch den Kontakt mit den Rollen in einzelnen Punkten kann es aufgrund der Blechwölbung zu unvorhersehbaren Hotspots kommen, die den Einsatz der partiellen Erwärmung in herkömmlichen Rollenherdöfen nahezu unmöglich machen.

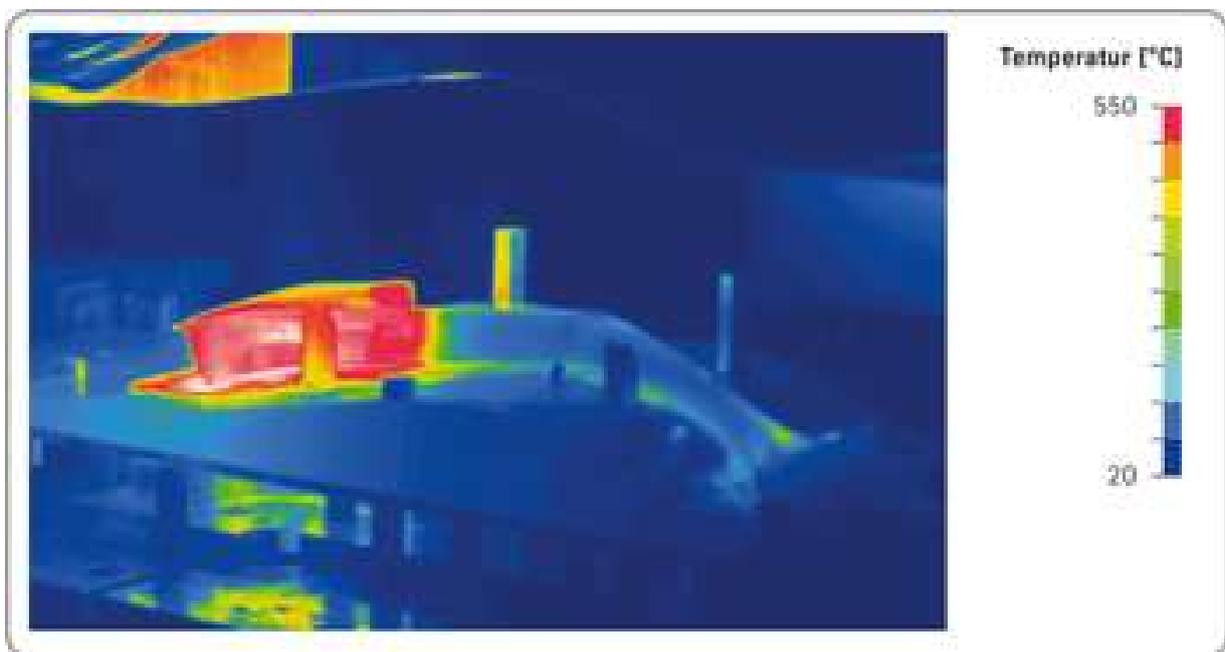


Abbildung 4 - Wärmebild einer B-Säule beim Tailored Tempering Prozess (Quelle: ThyssenKrupp)

Das vielversprechendste Verfahren ist dabei die partielle Erwärmung, da hierbei die integrale Bauweise erhalten bleibt. Weiterhin ist der Energieaufwand gegenüber der anderen Verfahren geringer, da die nicht zu härtenden Bauteilbereiche nicht zuvor mit erwärmt werden müssen. Im Folgenden werden daher die aktuellen Ansätze zur partiellen Erwärmung diskutiert.

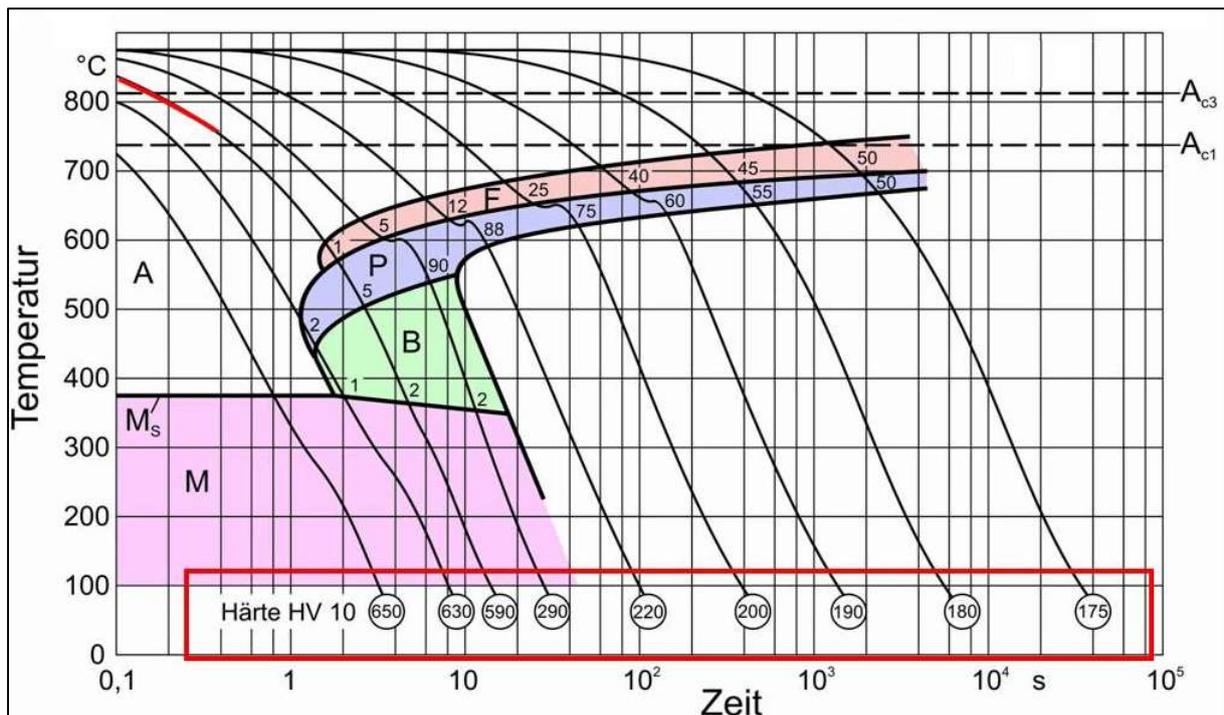


Abbildung 5 - Beispielhaftes ZTU-Diagramm, das zeigt, dass bei langsamerer Abkühlung vermehrt Bainit statt Martensit entsteht. Wird das Bauteil nicht bis Raumtemperatur abgeschreckt, ist eine vollständige Bainitstruktur erreichbar [Universität Wuppertal]

## 2.3 Aktueller Stand der Technik bei der partiellen Erwärmung

### 2.3.1 Öfen mit mehreren unterschiedlichen Temperaturzonen

Das Patent DE 102 56 621 schlägt prinzipiell eine Lösung vor, wonach die Platine während des Transports durch einen Durchlaufofen gleichzeitig mindestens zwei nebeneinander angeordnete Zonen mit unterschiedlichem Temperaturniveau durchläuft. Dadurch erwärmt sich das Halbzeug in den Bereichen unterschiedlich. Anschließend kann das auf diese Weise unterschiedlich stark erwärmte Halbzeug einem Härteprozess unterworfen werden, so dass unterschiedliche Gefügestrukturen in unterschiedlichen Bereichen des Bauteiles erreicht werden können.

Nachteilig an diesem Verfahren ist der hohe konstruktive Aufwand für den Ofen. Zum Beispiel müssen die beiden Zonen thermisch voneinander getrennt werden und es sind zwei komplette Brennereinheiten nötig. In der Übergangszone zwischen den beiden Bereichen entsteht durch die interne Wärmeleitung in der Platine ein nicht definierter Härteverlauf, der mehrere Zentimeter breit sein kann. Außerdem ist das Verfahren nur auf die speziellen Bedürfnisse der B-Säulen-Fertigung angepasst und nicht flexibel einsetzbar. Beispielsweise ist es nicht möglich, die Härte des Mittelteils eines Bauteils gezielt einzustellen. Naturgemäß können zudem nur zwei verschiedene Gefügestrukturen eingestellt werden; eine Erweiterung auf mehrere Zonen ist zwar denkbar, jedoch ist die Wirtschaftlichkeit auf Grund des stark steigenden konstruktiven Aufwands zu bezweifeln.

### 2.3.2 Kontaktwärmebehandlung

Um die Probleme der unregelmäßigen Erwärmung zu umgehen, wird zum Beispiel durch das Partnerkonsortium „FlexWB“, an dem u.a. Daimler, Audi und ThyssenKrupp beteiligt sind, auch Kontaktwärmebehandlung erforscht. Wie Abbildung 6 zeigt, wird die Induktionswärme zunächst in eine Kontaktplatte geleitet, die eine gleichmäßige Erwärmung der Platine bewirkt. Die Wärmebehandlung von Al-Si-beschichteten Blechen ist durch diese Art der Wärmeübertragung, im Vergleich zur konventionellen Erwärmung durch Strahlung und Konvektion, deutlich schneller durchführbar als im Ofen. Deshalb kann die Ausbildung der Diffusionszone stark beschleunigt werden. Dadurch ist mit Kontakterwärmung eine signifikant geringere Prozesszeit für den Vorgang der Werkstoffvorbereitung erreichbar.

Bei Versuchen hat es sich jedoch gezeigt, dass das ursprünglich anvisierte Ziel einer gleichmäßigen Erwärmung nicht erreicht werden konnte. Daraus entstand allerdings der Ansatz, das Verfahren für eine gezielte Einstellung verschiedener Wärmebereiche an der Platine zu erreichen. Hierzu laufen aktuell Forschungsarbeiten. Allerdings kann nicht davon ausgegangen werden, dass diese deutlich kompliziertere Anforderung mit dem gewählten Ansatz realisiert werden kann, nachdem bereits die ursprünglichen Ziele nicht erreicht wurden. Zudem ist der Prozess auf Grund der umständlichen Einspannung zwischen die Kontaktplatten nicht für eine weitere Durchsatzerhöhung geeignet.

Weiterhin wurde festgestellt, dass die Oberfläche der Platine bei direkter Kontaktierung Schaden nehmen kann. Außerdem kann diese beim Lösen der Platten „kleben“ bleiben und muss vor der weiteren Behandlung wieder abgelöst werden.

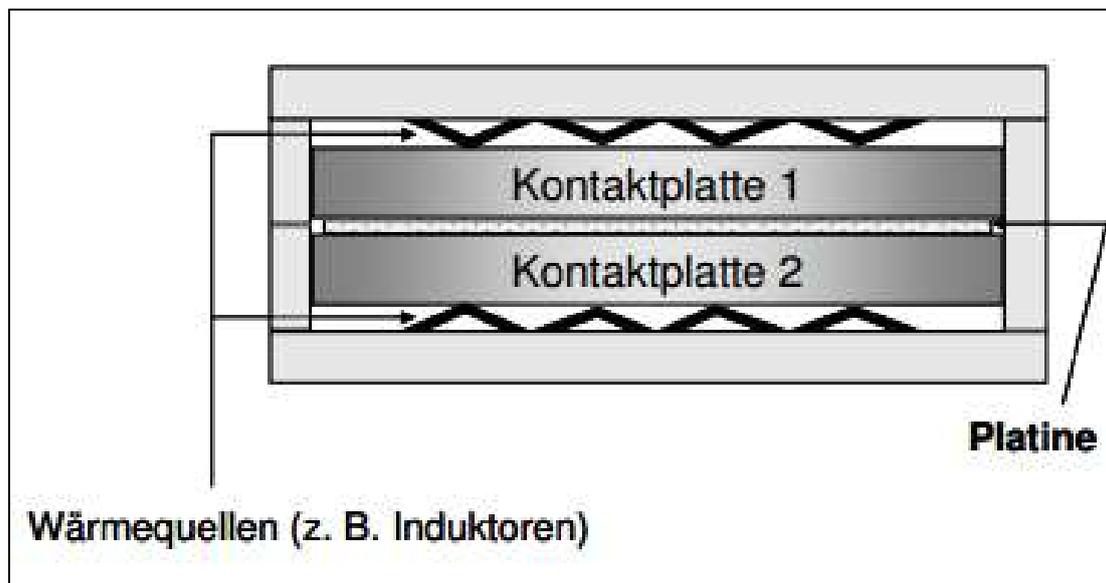


Abbildung 6 - Prinzip der Kontaktwärmebehandlung

### 2.3.3 Laserhärten

Das Patent DE10240675 der Benteler Automobiltechnik GmbH beschreibt ein Verfahren durch Laserhärten, vgl. Abbildung 7. Das Laserhärten ermöglicht die Fertigung von B-Säulen mit präzise abgestimmten Bereichen hoher Festigkeit und einem martensitischen Werkstoffgefüge. Die anderen nicht vergüteten Bereiche besitzen demgegenüber eine höhere Duktilität und ein ferritisch-perlitisches Werkstoffgefüge mit geringerer Festigkeit. Die Übergänge zwischen den Bereichen können stufenlos gestaltet werden. Auf diese Weise werden nachteilige Festigkeitssprünge vermieden. Die Vorgehensweise zum partiellen Härten der B-Säule ist kostengünstig und geeignet, verschiedene geometrische Varianten von B-Säulen in einer Fertigungslinie zu vergüten. Dies ermöglicht die hohe Flexibilität der Lasereinrichtungen, insbesondere von Hochleistungs-Diodenlaservorrichtungen.

Der Härteprozess in den gewünschten Bereichen erfolgt durch die partielle Erwärmung des Bauteils mit Laserstrahlung über die Austenitisierungstemperatur. Trifft die Strahlung auf das Metall, so wird der absorbierte Anteil in Wärme umgesetzt, die den Randbereich der Platine erhitzt. Infolge Selbstabschreckung durch den raschen Temperatenausgleich zwischen Randzone und angrenzendem innenliegenden Werkstoff erfolgt die Härtung, eine weitere Kühlung ist nicht erforderlich.

Es erfolgt eine geringe und streng abgegrenzte Wärmeeinbringung mit hoher Präzision der Spurlage und Spurbegrenzung. Zudem ist das Verfahren sehr gut zu automatisieren. Die Temperaturführung zur Prozessregelung wird in der Regel in den Laserkopf integriert.

Prozessbedingt ist dieses Verfahren nicht geeignet, die Vorteile einer Warmumformung (niedrigere Pressenkräfte, größere Umformgrade) zu nutzen, da wie erwähnt bereits eine Kühlung durch Selbstabschreckung erfolgt. Es ist zudem keine genaue Temperaturführung während der Abkühlung möglich, sodass eine gewisse Schwankung in den Werkstoffeigenschaften tolerierbar sein muss. Das Verfahren ist zudem nicht für die Durchhärtung geeignet, sondern nur für eine oberflächennahe Vergütung. Typisch sind Randhärte-tiefen von 0,1 bis 1,5 Millimetern. Insgesamt ist das Verfahren eher für eine lokal stark begrenzte „Detail-Härtung“ geeignet, denn eine großflächige partielle Härtung. Es wird industriell beispielsweise für die Nachhärtung von Biegekanten, Vertiefungen und anderen schwer zugänglichen Teilbereichen genutzt. Auch Lagerstellen, beispielsweise von Turboladerwellen, werden oftmals lasergehärtet.

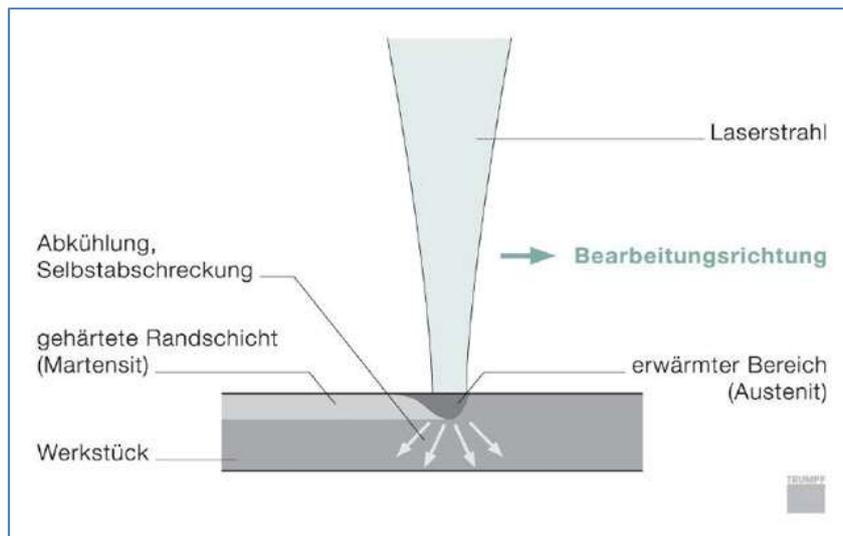


Abbildung 7 - Funktionsprinzip des Laserhärtens [Quelle: Trumpf]

#### 2.3.4 Nacherwärmung

Das Patent DE 19743802 beschreibt eine Methode zur partiellen Erwärmung durch induktive Nacherwärmung der betreffenden Bauteilbereiche. Hierbei wird eine Schnellerwärmung in den entsprechenden Temperatur- und Zeitgrenzen vorgenommen. Das induktive Verfahren bietet die Möglichkeit, die Erwärmung gezielt auf eine oder mehrere begrenzte Bereiche eines Formbauteils zu konzentrieren. Die Erwärmung wird auf die in ihrer Duktilität zu erhöhenden Zonen beschränkt. Auch können durch geeignete Führung des Induktors oder des Formbauteils nahezu beliebige Konfigurationen der duktilen Zonen erreicht werden.

Problematisch bei der induktiven Nacherwärmung ist die niedrige Energiedichte, die erreicht werden kann. Hierdurch betragen die Aufheizzeiten bis zu 30 Sekunden, was einen starken Temperaturabfall in den nicht betroffenen Zonen zur Folge hätte und somit die Warmumformung behindern würde. Es müssen daher die entsprechenden duktilen Zonen weiterhin auf ihrer Austrittstemperatur gehalten werden, was einen hohen zusätzlichen Energieverbrauch bedeutet. Außerdem besteht bei längerer Haltezeit die Gefahr der Verzunderung. Zudem kommt es durch die langen Aufheizdauern zu relativ breiten Übergangszonen.

Das Patent DE 101 08 926 offenbart ein Wärmebehandlungsverfahren, bei dem das Bauteil mit elektromagnetischer Strahlung eines Emitters mit einer mit hoher Leistungsdichte bestrahlt wird. Das Patent EP 2143808 zeigt ein ähnliches Verfahren mittels einer Infrarotlampenerwärmung auf.

Allen diesen Verfahren sind die oben beschriebenen Probleme gemein, dass die Erwärmung zu lange dauert und damit die Übergangszone zu groß und der Prozesstakt zu lange wird.

### 2.3.5 Abdeckungen

Der naheliegendste, derzeit praktikabelste und am meisten eingesetzte Prozess ist die konventionelle Erwärmung wie bisher in Rollenherdöfen, wobei die Teilbereiche, die nicht gehärtet werden sollen, durch Abdeckungen vor der Erwärmung geschützt werden. Dieser Vorgang wird beispielsweise in dem Patent DE102009023195 der BMW AG beschrieben. Die Erfindung bietet u.a. den Vorteil, dass auch bestehende Presshärteanlagen einfach und mit verhältnismäßig geringen Kosten auf partielles Presshärten umgestellt werden können.

Als Abdeckung kommen z.B. Decken, wiederverwendbare Abdeckeinrichtungen und spezifisch aufgebrauchte Abdeckmaterialien in Betracht. Hierbei werden von beiden Seiten zwei Formschalen auf das Blech aufgebracht. Die Abdeckformen bestehen meist aus hitzebeständigen Fasern, wie etwa Steinwolle oder Asbest.

Der Grad der thermischen Abschirmung wird in Prozent bemessen, wobei 100 Prozent eine vollständige thermische Abschirmung beschreiben. Durch den Grad der thermischen Abschirmung kann somit die sich beim Presshärten einstellende Festigkeit des Blechmaterials gezielt eingestellt werden.

Nachteilig am Einsatz der Abdeckungen ist, dass für jede Bauteilform neue Abdeckformen aus wenig umweltverträglichen Materialien (Asbest) entwickelt werden müssen. Zudem müssen die Formen im Prozess auf den Platinen befestigt werden, was die Prozessgeschwindigkeit limitiert. Die Abdeckformen haben eine beschränkte Lebensdauer und müssen nach einigen Wochen ersetzt werden. Das größte Problem besteht darin, dass es durch die untere Form zu einem veränderten Wärmeeintrag auch an den nicht abgedeckten Stellen der Platine in einem Rollenherdofen kommt, da keine flächige Auflage zu den Keramikrollen mehr besteht.

Es ist darüber hinaus aus energetischer Sicht wenig wirtschaftlich, dem Bauteil erst überschüssige Energie zuzuführen, um diese anschließend durch aufwendige Abdeckungen wieder zu absorbieren.

### 2.3.6 Zusammenfassung

Zusammengefasst existieren für alle vorgestellten am Markt befindlichen Systeme oder patentierten Vorgehensweisen zur partiellen Erwärmung die folgenden gravierenden Nachteile:

- Bei allen Nacherwärmungssystemen ist die Energiedichte nicht ausreichend, um eine schnelle Temperaturführung zu erreichen. Der nicht erwärmte Bereich kühlt daher wieder unzulässig stark aus.
- Es sind nur stark begrenzte Bereiche oder nur zwei verschiedene Bereiche mit unterschiedlichen Temperaturen wirtschaftlich herstellbar

- Es bilden sich zu große Übergangsbereiche zwischen Zonen unterschiedlichen Härtegrades
- Es kommt zu unnötigen und recht hohen Energieverlusten
- Die Prozessdauer verlängert sich

Keines der Verfahren ist geeignet, die besonderen Vorteile des von Bättenhausen entwickelten Hängebahnofens, bei dem die Bleche vertikal transportiert werden, und insbesondere seinem schnellen Ofenaustrag mit sehr kurzer On-Air Zeit sowie die Zugänglichkeit der Platinen von beiden Seiten (da die Rollen entfallen) zu nutzen.

#### 2.4 Beschreibung des Lösungsweges

Um die diskutierten Probleme bei der partiellen Erwärmung von Stahlblechen zu überwinden, plant die Bättenhausen GmbH ein Verfahren zu entwickeln, bei der gezielt Bereiche des bereits auf eine Temperatur unterhalb der AC<sub>1</sub>- bzw. AC<sub>3</sub>-Temperatur eingestellten Bleches nacherwärmt werden. Dies soll während dem Transport zwischen Ofen und Presse passieren und zwar ohne, dass die Platine angehalten oder umgesetzt werden muss. Hierdurch kommt es zu keiner Verlängerung der Prozessdauer und der Platz im Ofen wird nach erfolgter Primärerwärmung sofort wieder für das nächste Blech frei. Um die für die enorm hohe Aufheizgeschwindigkeit von etwa 40 °C/s benötigte Energiedichte zu erreichen, soll hierfür eine Matrix aus Gasbrennern und/oder Elektrostrahlern eingesetzt werden.

Die partielle Erwärmung soll dabei so konstruiert werden, dass sie insbesondere dann vorteilhaft eingesetzt werden kann, wenn die Bleche über eine Hängebahn transportiert werden.

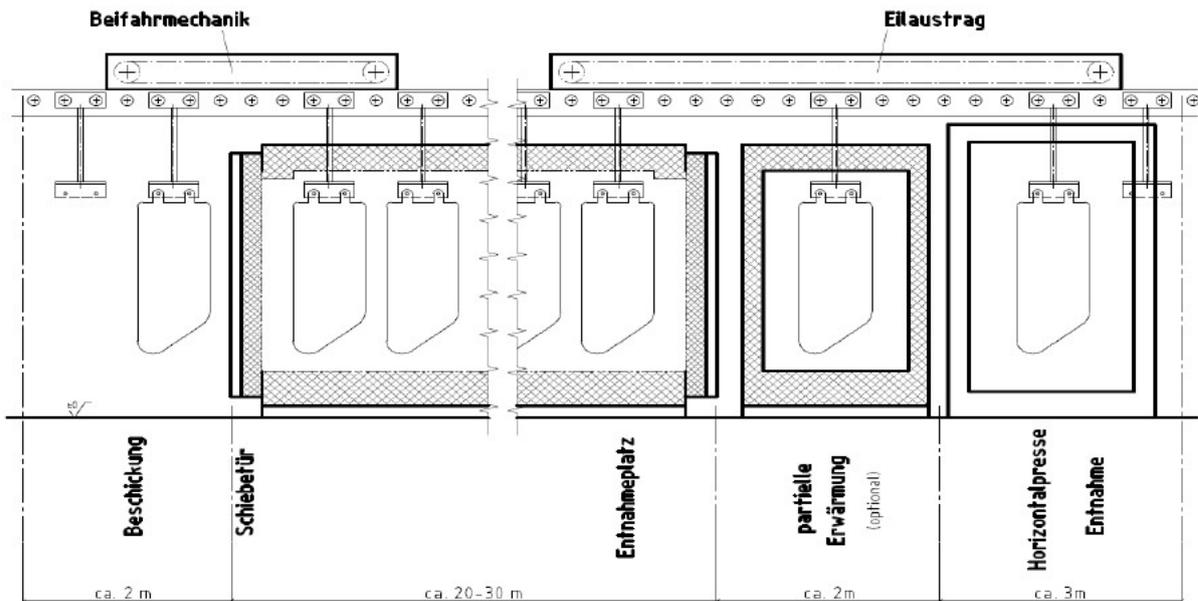


Abbildung 8 - Prinzipskizze des Hängebahnofens mit Modul zur partiellen Erwärmung [Bättenhausen]

Die partielle Erwärmung soll in einem abgeschlossenen Modul erfolgen (vgl. Abbildung 8), so dass es problemlos als Nachrüstung angeboten werden kann und mit allen, für den Betrieb mit einem Hängebahnofen ausgelegten Pressen betrieben werden kann.

Zunächst soll in einer Machbarkeitsanalyse das zu verwendende Brennerverfahren identifiziert werden. Maßgebende Parameter sind dabei Energiedichte sowie Prozesseffizienz. In einem zweiten Arbeitspunkt wird ein geeignetes Wärmesimulationsmodell entwickelt, in dem der Wärmeeintrag der Brenner in sich vorbeibewegende Metallplatinen simuliert werden kann. Hierzu werden zunächst generelle Simulationen durchgeführt, um das Wirkprinzip nachzuvollziehen und Gesetzmäßigkeiten des Aufheizverhaltens ableiten zu können. Anschließend können die so gewonnenen Erkenntnisse dazu genutzt werden, um die makroskopischen Prozessparameter simulatorisch zu untersuchen und zu ermitteln. Hierzu gehören etwa Anordnung und Anzahl der Beheizung, Abstand zu den Platinen, maximaler Transportvorschub, Abkühlgeschwindigkeit zwischen p.E.-Modul und Presse usw.

Nach dem das Funktionsprinzip entwickelt wurde, erfolgt die Entwicklung der Modulsteuerung als Teil der gesamten Ofensteuerung. Die Regelung und Steuerung des Moduls soll mithilfe integrierter Mikrocontroller erfolgen. Ebenso muss die Anbindung an das Visualisierungssystem des Ofens entwickelt werden. Hierzu gehört beispielsweise auch die Integration der benötigten Sensorik. Anschließend erfolgt Entwurf der Schaltungen und das Layout des gesamten Elektroplanes.

Daran anschließend wird ein funktionsfähiger Prototyp des Moduls gebaut, der später als Gesamtanlage mit dem Hängebahnofen betrieben werden soll.

## 2.5 Beschreibung der Vorarbeiten

Im Rahmen eines ZIM-Projektes (EP131303) hat Bättenhausen einen Hängebahnofen entwickelt, der die prozesstechnischen Nachteile von Rollenherdöfen nahezu vollständig eliminiert. Diese sind etwa hohe Wartungskosten wegen des Rollenverschleiß, Schwierigkeiten bei der Verarbeitung beschichteter Bleche und eine hohe On-Air-Zeit, wodurch die Blechdicke nicht weiter reduziert werden kann.

Das Projekt lief von Januar 2014 bis Februar 2015 und wurde erfolgreich abgeschlossen. Es steht ein erster Prototyp des Hängebahnofens, so dass das Konzept einer Hängebahn als solche geprüft ist.

## 2.6 Ziele des Projektes

Relevanter Parameter	Zielwert
Energieeintrag	Elektrische Strahler
Energiedichte	$> 5 \text{ W/cm}^2$
max. Aufheizrate	$50 \text{ °C/s}$
max. Aufheizdauer	8 s
On-Air-Zeit	6 s
max. Breite der Übergangszonen	3 cm (Reduktion um 25 %)
Taktzeit der gesamten Anlage:	$< 16 \text{ s}$

## 2.7 Umweltrelevanz des Projektes

Durch den hohen Energieeintrag durch eine Elektrostrahlermatrix auf beiden Seiten der Platinen wird eine geringe Aufheizdauer ermöglicht. Dies ist nur deshalb erreichbar, weil eine beidseitige partielle Erwärmung im direkten Anschluss an den Ofen erfolgt. Gleichzeitig wird die On-Air-Zeit der Bleche durch den p.E.-Prozess nicht verlängert, was bei anderen Verfahren, die auf Nacherwärmung setzen, ebenfalls nicht der Fall ist und prozesstechnisch nicht anders zu lösen ist. Gegenüber den Abdeckverfahren entfallen die hohen Energieverluste durch Absorption. Außerdem fallen keine umweltschädlichen Abfallprodukte durch die Asbestabdeckungen an.

Durch den hängenden und damit berührungslosen Transport können die Bleche in ihrer Dicke um mindestens 30 % reduziert werden, was letztlich dazu führt, dass große Gewichtseinsparungen im Karosseriebau möglich sind. Bei konsequentem Einsatz des Konzepts an diversen tragenden Strukturteilen (A-, B-, C-Säulen, ...) sind Gewichts- und damit auch Kraftstoffeinsparungen möglich. Hochgerechnet auf

die gesamte Automobilindustrie stellt dies einen enormen Beitrag zur Umweltentlastung dar.

Auch durch die Reduktion der Übergangszonen zwischen duktilem und gehärtetem Bereich kann Material und Gewicht eingespart werden, da die nötigen Pufferzonen kleiner ausfallen können.

Durch den Wegfall der häufigen Wechsel der Keramikrollen bei herkömmlichen Rollenherdöfen fällt weniger Sondermüll in der laufenden Fertigung an, ebenso müssen keine Asbest-Abdeckungen entsorgt werden.

### 3 Machbarkeitsanalyse, Konzeptentwicklung, Anforderungsdefinitionen

Für das Presshärten ist es erforderlich, das Blech unmittelbar vor dem Verformen (Presshärten) partiell auf unterschiedliche Temperaturen zu erwärmen, um an den gewünschten Stellen eine Härtung bzw. keine Härtung bei der Verformung zu erreichen. Dazu wurden nachstehend verschiedene denkbare Möglichkeiten durch überschlägige Berechnungen auf Machbarkeit hin überprüft:

#### 3.1 Partielles Kühlen

##### **Vorteile:**

- relativ einfache Einrichtung
- geringe Invest- und Betriebskosten

##### **Nachteile:**

- möglicherweise unerwünschte Härtung der gekühlten Flächen (Lufthärtung)
- hohe Ofenraumtemperaturen und damit Anstieg der Verzunderung
- höherer Energieverbrauch
- eventuell Entkohlung und Wasserstoffversprödung. Um diesen Erscheinungen im Ofen entgegenzuwirken, ist eine tiefe Taupunkteinstellung bzw. inerte Ofenatmosphäre erforderlich

##### **Betrachtung:**

Das Blech wird regulär auf eine Austenitisierungstemperatur von 900 °C – 950 °C erwärmt und durchläuft anschließend ein Düsenfeld, welches in der Lage ist, dem Blech partiell bei gegebener Durchlaufgeschwindigkeit ausreichend Wärmeenergie zu entziehen, um es auf ca. 500 °C abzukühlen. Der Wärmeübergangskoeffizient für Medium Luft wird bestimmt durch

$$\alpha_{\text{ü Kühlen}} \approx 6 \cdot d^{-4} \cdot w^{0,6}$$

Mit  $d$  = Düsendurchmesser in m,  $w$  = Austrittsgeschwindigkeit in m/s

Bei einem Düsenfeld  $d = 10$  mm, Teilung =  $5d$  und Abstand =  $5d$  ergibt sich

$$\alpha_{\text{ü Kühlen}} \approx 600 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Die Blechdicke beträgt 1 mm, die durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 40 \frac{W}{m \cdot K}$ , die spezifische Wärmekapazität  $0,16 \frac{W}{Kg \cdot K}$ .

Betrachtet wird ein Blechstreifen mit der Fläche  $0,01 \text{ m}^2$ , woraus sich die zu kühlende Masse auf  $0,01 \text{ m}^2 \cdot 1 \text{ mm} \cdot 7,8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 78 \text{ Gramm}$  ergibt.

Die benötigte abzuführende Wärmemenge bei einer gewünschten Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 450 \text{ K}$  beläuft sich auf

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 78 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 0,16 \frac{\text{W}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \cdot 450 \text{ K} = 5,62 \text{ W}$$

Da das Düsenfeld beidseitig ausgeführt wird, ist die Wirkung verdoppelt, die Blechstärke also effektiv zu halbieren. Als effektiver Wärmeübergangskoeffizient  $k$  unter Einbeziehung der inneren Wärmeleitfähigkeit ergibt sich folglich:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{üKühlen}}} + \frac{s}{\lambda}} = \frac{1}{\frac{1}{600} + \frac{5 \cdot 10^{-4}}{40}} = 595 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Die Kühlluft wird mit einer Temperatur von ca.  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  angenommen, womit sich die Kühlleistung zu

$$Q = 595 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 0,01 \text{ m}^2 \cdot 900 \text{ K} = 5360 \text{ W}$$

ergibt. Die Verweilzeit des Bleches in der Kühlstrecke auf dem Weg vom Ofen zur Presse muss folglich

$$t = \frac{3600 \text{ s} \cdot 5,62 \text{ W}}{2 \cdot 5360 \text{ W}} \approx 1,9 \text{ s}$$

betragen. Daraus ergibt sich bei einer gewünschten Transportgeschwindigkeit von ca.  $1,5 \text{ m/s}$  eine Länge der Kühlstrecke von

$$l = 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,9 \text{ s} \approx 2,9 \text{ m}$$

Wie die Berechnungen zeigen, wäre dies technisch umsetzbar. Zu untersuchen wäre, inwieweit es zu unerwünschten Härtevorgängen durch die schnelle Abkühlung vor dem eigentlichen Pressvorgang kommt, worauf im Rahmen dieses Projektes nicht näher eingegangen wird.

## 3.2 Partielles Heizen durch Strahler

### Vorteile:

Der Ofenraum wird nur noch auf ca. 700 °C aufgeheizt (Betriebstemperatur). Die thermischen Verluste reduzieren sich erheblich, die Wärmestrahlung durch den Transportschlitz in der Decke geht stark zurück, die Wärmeverluste an der Chargier- und Entnahmeöffnung werden geringer. Die temperaturabhängigen Reaktionen im Ofenraum durch die Ofenatmosphäre wie Verzunderung, Entkohlung, Wasserstoffversprödung und der Einfluss auf eventuell vorhandene Beschichtungen nehmen ab bzw. setzen gar nicht erst ein.

### Nachteile:

Zwischen Ofen und der Presse ist eine Nachheizstation zu installieren, die beidseitig das Blech partiell von ca. 600 - 700 °C auf 900 - 920 °C aufheizt. Aufgrund der kurzen Verweilzeit sind relativ hohe Temperaturdifferenzen zur Wärmeübertragung sowie hohe Heizleistungen erforderlich. Diese sind dann mit elektrischer Energie (abgasfrei) zu realisieren. Die Investitionskosten gegenüber einer Gasheizung mit Abgasführung sind wesentlich günstiger. Für jedes, in Größe und Art verschiedene Bauteil muss ein von der erforderlichen Heizfläche angepasstes Beheizungssystem, ähnlich einem Werkzeug, gefertigt werden.

### Betrachtung:

Das Blech wird im Ofen auf ca. 700 °C aufgeheizt. Die Flächen oder Partien, die einer Presshärtung unterzogen werden, sind auf ca. 900 °C aufzuheizen. Bei einer angenommenen Taktzeit von 10 Sekunden und einem Stückgewicht von ca. 1 kg beträgt die Produktionsleistung 360 kg/h. Bei einer Nachheizfläche von ca. 70 % beträgt das Blechgewicht ca. 250 kg/h. Soll die Beheizung von 700 °C auf 900 °C (also  $\Delta T = 200$  K) in einer Zeit von ca. 6 Sekunden erfolgen, so ist eine Wärmemenge von

$$Q_{Teil} = m \cdot c \cdot \Delta T = 0,7 \text{ kg} \cdot 576 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \cdot 200 \text{ K} = 80,6 \text{ kJ}$$

und damit eine Leistung von

$$P_{Ges} = \frac{80,6 \text{ kJ}}{6 \text{ s}} = 13,4 \text{ kW}$$

erforderlich.

Inklusive Berücksichtigung von Verlusten und Sicherheitsfaktor sollte die Bruttoleistung ca. 18 kW betragen. Da die Beheizung beidseitig erfolgen soll, teilt sich die Leistung auf 2 Strahler von jeweils 9 kW auf. Um im Rahmen des Projektes flexibel zu sein, wird vorgesehen, jede Seite der Beheizung wiederum in 2

Heizelemente zu jeweils 5 kW aufzuteilen, um auch kleinere/mehrere Bereiche erwärmen zu können.

Für die Leistungsübertragung wird ein Strahler mit einer Temperatur von 1500 °C betrachtet. Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz ergibt sich:

$$\frac{P}{A} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{\text{Strahler}}^4 - T_{\text{Blec}}^4) = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot 0,7 \cdot (1773,15 K^4 - 973,15 K^4) = 353 \frac{kW}{m^2}$$

Der Emissionsfaktor  $\varepsilon$  liegt nach Datenblättern und experimentellen Angaben bei ca. 0,7. Da beidseitig beheizt wird, ist diese Leistung zu verdoppeln. Bezogen auf die zu beheizende Fläche von 0,08 m<sup>2</sup> ergibt sich eine Strahlungsleistung von

$$P = 2 \cdot 354 \frac{kW}{m^2} \cdot 0,08 m^2 = 56,7 kW \gg 13,4 kW$$

Der mögliche theoretische Leistungsübertrag ist also deutlich höher, als die benötigte Erwärmungsleistung. Es bleiben ausreichend Reserven, während der Durchführung der Versuchsreihen optimierte Parameter zu ermitteln, wie

- kürzere Durchlaufzeiten: schnellerer Transport zur Presse möglich -> geringere Abkühlzeit der restlichen Platine -> niedrigere Ofentemperaturen einstellbar
- geringere Strahlertemperatur: längere Lebensdauer, geringere erforderliche elektrische Leistung
- geringere Abmessungen des Strahlers, da dieser nicht die gesamte Platinenbreite überdecken muss (Erwärmung während Durchfahrt)

### 3.3 Partielles Heizen durch Kontaktierung

Diese Methode der Nachheizung ist die effektivste, da die mögliche Wärmeübertragung nur durch die Kontaktgüte und der inneren Wärmeleitfähigkeit der beteiligten Werkstoffe begrenzt ist.

#### **Vorteile:**

Wie zuvor unter „partielles Heizen durch Strahler“ beschrieben.

Des Weiteren: Noch kürzere Aufheizzeiten erreichbar ohne höhere Temperaturdifferenzen, was sich positiv auf die Lebensdauer der Beheizungseinrichtung auswirkt.

## Nachteile:

Das Prinzip „berührungsloser Transport mittels Hängebahn“ wird verlassen. Durch das vollflächige Kontaktieren kann es bei beschichteten Flächen zu unerwünschten Reaktionen kommen.

### 3.4 Entwurf einer Heizplatte:

Ausgehend von obigen Überlegungen wurde als erster Entwurf eine Heizplatte konstruiert:

Heizfläche = 0,5 m x 0,2 m = 0,1 m<sup>2</sup> (Breite x Höhe)

Heizleistung je Seite ca. 9 kW

Die Temperatur des Strahlers soll auf 1.250 °C eingeregelt werden, was eine Übertragungsleistung von  $177 \frac{kW}{m^2}$  ermöglicht (eine Heizfläche). Mit

$$P = 2 \cdot 177 \frac{kW}{m^2} \cdot 0,08 m^2 = 28 kW$$

liegt die Leistung noch immer weit über dem erforderlichen Wert von 13,4 kW, bei geringerer Belastung der Heizelemente und damit deutlich höherer Lebensdauer.

Ein Strahler mit einer Betriebstemperatur von 1.250 °C ist mit metallischen Werkstoffen nur bedingt möglich, deutlich besser geeignet ist hier Siliziumkarbid als Material, bei dem die Betriebstemperatur bis zu 1.800 °C betragen darf, womit ausreichend Reserven nach oben gegeben sind.

Die Abmessungen ergeben sich unter anderem dadurch, dass möglichst Standardelemente verwendet werden sollen, z.B. ein Heizelement Typ LL 1295 x 508 x 38,1 der Fa. Berghütten:

- Gesamtlänge 1295 mm
- Heizlänge 508 mm
- Stabdurchmesser: D = 38,1 mm entspricht 12 cm<sup>2</sup>/cm
- spez. Heizleistung 4 W/cm<sup>2</sup>

- Gesamtleistung je Heizstab

$$P = 12 \frac{cm^2}{cm} \cdot 50,8 cm \cdot 4 \frac{W}{cm^2} = 2,45 kW$$

- Achsabstand der Elemente  $s \triangleq 2D$

Bei einer Bauhöhe von Lichte 300 mm können maximal  $300/40 \cdot 2 = 3,75 = 3$  Elemente verbaut werden. Das Heizmodul soll folgendermaßen aufgebaut werden (Maßstab 1:5):

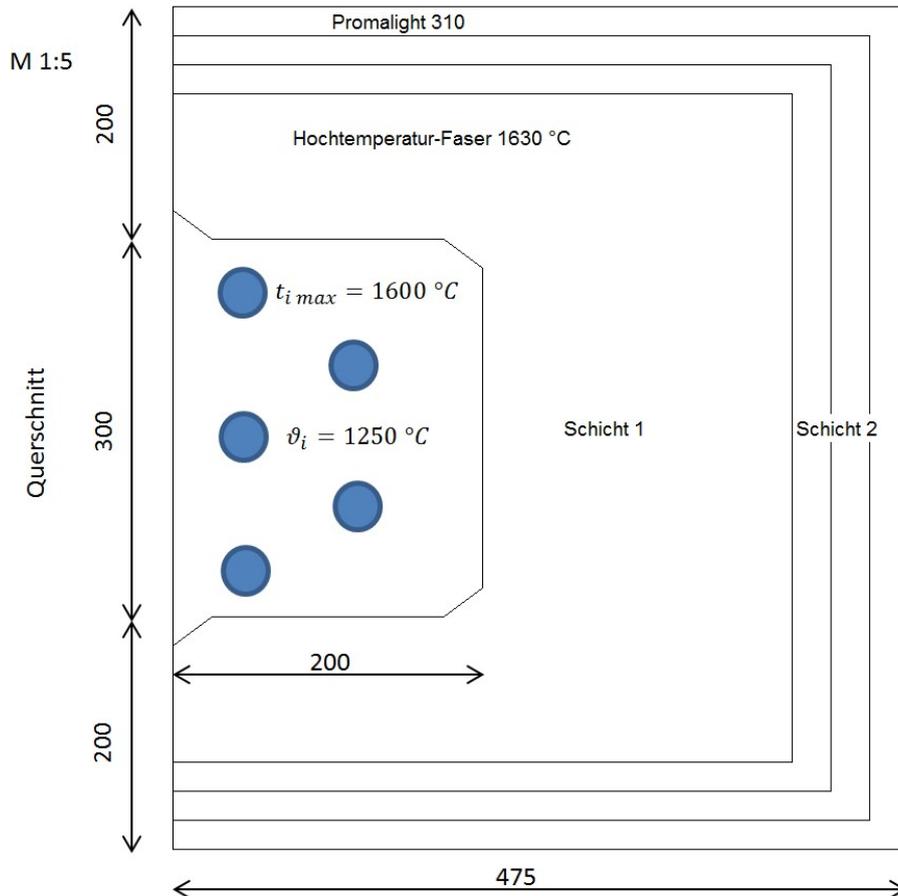


Abbildung 9 - Aufbau des Heizmoduls (eine Seite)

Die elektrische Ansteuerung soll folgendermaßen realisiert werden:

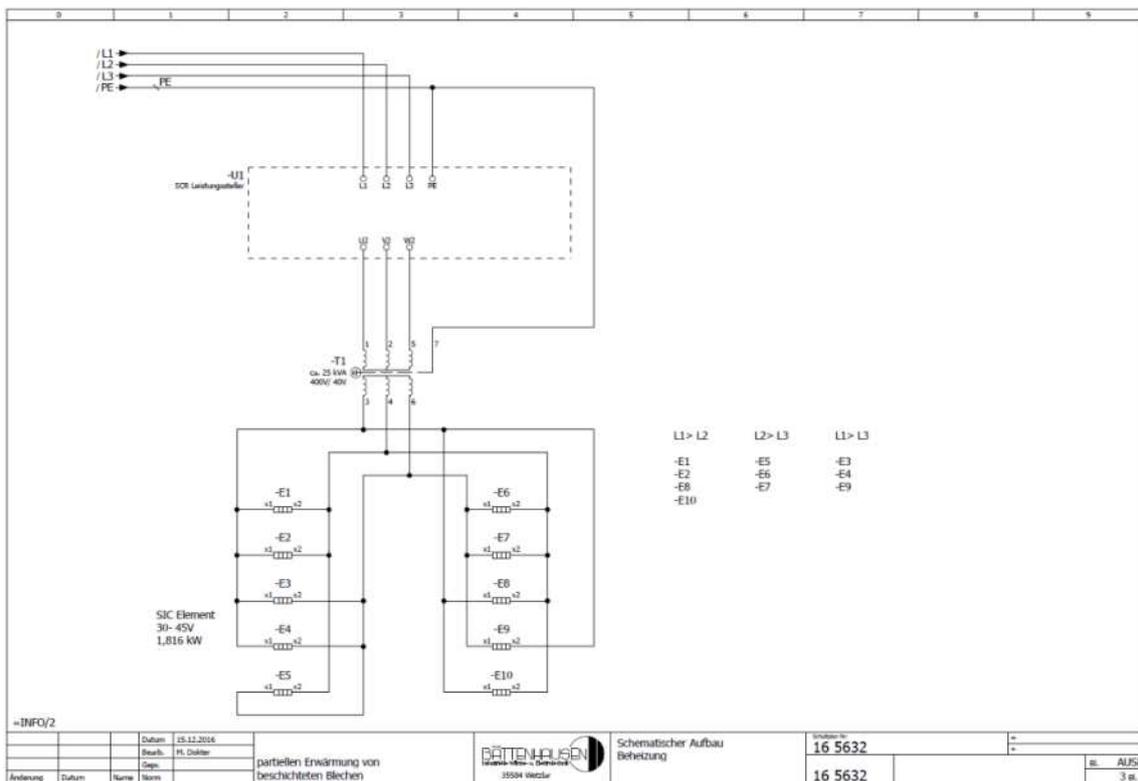


Abbildung 10 - Elektroplan der Ansteuerung der Heizmodule

Datenblatt der zu verwendenden Heizelemente:

Elementangaben			
1	Element Ø	:	25 mm
2	Element-Gesamtlänge	:	1143 mm
2a	Element-Gesamtlänge	:	<b>45,0</b> inch
3	AE-Länge / Stück	:	393,5 mm
3a	AE-Länge / Stück	:	<b>15,5</b> inch
4	Heizzonen-Länge	:	356 mm
4a	Heizzonen-Länge	:	<b>14,0</b> inch
5	Oberflächenbelastung	:	6,5 W/cm <sup>2</sup>
6	Heizzonen-Widerstand	:	0,701 Ω ± 10%
7	AE-Widerstand (gesamt)	:	0,077 Ω ± 10%
8	Gesamt-Widerstand (1071°C)	:	0,778 Ω ± 10%
9	Element-Leistung	:	1816 Watt
10	Elementgewicht (~)	:	0,7 kg

**Elektrische Angaben bei einer Oberflächenbelastung von 6,5 W/cm<sup>2</sup>**

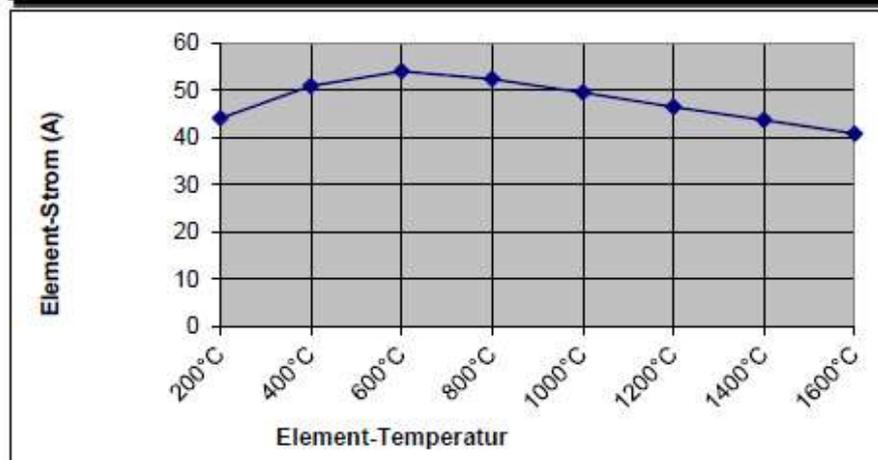
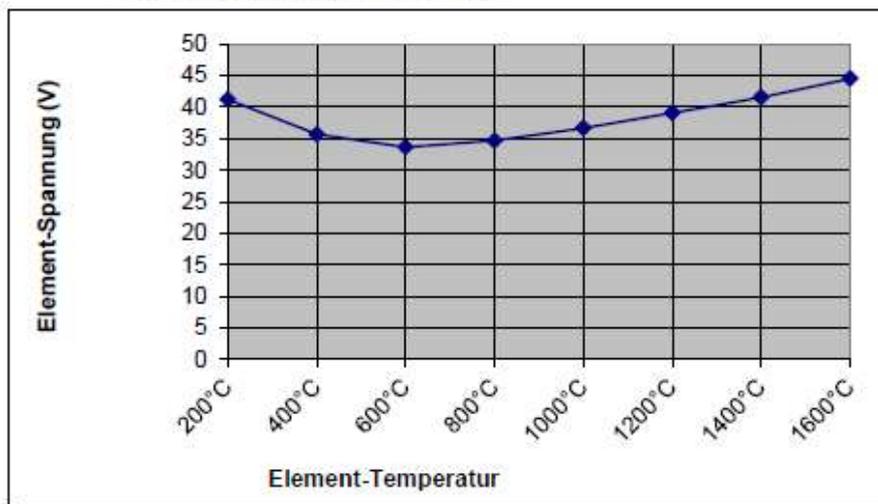


Abbildung 11 - Datenblatt der ausgewählten Heizstäbe [Berghütten]

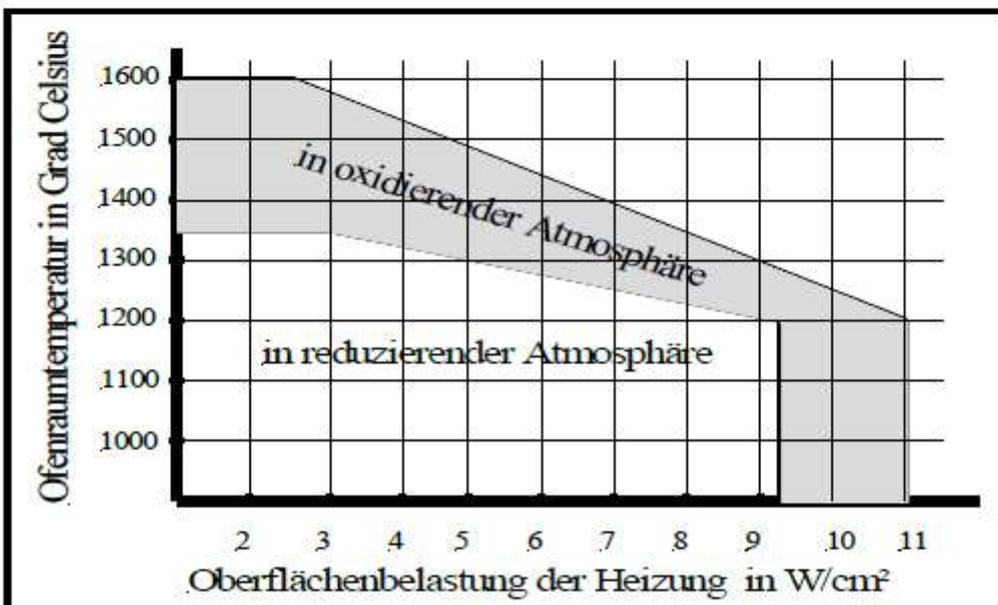
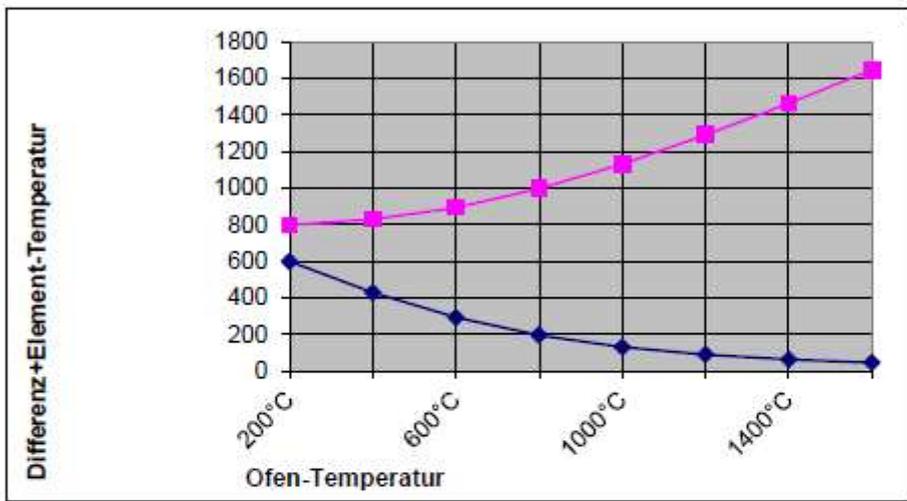
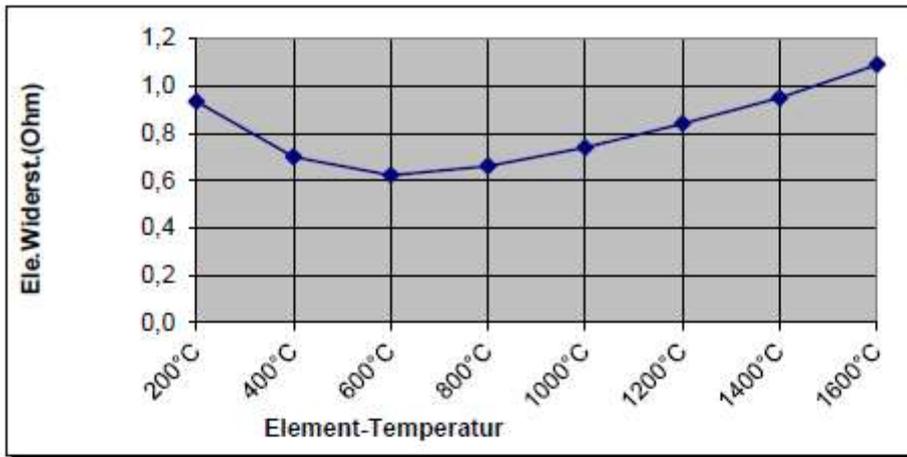


Abbildung 12 - Leistungsangaben der Heizelemente [Berghütten]

### 3.5 Simulation des Erwärmungsvorganges

Obige Betrachtungen sind lediglich Bilanzrechnungen, die zur Leistungsauslegung ausreichend sind, allerdings keine Aussagen über den zeitlichen Temperaturverlauf in der Platine liefern können. Möchte man diese betrachten, müssen Lösungen für die Wärmeleitungsgleichung gefunden. Im Falle der im Vergleich zu ihren Abmessungen sehr dünnen Platine ist es ausreichend, die Wärmeleitung im Inneren in lediglich 2 Richtungen zu betrachten, was die Berechnungen erheblich vereinfacht.

Der Wärmestrom verläuft immer von der wärmeren zur kälteren Stelle:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x}$$

An der Stelle  $x + dx$  beträgt der Wärmestrom:

$$\frac{\partial Q_{x+dx}}{\partial t} = \frac{Q_x}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial t \cdot \partial x} \cdot dx = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} - \lambda \cdot A \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}$$

Die Änderung des Wärmestroms beträgt:

$$d\left(\frac{\partial Q_x}{\partial t}\right) = \frac{\partial Q_{x+dx}}{\partial t} - \frac{Q_x}{\partial t} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \cdot dx$$

Aus einem wärmeren in ein kälteres Volumenelement fließt folglich der Wärmestrom

$$\delta\left(\frac{\partial Q_x}{\partial t}\right) = -\rho \cdot A \cdot dx \cdot c_p \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t}$$

Daraus ergibt sich für die zeitliche Temperaturänderung

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}$$

Der Faktor  $\frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$  wird als Temperaturleitfähigkeit  $a$  des Materials bezeichnet. Sie hat die Dimension  $\text{m}^2/\text{s}$ . Wie die Differentialgleichung zeigt, ist die Temperaturleitfähigkeit die einzige Stoffeigenschaft, die den zeitlichen Verlauf von Erwärmung/Abkühlung bestimmt.

Lösungen der Wärmeleitungsgleichungen in 2 bzw. 3 Dimensionen sind nur numerisch lösbar, was im Vorfeld der Versuche betrachtet werden soll. Zu diesem Zweck wurde die Versuchsplatine in Zellelemente aufgeteilt, von denen ein Teil unter dem simulierten Strahler positioniert ist, während ein anderer Teil frei steht. Die zu erwartenden erwärmungstechnischen Effekte sind in folgender Abbildung dargestellt:

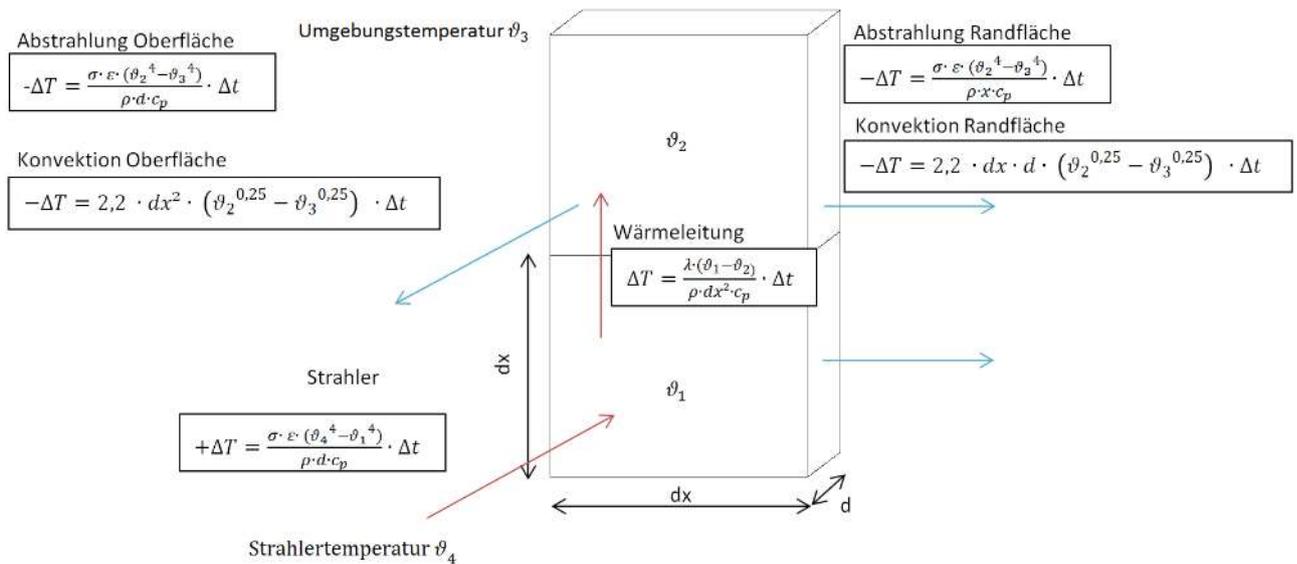


Abbildung 13 - Darstellung der stattfindenden Erwärmungsprozesse

Der Strahler bringt Wärmeenergie in das Element ein und erwärmt es. Infolge der Temperaturdifferenz wird Wärmeenergie im Inneren durch Wärmeleitung zu den benachbarten Zellen übertragen. Gleichzeitig gibt die Platine Wärmeenergie durch Strahlung der Außenflächen und durch Konvektion an die Umgebung ab. An den Randbereichen ist zusätzlich die Abstrahlung der Randflächen zu berücksichtigen. Damit das Simulationsverfahren stabil bleibt und plausible Werte liefert, muss die Bedingung

$$\frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} < \frac{1}{2}$$

erfüllt sein.

Gewählt wurden folgende Parameter für den Platinenwerkstoff 22MnB5:

Zeitschritt:	0,1 Sekunden
Dichte:	7,7 g/cm <sup>3</sup>
Blechdicke:	1 mm
Wärmeleitfähigkeit:	40 W/m·K
Wärmekapazität:	600 J/kg·K
Strahlertemperatur:	1.250 °C
Zellenlänge:	5 mm
Absorptionskoeffizient:	0,7
Umgebungstemperatur:	20 °C
Anfangstemperatur:	700 °C
Zellenelemente (B x H):	30 x 50

Um die Güte der Annahmen für die Simulation zu testen, wurde die Blechabkühlung mittig gemessen und mit den Werten der Simulation verglichen:

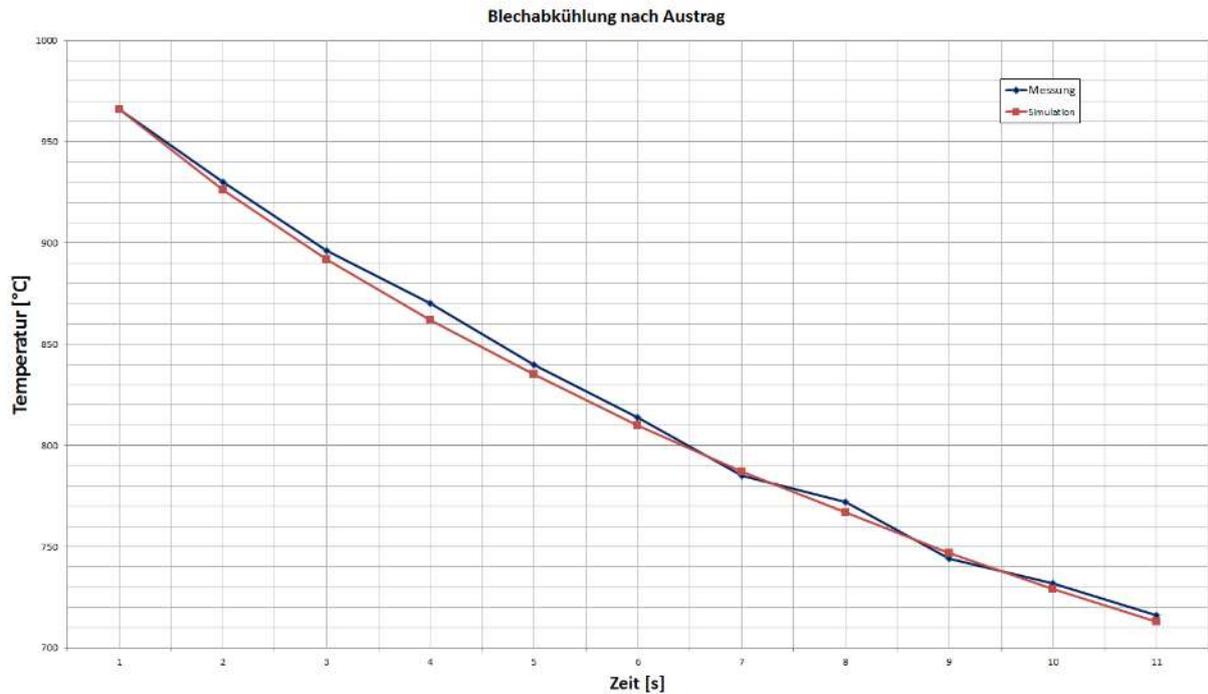


Abbildung 14 - Temperaturverlauf der Platinen an ruhender Luft

Wie zu sehen ist, decken sich die Ergebnisse der Simulation recht gut mit den tatsächlich beobachteten Abkühlverhältnissen. Eine Abkühlrate an stehender Luft bei 900 °C von ca. 25-30 K/s deckt sich auch mit anderen Versuchsergebnissen bei Platinen dieser Abmessungen. Für den Vorgang der partiellen Erwärmung wurde folgender Bereich der Testplatine betrachtet:

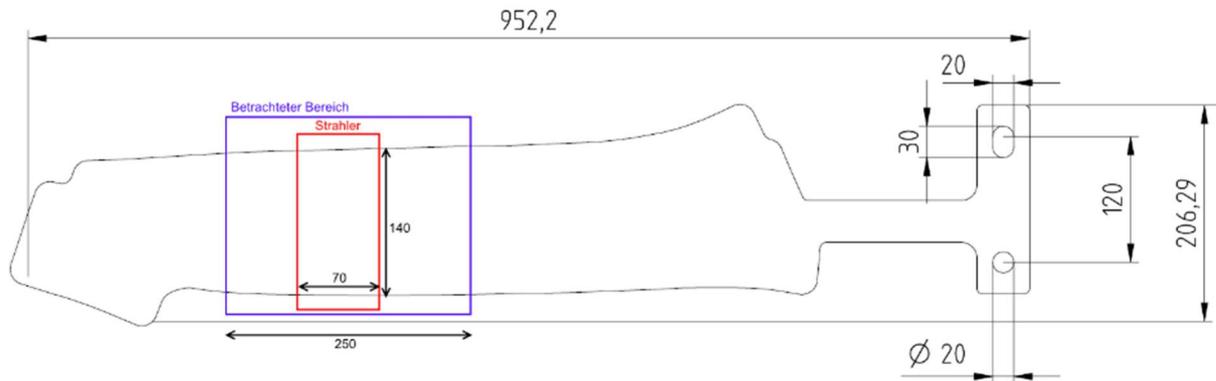


Abbildung 15 - Betrachteter Simulationsbereich der Platine

Die Aufteilung des Strahlerbereiches beträgt 30 x 14 Zellen (Breite x Höhe), wobei jede Zelle einem Bereich von 0,5 cm<sup>2</sup> entspricht.

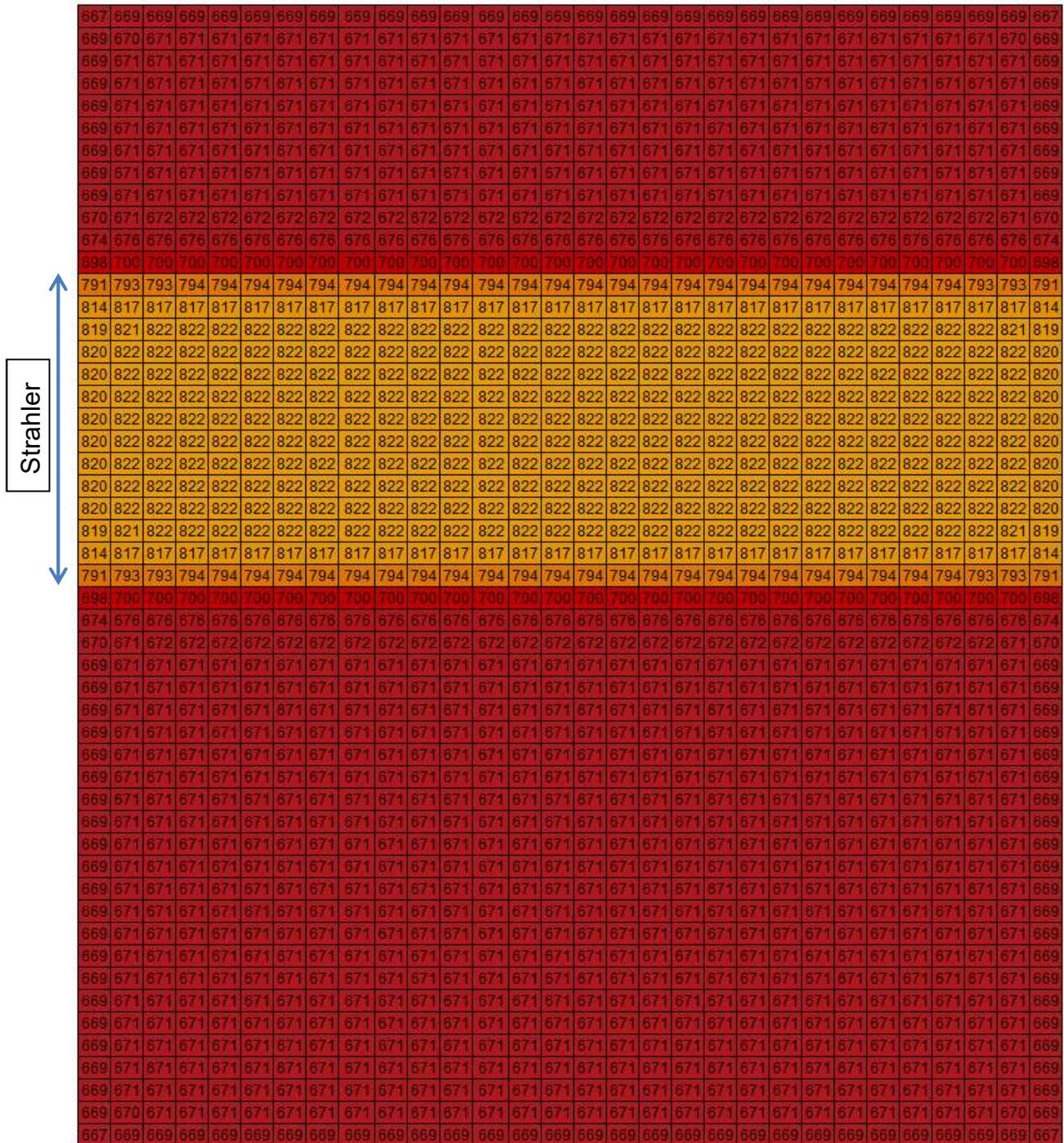
Der betrachtete Bereich wurde um den zu erwärmenden Streifen herum gelegt, mit einer Aufteilung von 30 x 50 Zellen (Breite x Höhe). Die Auflösung der Zeitschritte beträgt 0,1 Sekunden.







# Simulation für t = 2 Sekunden









## 4 Anpassung der bestehenden Anlage an die neue Fahrweise der Platinen durch das Erwärmungsmodul

### 4.1 Nachrüstung des Ofenaustrags durch einen Regler gesteuerten Frequenzumrichter

Um die Platinen zeitgenau zwischen Ofenaustrag und Presse durch das Erwärmungsmodul fahren zu können, musste die bestehende Anlage um einen programmierbaren Frequenzumrichter erweitert werden, der mehrere Positionssätze mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen verarbeiten kann. Ausgewählt wurde ein Umrichter, Antrieb und Getriebe der Firma SEW mit dazu passendem Antrieb, welcher sowohl die neuen Versuchsparameter, als auch die vorherige Fahrweise abarbeiten kann. Die Programmierung erfolgt über verschiedene Positionssätze, die per Bitmuster aus der Steuerung angesprochen werden können:

Satz	Modus						
0	Homing		Mode=35	V=10.00mm/s	A=100mm/s²		000
1	MoveAbs	P=5370.00mm		V=1000.00mm/s	A=2000mm/s²	D=2000mm/s²	J=1000000mm/s³
2	MoveAbs	P=7003.00mm		V=1800.00mm/s	A=500mm/s²	D=500mm/s²	J=1000000mm/s³
3	MoveAbs	P=1785.00mm		V=3600.00mm/s	A=2000mm/s²	D=400mm/s²	J=1000000mm/s³
4	MoveAbs	P=480.00mm		V=300.00mm/s	A=500mm/s²	D=200mm/s²	J=1000000mm/s³
5	MoveAbs	P=0.00mm		V=200.00mm/s	A=500mm/s²	D=500mm/s²	J=1000000mm/s³

Abbildung 16 - Konfiguration der Fahrweise des Frequenzumrichters

Einstellbar sind jeweils die Absolutposition am Austrag, die Beschleunigungen (Anfahren und Abbremsen), die gewünschte Endgeschwindigkeit und der Ruck. Der zeitliche Ablauf, wann welcher Satz angesprochen wird, erfolgt aus der Ofensteuerung. Die modifizierte Fahrweise ist folgendermaßen geplant (Schritte vereinfacht dargestellt):

- Austragsgreifer fährt vor und klinkt in Transportwagen im Ofen ein
- Austragstür öffnet sich
- (neu) Austrag fährt schnellstmöglich zum Erwärmungsmodul
- Austragstür schließt sich
- (neu) Austrag fährt die Platine eine definierte Zeit durch das Modul
- Austrag fährt schnellstmöglich in die Presse
- Pressen der Platine
- Austrag fährt gepresste Platine zum Abgabeplatz

Die benötigte Verweilzeit im Modul ist abhängig von Ofentemperatur, Strahlerleistung, Platinendicke und der Abkühlung auf dem Weg zum Modul und wird bei den kommenden Versuchen jeweils angepasst werden müssen.

Mit dieser Fahrweise mit konstanter Geschwindigkeit im Modul sind nur horizontale „Streifen“ der Platine partiell erwärmbar. Für die gezielte Erwärmung verschiedener Bereiche auf der Platine mittels Schablonen ist allerdings auch eine Fahrweise möglich, bei der die Platine im Modul eine definierte Zeit stehen bleibt.

## 4.2 Anpassung der Ofensteuerung

Der Ablauf der Ofensteuerung wurde folgendermaßen realisiert:

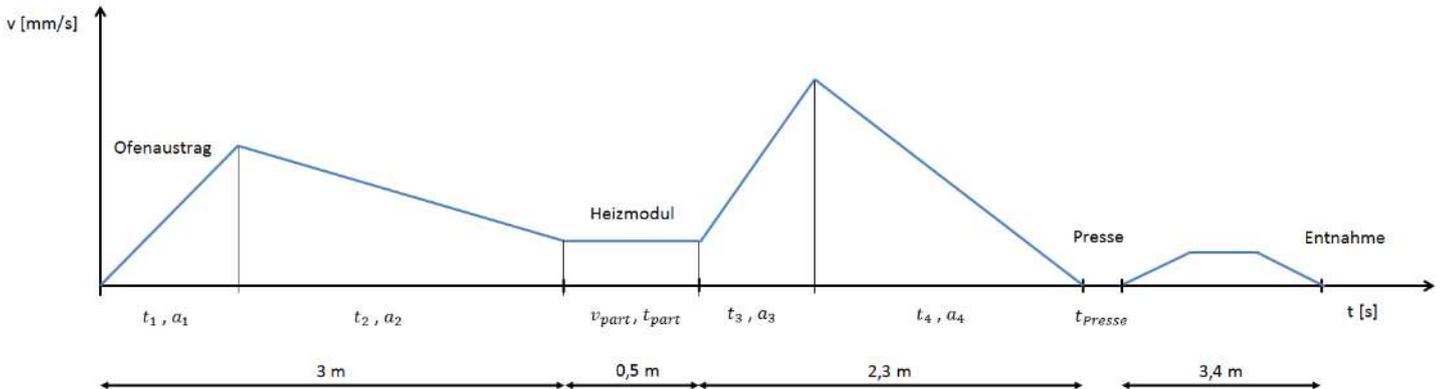


Abbildung 17 - Fahrweise der Platinen nach Ofenaustrag

In Fahrversuchen wurde die maximal mögliche Beschleunigung der Platine mit

$$a_1 = 3.600 \text{ mm/s}^2$$

bestimmt. Beim Abbremsen sollte nicht mehr als

$$a_2 = -800 \text{ mm/s}^2$$

gewählt werden, um ein Schwingen in Fahrtrichtung und vor allem seitlich und ein Aushängen der Platine aus der Wagenhalterung zu vermeiden.

In den vorherigen Simulationen wurde eine minimale Aufenthaltsdauer von 3,5 Sekunden bestimmt, um einen Bereich der Platine um 200 K zu erhöhen, was zu einer anzustrebenden Geschwindigkeit von ca.

$$v_{part} = 140 \text{ mm/s}$$

führt. Damit ergibt sich für die Fahrzeit vom Austrag zum Modul:

$$t_{Modul} = \sqrt{\frac{s \cdot a_1 + v_{part}}{(a_1 + a_2) \cdot a_1}} + \sqrt{\frac{s \cdot a_2 + v_{part}}{(a_1 + a_2) \cdot a_2}} \approx 2,1 \text{ s}$$

Während dieser Zeit kühlt eine Platine mit 1 mm Dicke laut vorherigen Versuchen um ca. 30 K ab, was bei der Einstellung der Ofentemperatur berücksichtigt werden muss. Diese ist so zu wählen, dass die Platine mit 700 °C am Modul eintrifft, damit die errechnete Aufenthaltsdauer im Modul zur Erwärmung auf 900 °C ausreicht. Alle Parameter und obige Formeln wurden veränderbar in der Steuerung programmiert und sind über die Visualisierung bedienbar.

Die Visualisierung selbst wurde weiterhin um die Möglichkeit erweitert, jeden Bewegungsschritt separat (manuell oder automatisch abfolgend) steuern zu können. Nachfolgendes Bild zeigt die Bedienoberfläche:

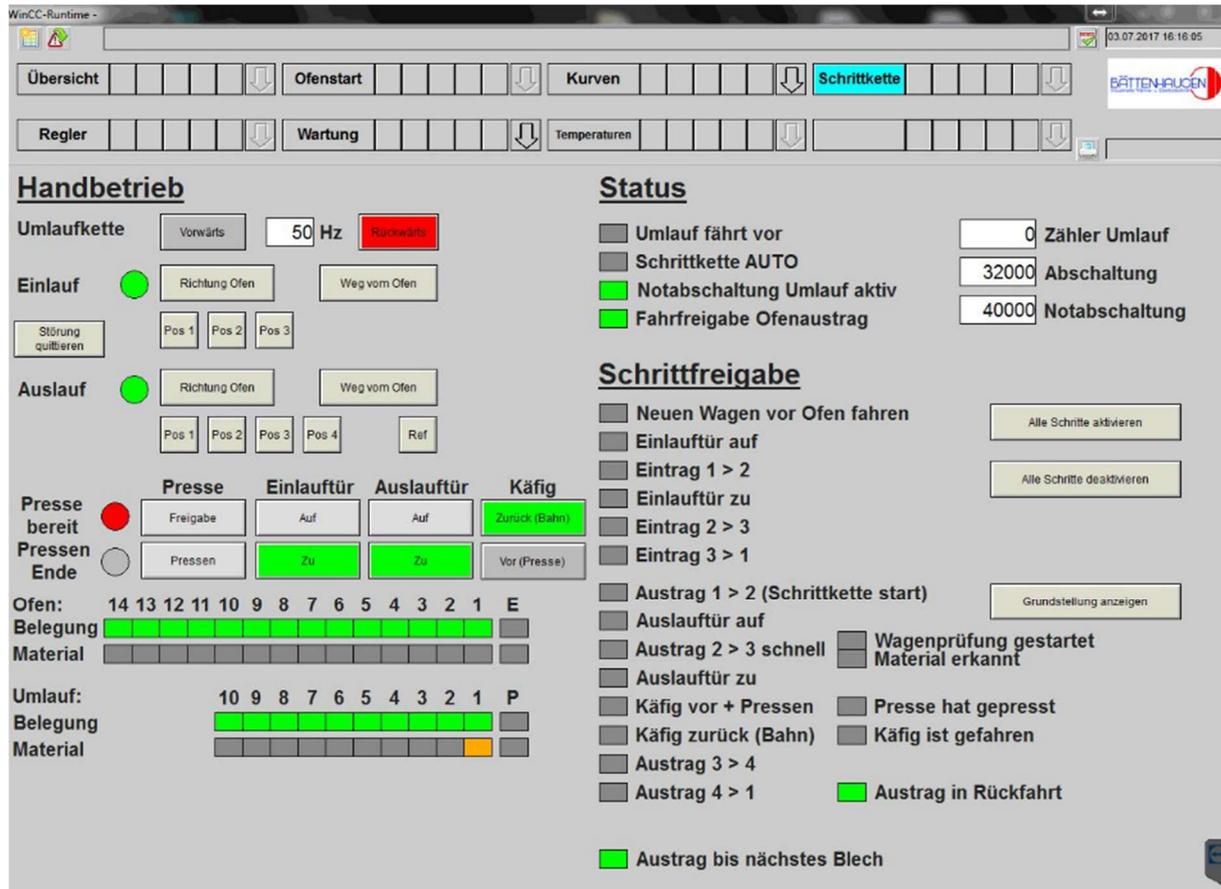


Abbildung 18 - Visualisierung zur Bedienung der manuellen Fahrweise

Auf diese Weise sind auch Einzelschritte bzw. eine komplett manuelle Fahrweise der Platinen realisierbar. Weiterhin wurde die Visualisierung um die neu hinzugekommenen Daten vom Modul (Temperatur, Bereitschaft, Leistungen, Störmeldungen etc.) erweitert.

#### 4.3 Nachrüstung von Lichtschranken zur Laufzeiterfassung und Schrittkettenprüfung

Zur Messung der absoluten Laufzeit und zur Umsetzung der geänderten Fahrweise der Anlage wurden in der Austragsstrecke Lichtschranken nachgerüstet. Neben der Möglichkeit zur Zeitmessung dienen diese weiterhin der Kontrolle des Ablaufes der Schrittkette, z. B. ob ein Wagen mit oder ohne Material gefahren wurde bzw. ob es zu einer Störung beim Erwärmen im Modul kam.

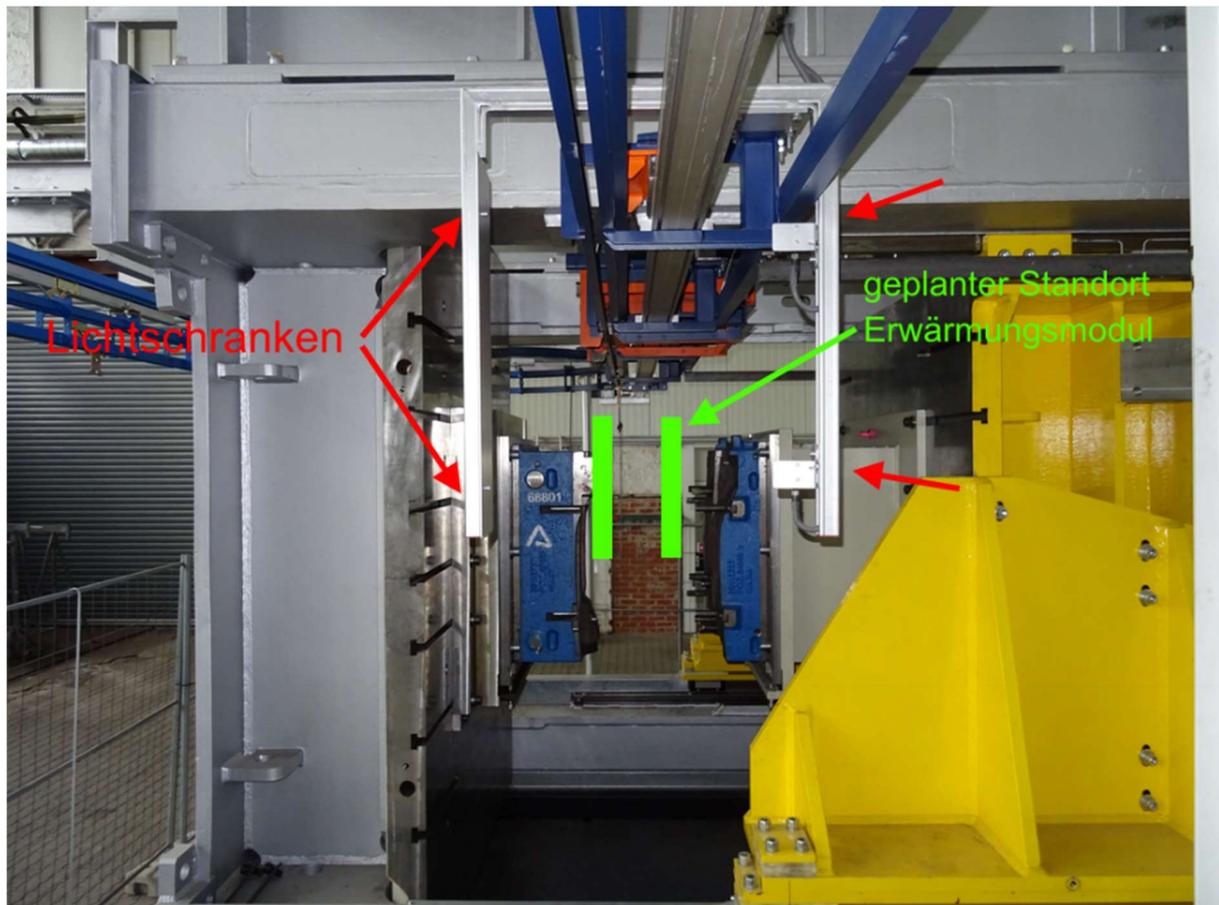


Abbildung 19 - Nachrüstung der Ofenausgangsstrecke mit Lichtschranken

## 5 Bau einer vollständigen Prototypenanlage

### 5.1 Konstruktion des Gehäuses in CAD, Zustellung Feuerfest

Das Gehäuse des Erwärmungsmoduls wurde aus den Skizzen in einem CAD-System konstruiert. Nach diesem Modell wurde das Gehäuse gefertigt:

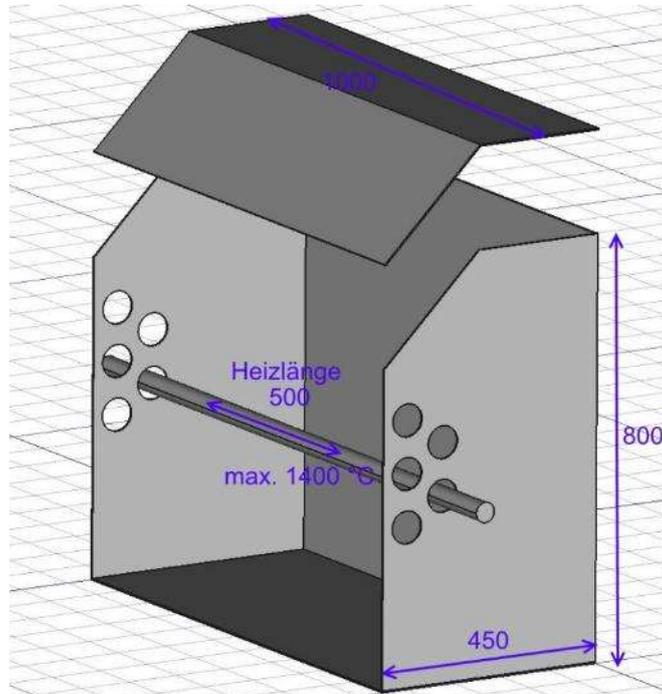


Abbildung 20 - Außengehäuse des Erwärmungsmoduls

Der erste Entwurf für die Auskleidung mit Feuerfest zur Isolierung sah 2 Lagen vor, wie in folgendem Bild schematisch angedeutet ist:



Abbildung 21 - Modul mit Feuerfestzustellung in mehreren Schichten

Die blaue, äußere Schicht besteht aus Plattenelementen, die für eine Temperatur von bis zu 1.000 °C ausgelegt sind. Sie dienen primär zur Stabilisierung der inneren Schicht, zudem sind sie preislich deutlich günstiger als Materialien für höhere Temperaturen. Die innere, grüne Schicht besteht aus Fasermatten, die für eine Temperatur von bis zu 1.430 °C zugelassen sind.

Die 2 Lagen wurden mit Hilfe von Wärmedurchgangsberechnungen weiter in verschiedene Materialien aufgeteilt, um maximale Stabilität und Funktion bei möglichst geringen Kosten zu gewährleisten. Gewählt wurden Materialien der Firma Promat:

	Innen	Aussen	Einheit	Kennwerte der Zustellung
Umgebungstemperatur	1400	20	°C	541.7 W/m <sup>2</sup> Wärmeverlust
Oberflächentemperatur	1396.4	69.0	°C	93.84 MJ/m <sup>2</sup> Speicherwärme
Wärmeübergangskoeffizient	150	11.06 <sup>(1)</sup>	W/m <sup>2</sup> K	98.55 kg/m <sup>2</sup> Gewicht
(1) Berechnungsart ASTM C680, issue 2004 Emissionsgrad =0.85 - Wind =0 m/s				263 mm Gesamt-Wandstärke

Wandschichten von innen nach außen	Material	Stärke mm	Dichte kg/m <sup>3</sup>	Klassif. °C	Temperatur		K mittel W/mK
					grenz °C	mittel °C	
1	PROMAFORM-1600	50	300	1450	1396.4	1353	0.3082
2	PROMAFORM-1600	50	300	1450	1308.5	1262	0.2854
3	PROMAFORM-1430	50	300	1300	1213.5	1164	0.2692
4	PROMAFORM-1430	50	300	1300	1112.8	1057	0.2371
5	ALSIFLEX-1260/100	10	100	1150	998.4	991	0.3535
6	PROMALIGHT®-1000X	25	280	1000	983.1	804	0.0361
7	PROMALIGHT®-1000X	25	280	1000	605	353	0.0253
8	Stahlgehäuse	3.0	7850	1200	69	69	70.17
					69	69	

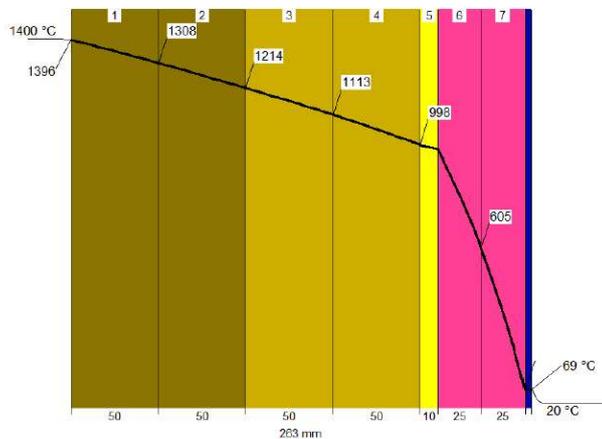


Abbildung 22 - Wärmedurchgangsberechnung der Erwärmungsmodule

Dargestellt ist der Temperaturverlauf einer Modulseite bei einer konstanten Innentemperatur von 1.400 °C. Die relativ hohe Außenwandtemperatur von 69 °C wurde gewählt, um eine Wasserkondensation im Inneren des Stahlgehäuses zu vermeiden.

Da bei der späteren Fahrweise die Temperatur nur beim Platinendurchgang auf 1.400 °C gefahren und zwischen den Erwärmversuchen auf geplante ca. 700 °C abgesenkt wird, wird sich die mittlere Temperatur im Inneren bei höchstens 1.000 °C einstellen. Aus diesem Grund wurden die sehr kostspieligen Promaform-1600 Schichten ebenfalls in Promaform-1430 zugestellt.

Der Zustellungsplan des Moduls ist in folgendem Bild ersichtlich:

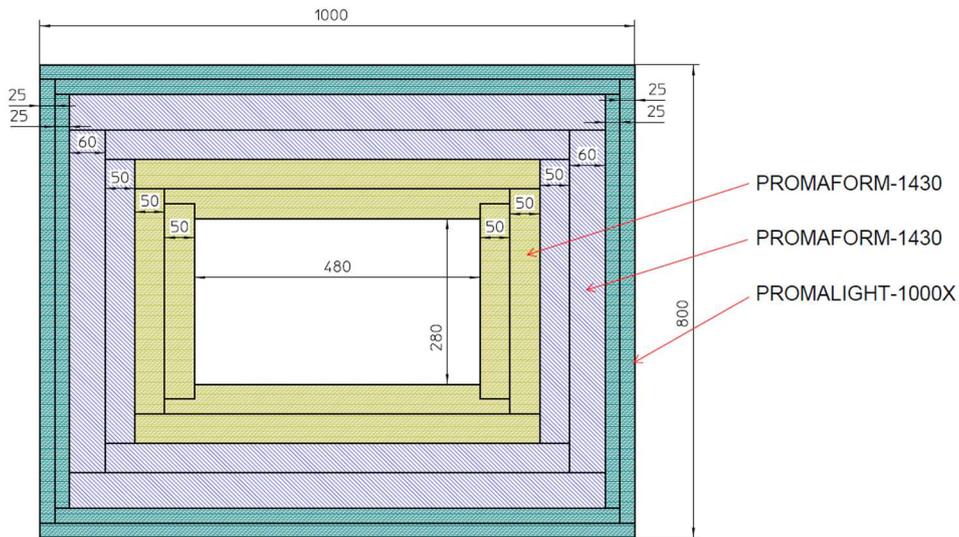


Abbildung 23 - Feuerfest Zustellungsplan der Module

Durch diese Art der Zustellung kann auf Anker und Klebstoffe verzichtet werden, was eine längere Haltbarkeit bedeutet und Wärmebrücken durch Metallverbindungen mit dem Außengehäuse verhindert. Die Abbildung 24 zeigt schematisch die geplante Aufstellung zwischen Ofenausstrag und Presse:

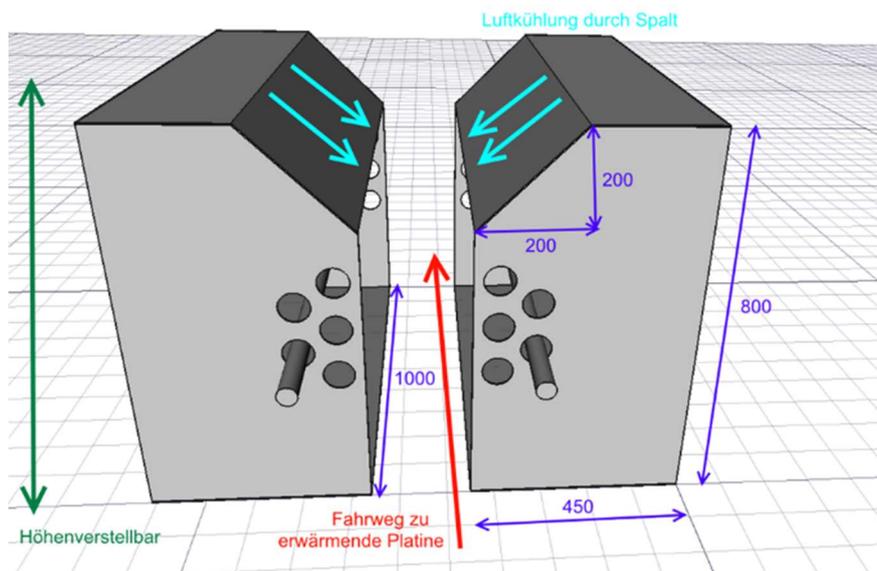


Abbildung 24 - Schematische Aufstellung der Module in der Ofenausstragsstrecke

Auf dem Deckel der Module sind Luftspalte geplant, die durch den Verbrennungs- bzw. Kühlluftventilator der Ofenanlage gespeist werden. Sie dienen einerseits der Kühlung des Gehäuses, weiterhin soll so die Übergangsbreite zwischen den Temperaturzonen durch die aufsteigende Wärme minimiert werden.

## 5.2 Auswahl der Beheizungselemente

Die im vorherigen Bericht ausgelegten Heizelemente wurden von der Firma Berghütten bestellt und in die Module verbaut. Gewählt wurden SiC-Elemente Typ RR 1.300 x 508 x 38 mit einer Leistung von 3.940 Watt / Element. Die abgegebene Heizleistung konzentriert sich auf die Mitte des Elementstabes, da dort der Widerstand am größten ist:

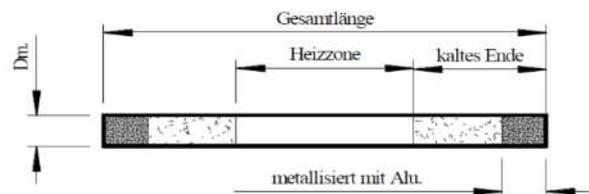


Abbildung 25 - Gewähltes Heizelement RR 1300 x 508 x 38 [Berghütten]

Folgendes Bild zeigt das Element mit Anschlusszubehör:



Abbildung 26 - Heizelement mit Anschlusszubehör

### 5.3 Aufbau des Schaltschranks zur Ansteuerung der Module

Der Schaltplan wurde nochmals an die möglichen lieferbaren Komponenten angepasst und um Geräte wie z. B. einem Poweranalyser UMG 96RM-EL zur Messung von Spannung, Strom und Leistung und Eingänge für Thermoelemente zur Temperaturmessung ergänzt. Die für die Beheizung relevanten Komponenten wie Leistungssteller, Transformator und Schnittstelle zur SPS (0-10 V Signal) sind in folgendem Bild dargestellt:

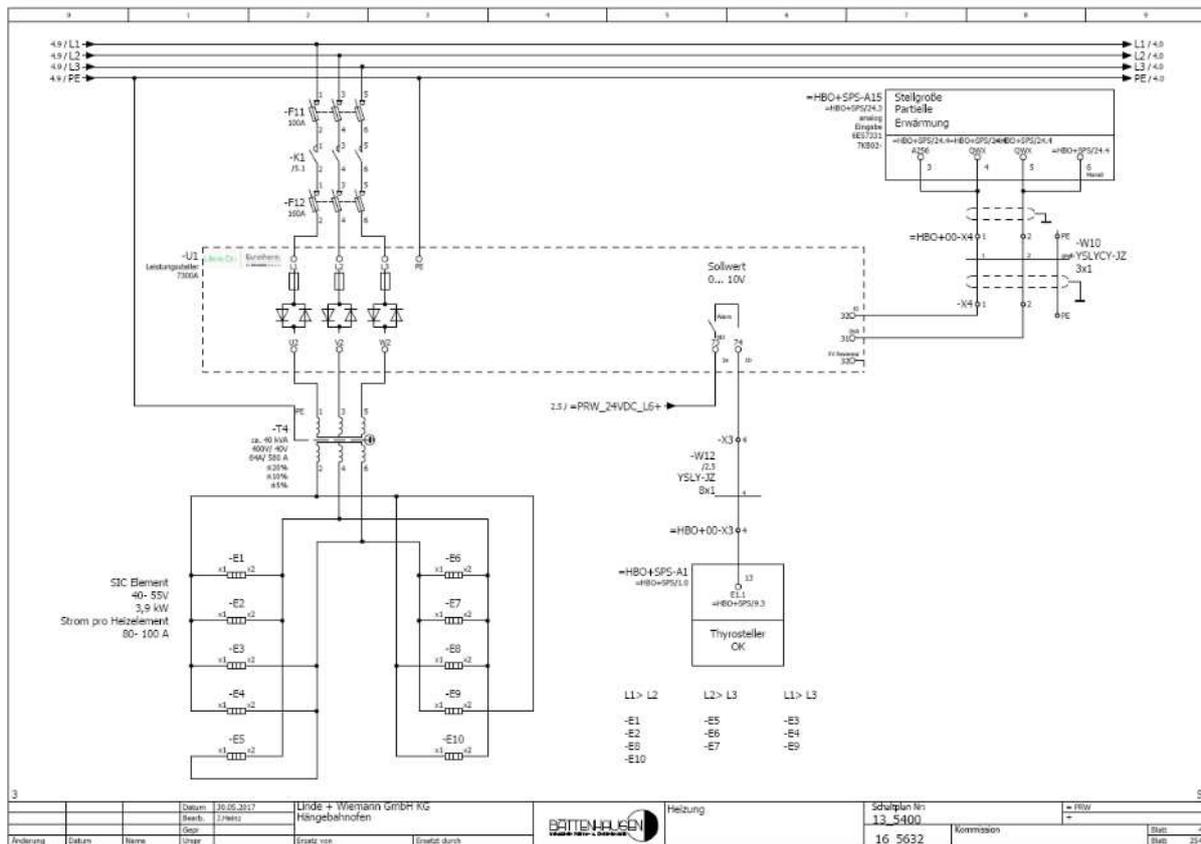


Abbildung 27 - Schaltplan zur Ansteuerung der Beheizung

Von den in der Summe 10 Heizelementen sind jeweils 3 zwischen den Phasen L2-L3 und L1-L3 parallel zusammengeschaltet, zwischen L1-L2 die verbleibenden 4. Der Schaltschrank selbst wird am Aufstellungsort möglichst nah am Heizmodul platziert, da durch die Zuleitungen Ströme von bis zu 100 A fließen werden. Die maximale Leitungslänge wurde auf 6 Meter festgelegt.

Folgendes Bild zeigt den fertig aufgebauten und elektrisch geprüften Schaltschrank:

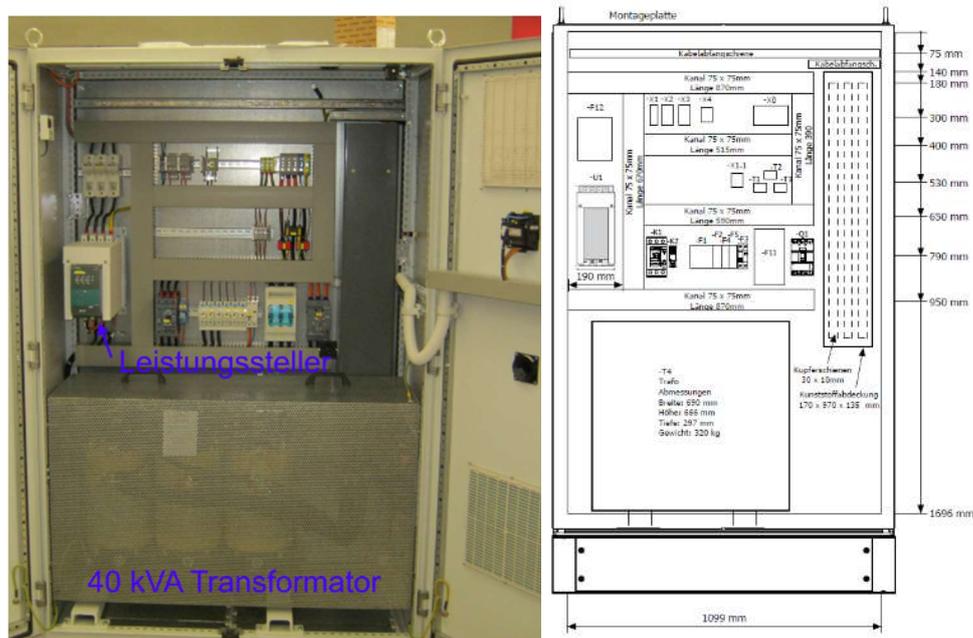


Abbildung 28 - Fertiggestellte Schaltanlage zum Betrieb der Heizmodule

#### 5.4 Aufbau und Labortests der Heizmodule

Die Module wurden betriebsbereit zusammengebaut und es wird nun mit den ersten Tests und Erwärmungsversuchen begonnen. Nach erfolgreichem Abschluss werden alle Komponenten am Standort des Hängbahnhofs integriert, um mit den Pressversuchen zu beginnen. Folgendes Bild zeigt eines der fertig zusammengebauten Module:



Abbildung 29 - Komplettbau eines Heizmoduls

## 6 Durchführung von Taupunktmessungen an der Ofenanlage

### 6.1 Versuchsaufbau

Eine neu hinzugekommene Anforderung der Automobilindustrie ist, dass während der Erwärmungsphase im Ofen ein definierter Taupunkt herrschen muss, um Wasserstoffversprödung am Platinenmaterial 22MnB5 zu vermeiden. Ist die absolute Feuchte im Ofen während des Aufheizvorgangs zu hoch, kann sich Wasserstoff an der Oberfläche im Metallgitter einlagern, was insbesondere nach dem Presshärten zur wasserstoffinduzierten Rissbildung führen kann. Als Richtwert gilt ein anzustrebender Taupunkt in der Anlage von  $-5\text{ °C}$ , was ca.  $3,4\text{ g/m}^3$  Feuchte entspricht.

Der Taupunkt kann durch Einleiten von getrockneten Gasen abgesenkt werden, wozu üblicherweise getrocknete Luft oder Stickstoff verwendet wird. In beiden Fällen wird der Taupunkt der Gase abgesenkt, indem es zunächst komprimiert und anschließend wieder entspannt wird (Luft 6-8 Bar, entspricht Taupunkt von ca.  $-8\text{ °C}$ ; Stickstoff bis zu 300 Bar, entspricht Taupunkt von ca.  $-63\text{ °C}$ ). Folgendes Bild zeigt den Versuchsaufbau. Durch Umschalten der Kugelhähne kann wahlweise getrocknete Luft oder Stickstoff in den Ofen eingebracht werden:



Abbildung 30 - Versuchsaufbau zur Taupunktregulierung der Ofenanlage

Die Taupunktmessung erfolgt mit dem Messgerät EE35 der Firma E+E Elektronik. Es ist für einen Messbereich von  $-60\text{ °C} \dots +60\text{ °C Td}$  bei  $\pm 2\text{ °C Td}$  ausgelegt und arbeitet mit einem kapazitiven Verfahren. Das Abziehen der Ofenatmosphäre wird realisiert, indem am Sensor mittels eines Injektors Unterdruck erzeugt wird (Prinzip Wasserstrahlpumpe), so dass die Atmosphäre nach einer Kühlwendel am Sensor vorbeiströmt:

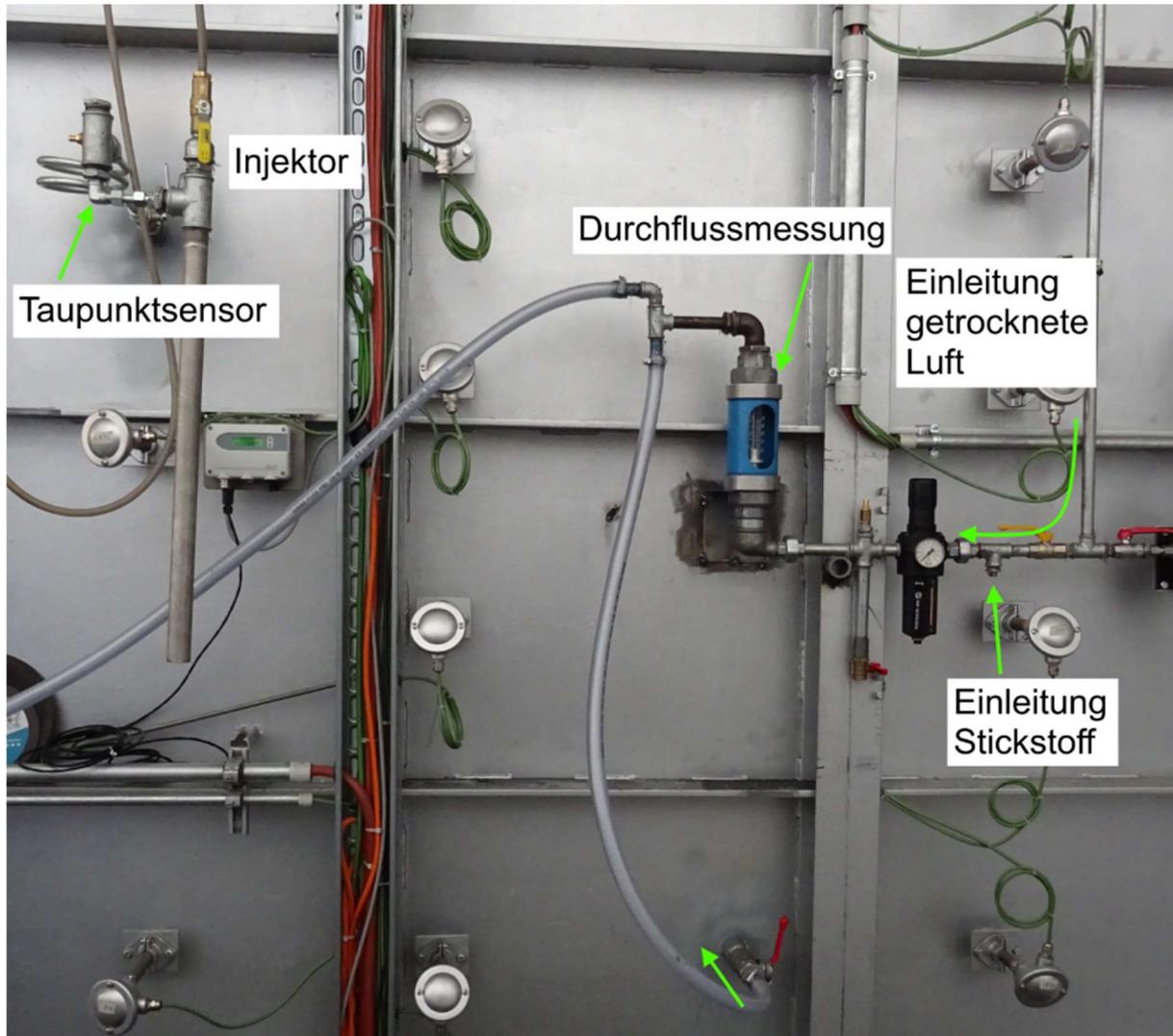


Abbildung 31 - Messaufbau Taupunktmessung

## 6.2 Versuchsergebnisse mit getrockneter Luft

Die Auswertung der Versuche zeigt, dass eine Absenkung des Taupunktes auf die geforderten  $-5\text{ °C}$  an der bestehenden Ofenanlage prinzipiell möglich ist. Die hierfür nötigen Luftmengen sind mit ca.  $200\text{ m}^3/\text{h}$  allerdings relativ hoch, so dass im weiteren Projektverlauf in Betracht gezogen wird, die gesamte Kühlung der Anlage direkt mit vorgetrockneter Luft durchzuführen.

Folgendes Bild zeigt den Verlauf des Taupunktes bei Einleitung von komprimierter Kompressorluft mit ca.  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  Taupunkt:

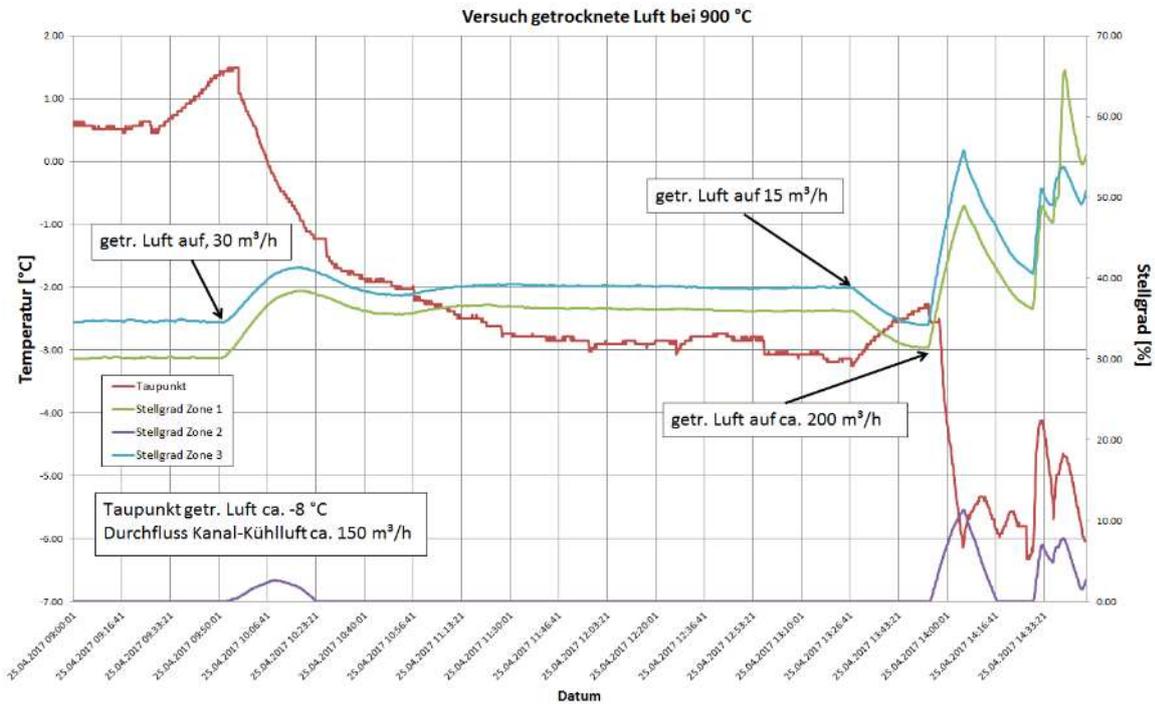


Abbildung 32 - Versuchsergebnisse mit getrockneter Luft

### 6.3 Versuchsergebnisse mit Stickstoff

Da für Stickstoffversuche nur auf ein Versuchs-Flaschenbündel mit maximal  $30\text{ m}^3/\text{h}$  bei 45 Minuten Durchsatz zurückgegriffen werden konnte, gelang lediglich eine Absenkung des Taupunktes um ca.  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

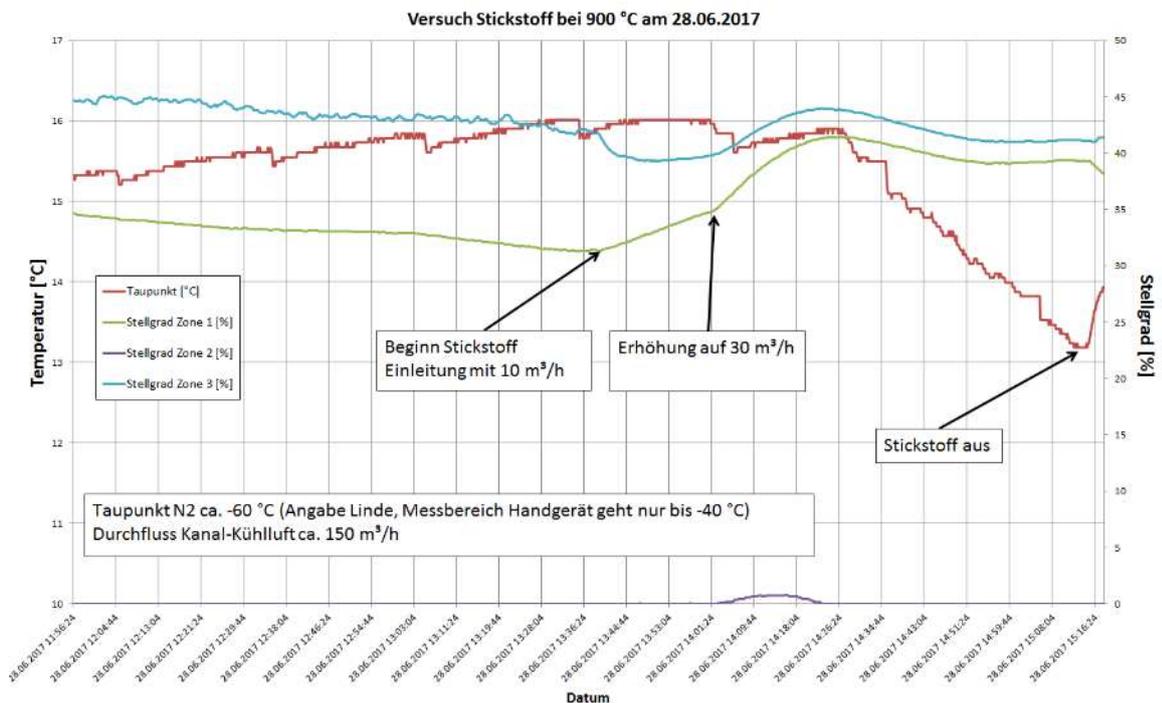


Abbildung 33 - Versuchsergebnisse mit Stickstoff

Der Verlauf lässt allerdings deutlich erkennen, dass sich in dieser Zeit noch kein stabiler Zustand einstellen konnte. Unter Miteinbeziehung der Ergebnisse mit getrockneter Luft ist zu erwarten, dass die Anforderungen bei einem höheren Durchsatz und längerer Laufzeit ebenfalls erfüllt werden können.

#### 6.4 Instrumentierung zur Auswertung der Versuche

Um die sich nach der partiellen Erwärmung einstellenden Temperaturen auswerten zu können, muss die Messung sehr schnell und idealerweise berührungslos erfolgen. Diese Aufgabe erfüllen am besten und kostengünstigsten Laserpyrometer in Kombination mit einer Kamera, um die Messpunkte später den Positionen auf der Platine zuordnen zu können. Gewählt wurde das Pyrometer CEM DT-9860S mit folgenden Spezifikationen [Optris]:

- 640 x 480 Pixel Kamera (30 Millionen Pixel)
- Fotoformat (JPEG) und Video (AVI) speichern
- 50:1 Optik
- Doppel – Laser – Messfleckmarkierung
- Max./Min./DIF/ Durchschnittswerte Rekord
- einstellbare Emission
- Messbereich: -50 bis 1000 °C / Genauigkeit:  $\pm 1$  % oder  $\pm 1$  °C
- Typ-K Temperatur Messung: -50 °C bis 1370 °C / Genauigkeit:  $\pm 0,5$  %
- Taupunkt-/Lufttemperatur: 0 bis 50 °C /  $\pm 0,5$  °C
- Messbereich Luftfeuchtigkeit: 0 bis 100 % RH /  $\pm 2,5$  % RH

Die zusätzliche Messung der Temperatur mittels eines Typ-K Thermoelements dient der Ermittlung des Emissionsgrades der Platinen, der für korrekte Messungen noch durch einen Messreihenabgleich benötigt wird. Durch Messung der relativen Feuchte in Kombination mit der Umgebungstemperatur kann der Taupunkt ermittelt werden, der auf der Strecke zum Modul vorherrscht.

## 7 Anschluss und Inbetriebnahme des Heizmoduls

### 7.1 Prüfung der Anlage

Die Schaltanlage wurde nach DIN EN 61439 auf Sicherheit und Funktion geprüft und erfolgreich abgenommen.

### 7.2 Versuche zu Auf- und Abheizgradienten

Das Heizmodul wurde auf die Zieltemperatur der Versuche von 1.300 °C aufgeheizt.

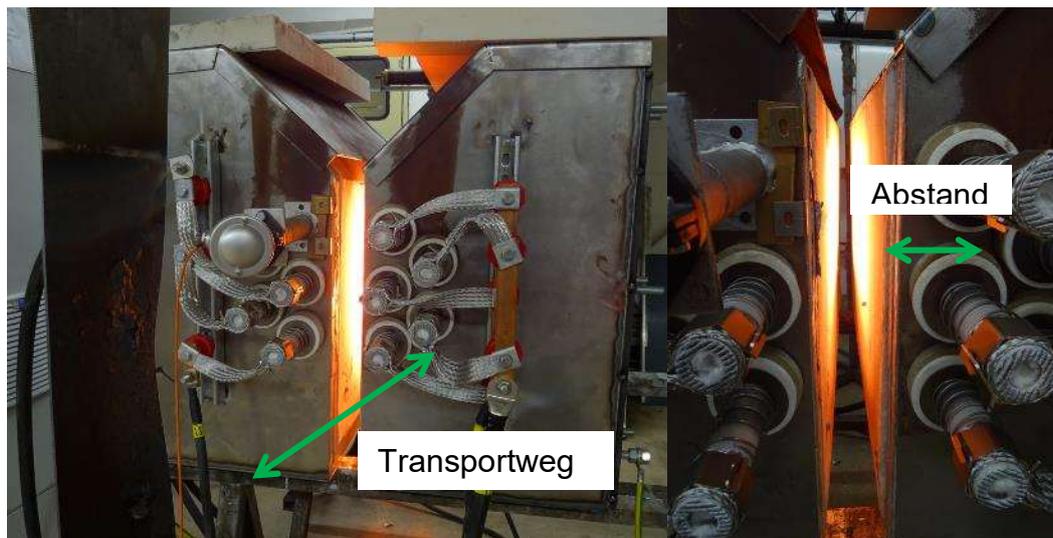


Abbildung 34 - Heizmodul bei Zieltemperatur von 1300 °C

Es wurden bei mehreren verschiedenen Abständen der Modulteile jeweils der Temperaturverlauf und die Phasenströme gemessen:

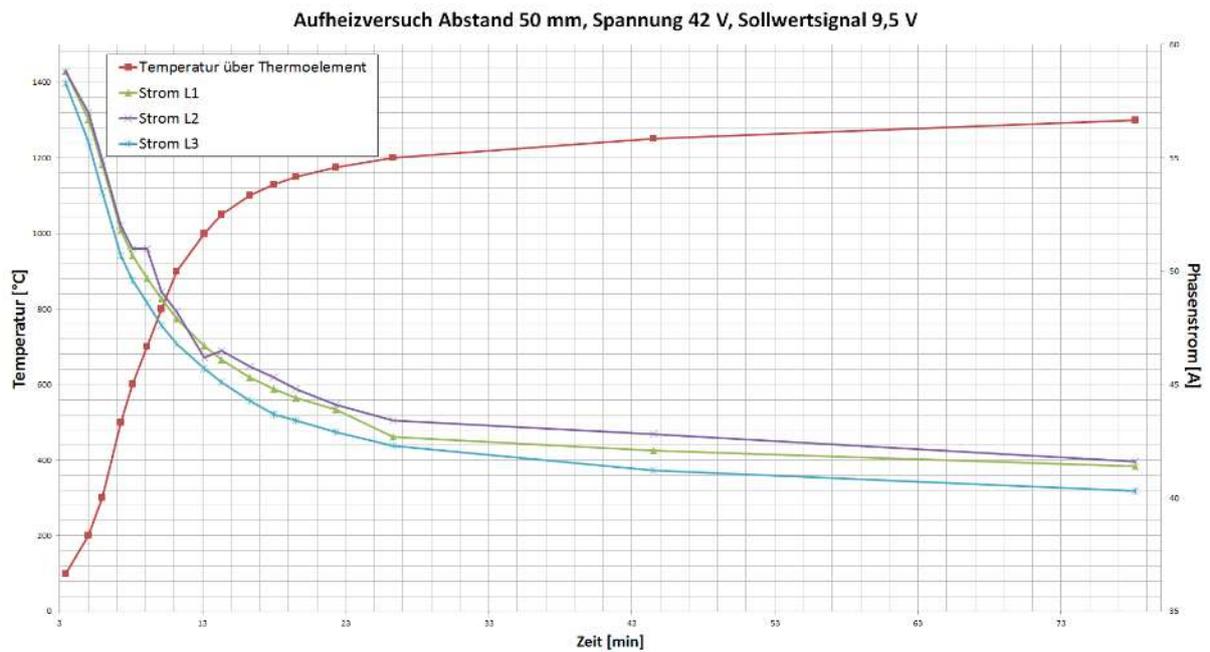


Abbildung 35 - Aufheizversuch bei Modulabstand 50 mm

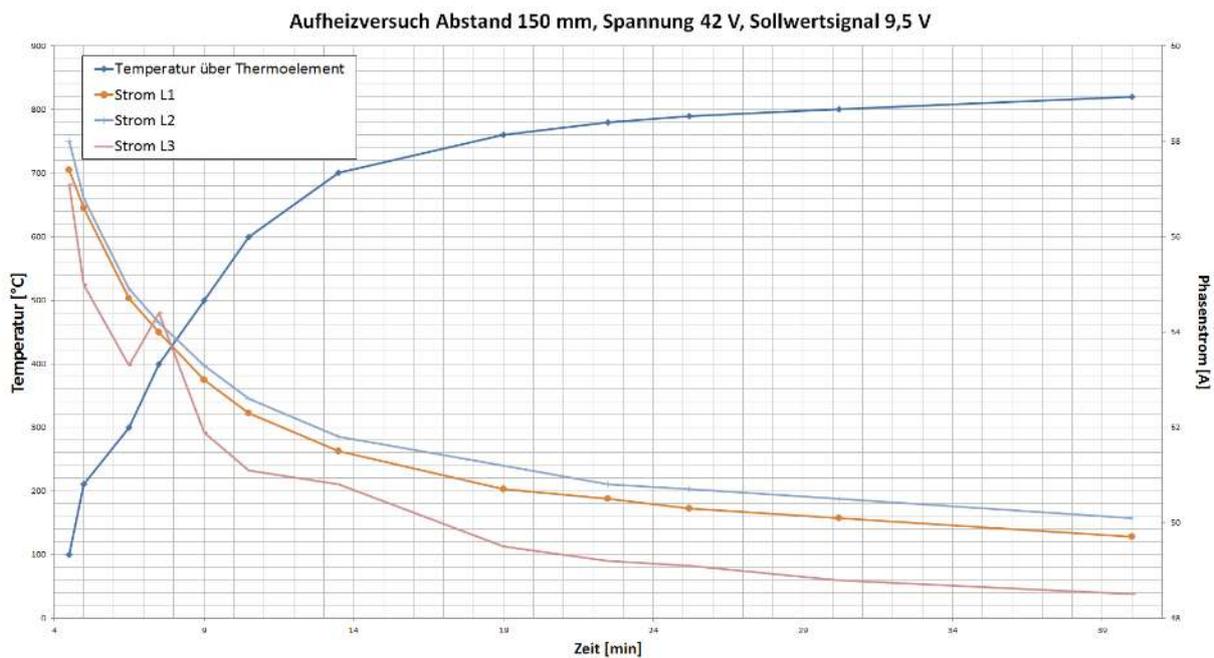


Abbildung 36 - Aufheizversuch bei Modulabstand 150 mm

Es hat sich gezeigt, dass ein Abstand von ca. 50 mm zwischen den beiden Teilen des Heizmodules nicht überschritten werden sollte, da bei größeren Abständen durch höhere Verluste die Leistung der Heizelemente nicht mehr ausreichend ist, um die Zieltemperatur von 1.300 °C erreichen zu können. Dieser Abstand ist allerdings mehr als ausreichend, die Platinen berührungslos durch das Heizmodul fahren zu können.

Da die benötigten Zeiten bis Erreichen der Zieltemperatur sehr lang sind, wurde die geplante Absenkung der Leistung zwischen zwei Erwärmprozessen verworfen, da der Effekt bei Intervallen von 10 - 20 Sekunden vernachlässigbar wäre im Vergleich zur Mehrbelastung der Materialien. Stattdessen wird ein „Warmhaltebetrieb“ bei 700 °C vorgesehen, der nur bei Produktionspausen bei z.B. Wartungsarbeiten zum Einsatz kommt.

### 7.3 Installation und Parametrierung der Messinstrumentierung

Zusätzlich zu den installierten Thermoelementen und dem Laserpyrometer (technische Daten siehe vorheriger Bericht) kam für die Versuchsauswertungen eine Wärmebildkamera der Firma Optris (Modell PI 160) [Optris] zum Einsatz:

Einsatzbereich: -20 °C bis 900 °C

Auflösung: 640 x 480 Pixel, Detektor 160 x 120 Pixel @ 128 Hz

Genauigkeit:  $\pm 2$  K

Mit Hilfe der Auswertesoftware wurden 11 Bereiche zu je 50 mm festgelegt, in denen die Temperaturen entlang der Versuchsplatine bestimmt wurden (Min-, Max- und Mittelwerte). Mit dieser Konfiguration können Videodateien aufgezeichnet werden, um Auf- und Abkühlraten zu ermitteln. Weiterhin kann anhand des vertikalen Trendverlaufs der Temperatur die Breite der Übergangszone ermittelt werden. Folgendes Bild zeigt eine Momentaufnahme einer Messung:

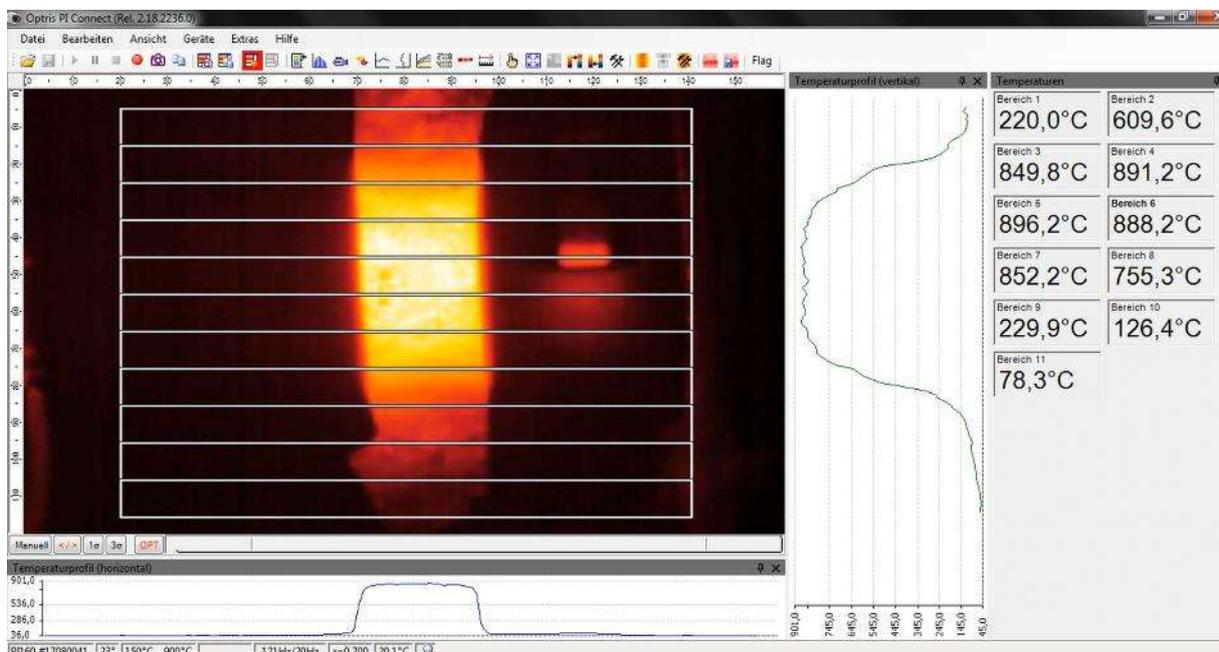


Abbildung 37 - Auswertesoftware der Wärmebildkamera

Folgende Abbildung zeigt den Versuchsaufbau:

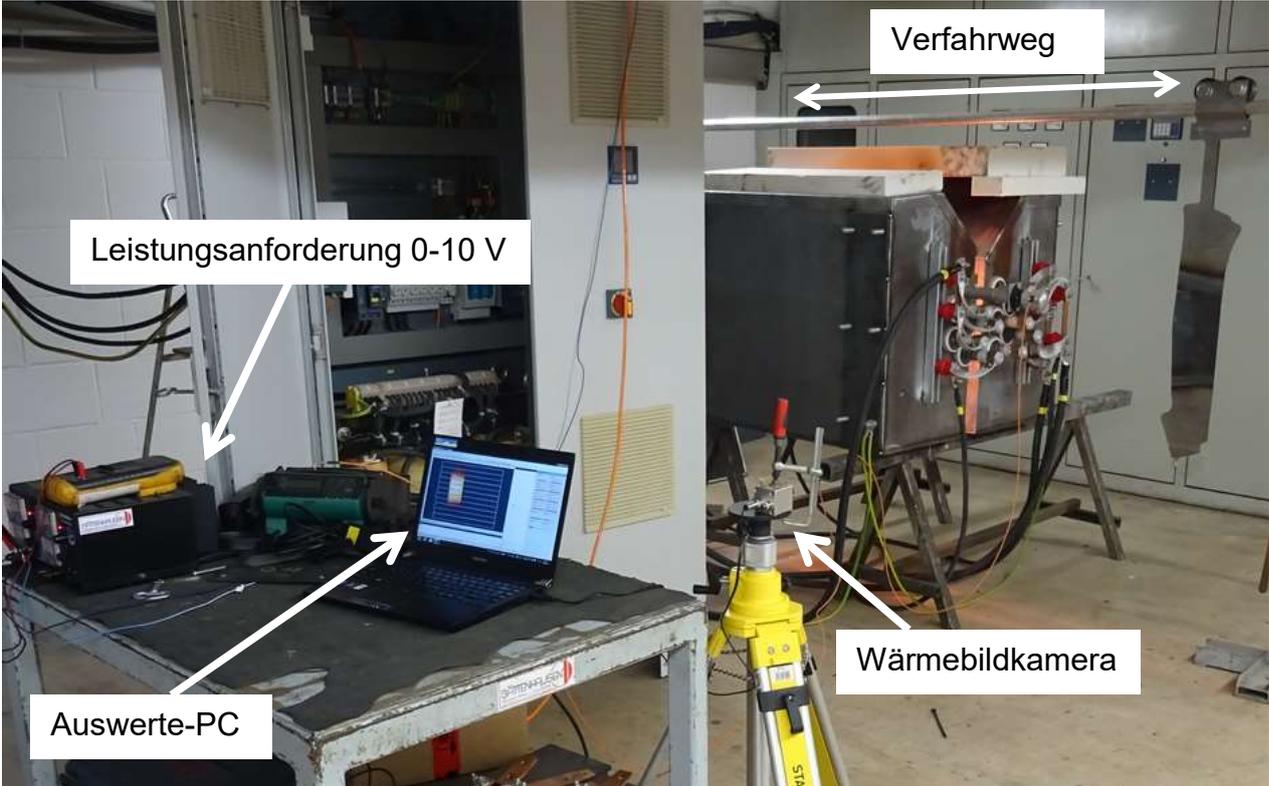


Abbildung 38 – Versuchsaufbau

## 8 Versuche

### 8.1 Auswahl der Materialien

Für die Versuche wurde eine Platine aus dem Material MBW1500 (22MnB5) von ThyssenKrupp Steel Europe (TKSE) [ThyssenKrupp] verwendet. Dieser Vergütungsstahl wird fast ausschließlich bei Presshärtevorgängen verwendet. Seine Austenitisierungstemperatur ( $A_{c3}$ ) liegt bei ca. 850 °C, in der Praxis werden abhängig von der Beschichtung Temperaturen zwischen 880 °C und 950 °C eingestellt. Bei diesen Temperaturen verbleibt das Material für mehrere Minuten im Ofen, um eine möglichst vollständige Austenitisierung gewährleisten zu können.

Die Zusammensetzung besteht aus folgenden Elementanteilen:

C (%)	Mn (%)	Cr (%)	B (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Al (%)	Ti (%)
0,22	1,2	0,15	0,002	0,025	0,008	0,2	0,01	0,003

Als Beschichtung gegen Zunderbildung wird eine Schicht aus Aluminium-Silizium (AS) aufgetragen. Diese bestimmt maßgeblich die maximale Verweildauer im Ofen, da sie nicht auf > 40 µm anwachsen sollte.

Ziel der partiellen Erwärmung der Platinen ist es, unterschiedliche Härten und Bruchdehnungen in derselben Platine zu erzielen, ohne unterschiedliche Materialien mechanisch zusammenfügen zu müssen (Tails-welded blanks). Dieses Verhalten lässt sich aus dem ZTU-Diagramm des jeweiligen Materials ablesen:

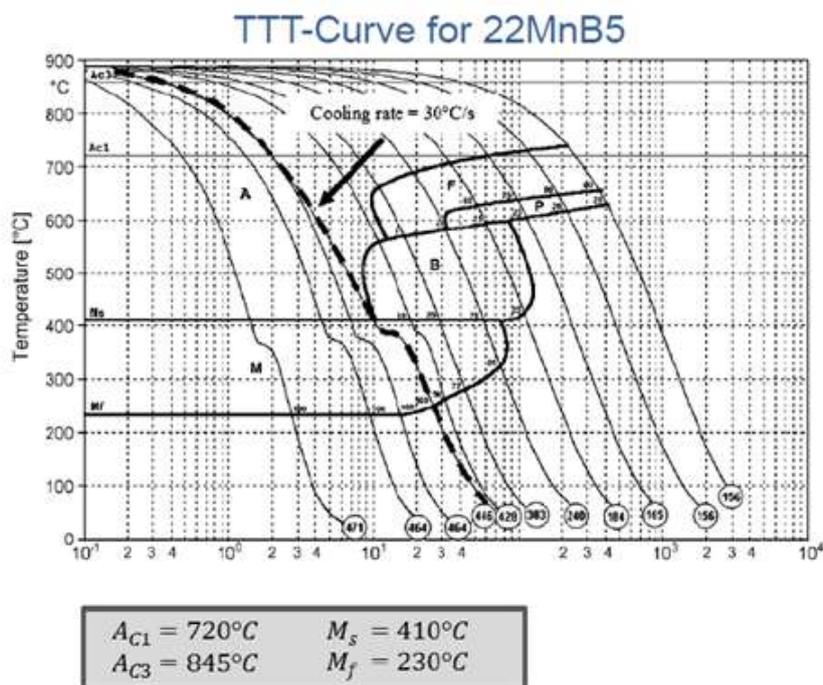
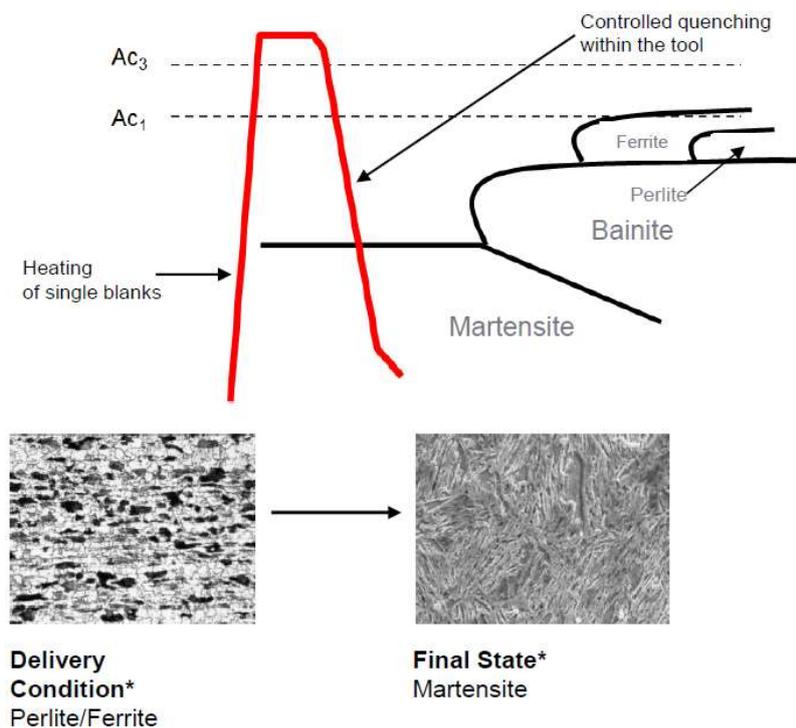


Abbildung 39 - ZTU-Diagramm für 22MnB5 [Vibrans]

Entscheidend für die Ausbildung der Kristallstruktur ist die Abkühlrate:

Bei  $> 30 \text{ K/s}$  erhält man ein Gemisch aus Ferrit und Perlit, dessen Zugfestigkeit ca.  $600 \text{ MPa}$  (Vickershärte 175) und dessen Bruchdehnung A80 ca.  $18 \%$  beträgt. Liegt die Abkühlrate unter  $30 \text{ K/s}$ , erhält man ein Martensit/Bainit-Gefüge, dessen Zugfestigkeit bis zu  $1.600 \text{ MPa}$  (Vickershärte 556) bei einer Bruchdehnung A80 von ca.  $5 \%$  betragen kann.

In der Praxis wird zur Martensitbildung in der Regel  $27 \text{ K/s}$  gewählt, um sicher vor dem Bereich der Bainit-Bildung zu bleiben:



\* Source: ArcelorMittal

Abbildung 40 - Temperaturverlauf zur Erzeugung einer Martensitstruktur [ArcelorMittal]

Da die schnelle Abkühlrate direkt im Presswerkzeug erfolgt (rot dargestellter Verlauf), muss der zu härtende Teil während dem Transport über der  $A_{c3}$  – Temperatur gehalten werden, während der weichere Part bereits mit langsamerer Rate an Luft abgekühlt ist. Bei schnellen Zyklen muss das Presswerkzeug hierfür unter Umständen zusätzlich gekühlt werden.

## 8.2 Aufheizversuche im Ofenraum

Versuchsplatten unterschiedlicher Dicken wurden im Ofenraum ( $950 \text{ °C}$ ) erwärmt, um die nötigen Verweilzeiten bis zum Erreichen der  $A_{c3}$  – Temperatur zu bestimmen. Da die Wärmebildkamera im Ofenraum nicht eingesetzt werden kann, wurden Schlepplemente an den Versuchsplatten befestigt und der Temperaturverlauf mit einem Datenlogger aufgezeichnet.

Folgende Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf für Platinen mit 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm und 2 mm Dicke:

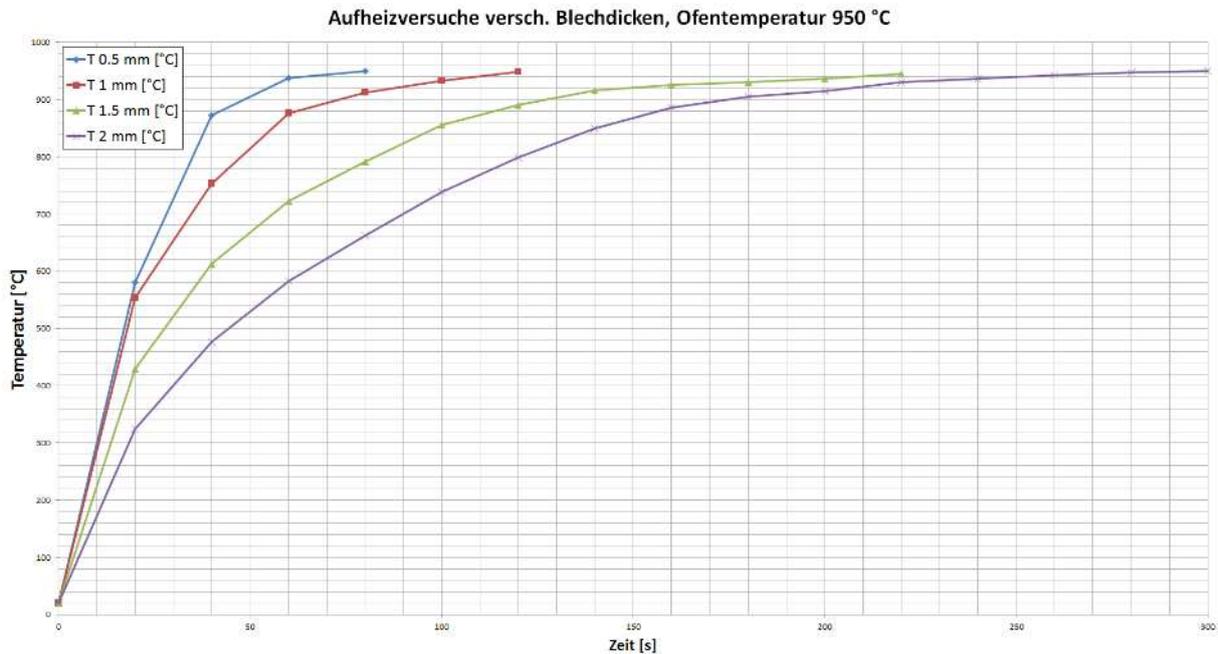


Abbildung 41 - Temperaturverlauf Aufheizen unterschiedlicher Blechdicken

### 8.3 Aufheizversuche mittels partieller Erwärmung durch Strahlung

Platinen unterschiedlicher Dicke wurden in das Heizmodul gefahren, welches auf 1.300 °C aufgeheizt war. Der Abstand zwischen den Modulen betrug 50 mm, also ca. 25 mm Abstand Platine -> Strahler zu jeder Seite. Die Temperatur der Platine wurde mit einem Thermoelement aufgezeichnet und mit der Simulation (siehe 1. Zwischenbericht) verglichen. Folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Messreihen:

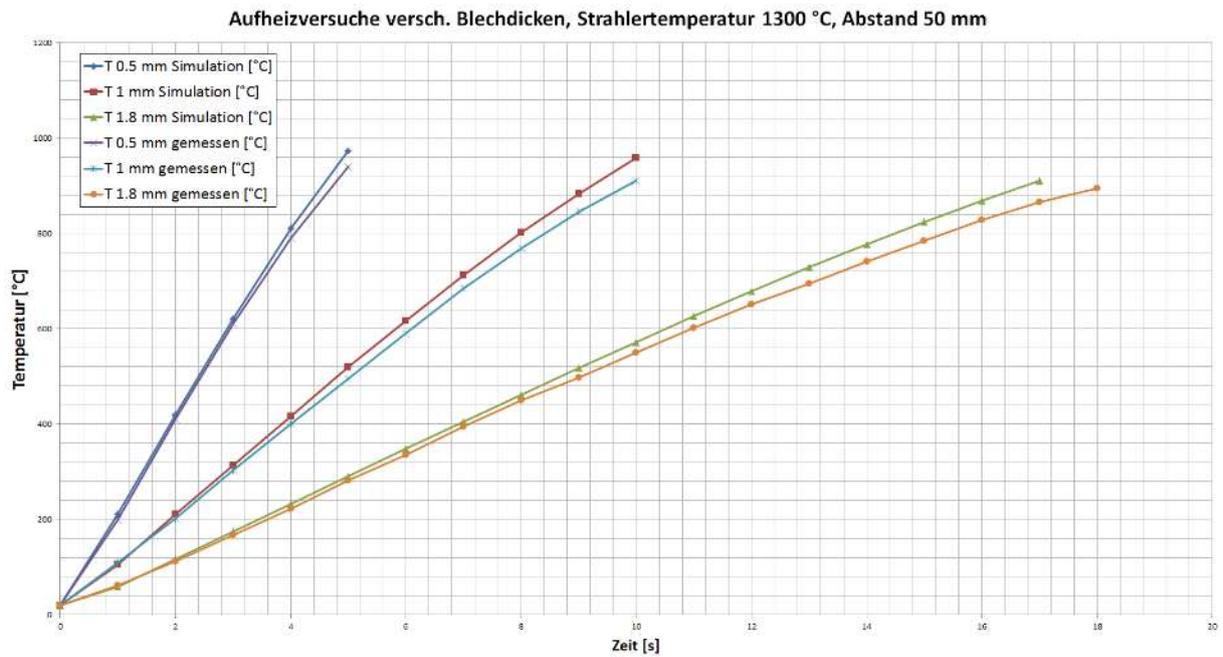


Abbildung 42 - Temperaturverlauf Aufheizen unterschiedlicher Blechdicken

#### 8.4 Abkühlung an Luft

Der Abkühlvorgang nach dem partiellen Erwärmen wurde mit der Wärmebildkamera auf die verschiedenen Bereiche hin untersucht. Nachfolgende Abbildung zeigt den Temperaturverlauf in den verschiedenen Bereichen, von denen jeder ca. 50 mm lang ist:

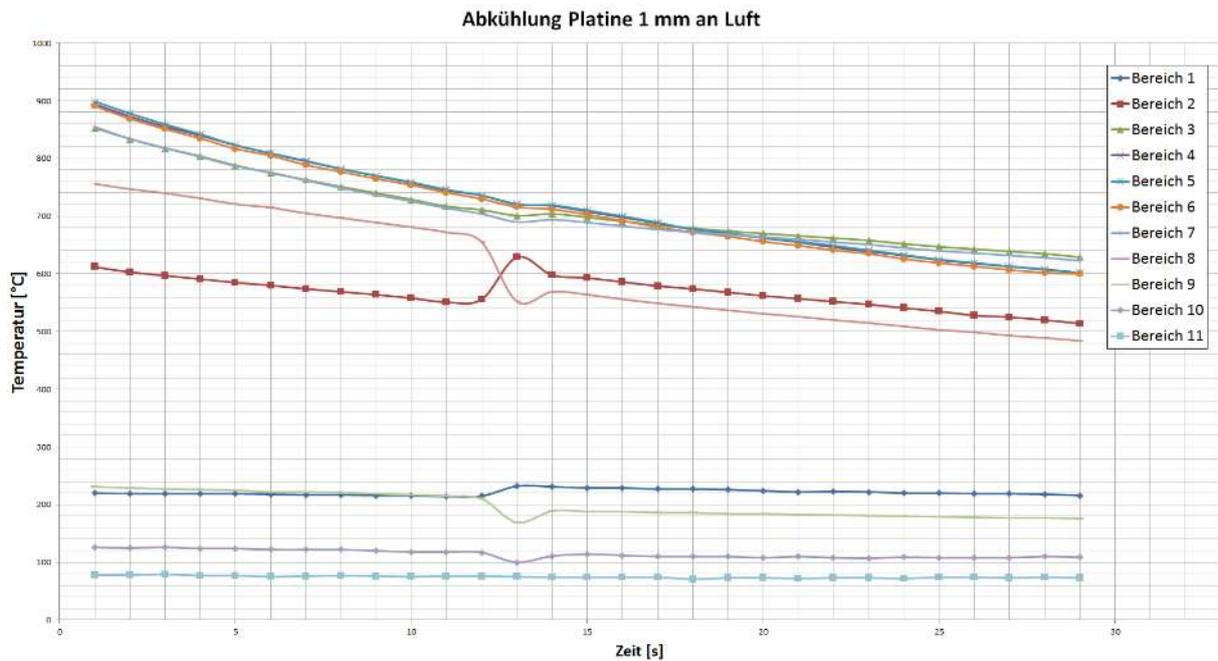


Abbildung 43 - Verlauf der Abkühlkurve der Bereiche 1 – 11

Folgende Abbildungen zeigen die Zuordnung des Temperaturprofils auf die entsprechenden Bereiche der Versuchsplatine:

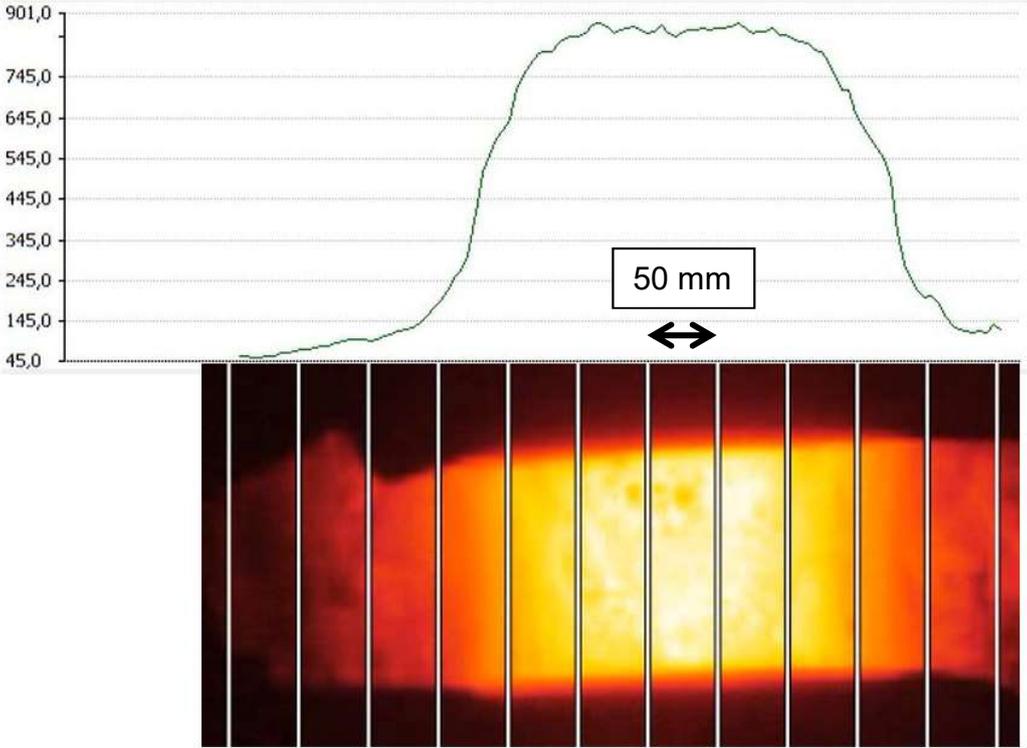


Abbildung 44 - Temperaturprofil direkt nach Verlassen des Moduls

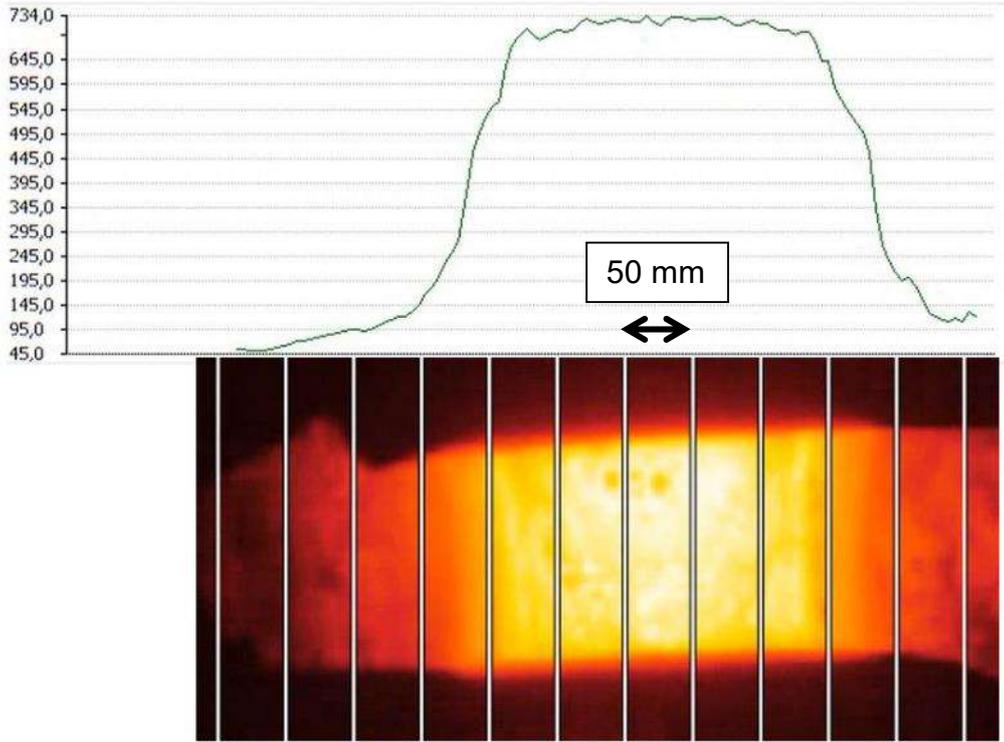


Abbildung 45 - Temperaturprofil 10 Sekunden nach Verlassen des Moduls

Die Messungen decken sich mit den bisherigen Annahmen zu Verweilzeiten und nötigen Transportgeschwindigkeiten ins Presswerkzeug. Der Übergangsbereich warm – kalt beträgt ca. 40 mm.

#### 8.5 Schleppmessungen zur Ermittlung der Kerntemperaturen

Entscheidend für akzeptable Resultate beim Pressvorgang ist die vollständige Durchwärmung des Materials. Optische Methoden wie Wärmebildkameras oder Pyrometer sind hier nicht zielführend, da sie stets nur Temperaturmessungen der Materialoberfläche erfassen können. Um die Temperaturen innerhalb der Platinen messen zu können, wurden jeweils Platinen mit 1 mm und 1,8 mm Dicke mit Bohrlöchern versetzt und mit Thermoelementen bestückt:

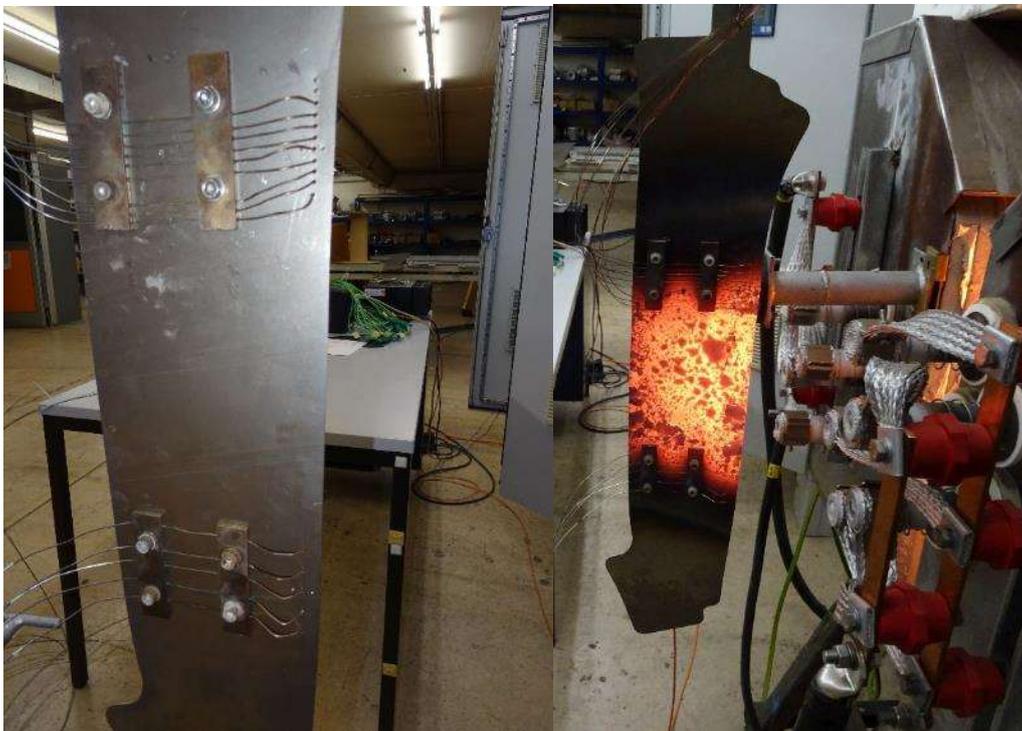


Abbildung 46 - Platine mit Schlepplementen vor und nach der Erwärmung

Die Elemente wurden jeweils an den Rändern der Übergangszone der Strahlerfläche platziert: 9 Elemente oben und 5 Elemente im unteren Bereich (Abstand der Elemente zueinander jeweils ca. 5 mm). Die Befestigung der Elemente an der Platine wurde so weit wie möglich vom Messort entfernt angebracht, um die Ergebnisse durch die Temperatureaufnahme des Klemmmaterials möglichst wenig zu verfälschen. Die Spitzen der Elemente wurden in der Mitte des Platinenmaterials platziert. Weiterhin wurde die Temperatur im Inneren des Moduls aufgezeichnet (Strahlerinnentemperatur), und die der Umgebung, um die Messwerte kompensieren zu können.

Die Belegung der Messstellen wurde folgendermaßen festgelegt:

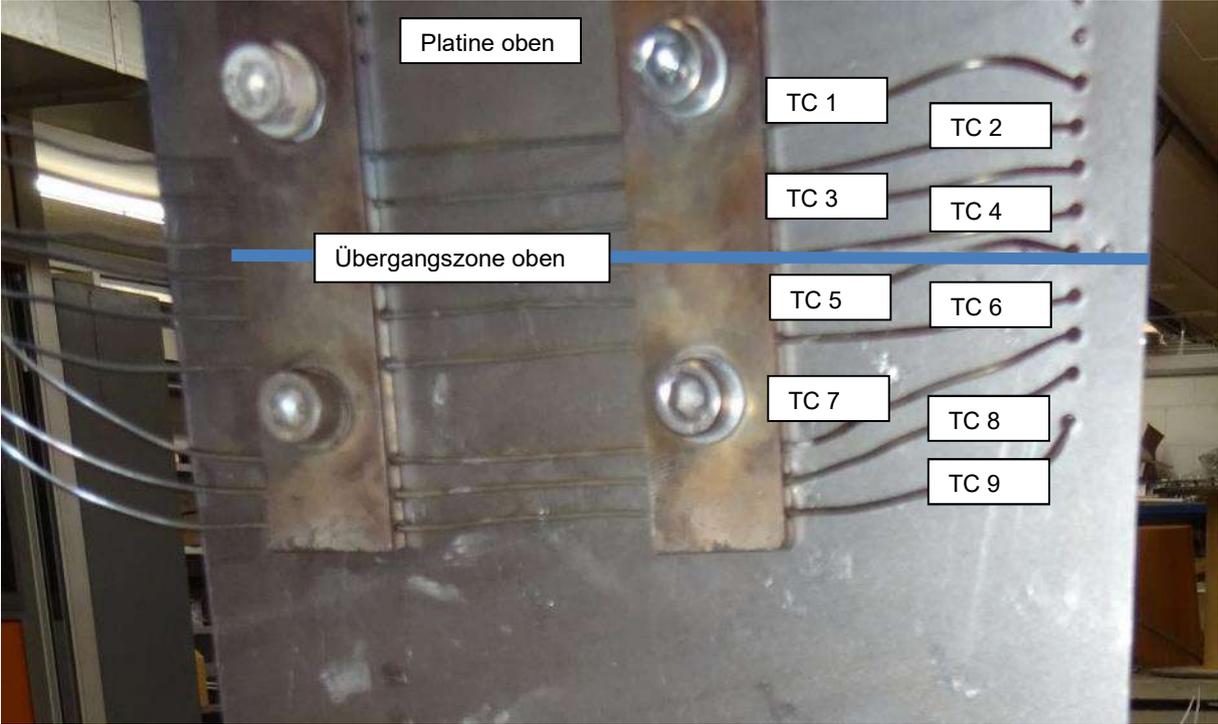


Abbildung 47 - Elementpositionen Platine oben

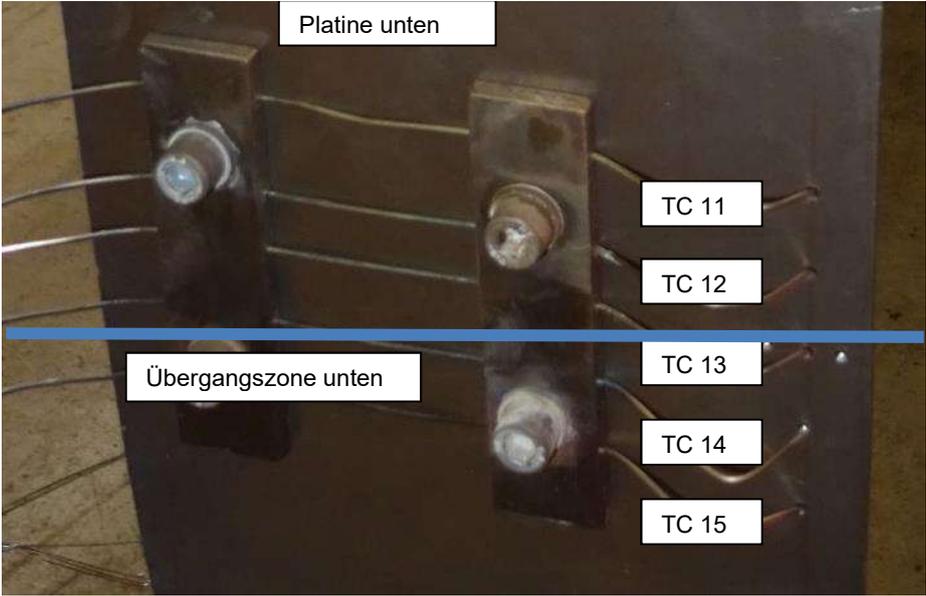


Abbildung 48 - Elementpositionen Platine unten

Es wurden mehrere Messreihen durchgeführt. Die folgenden Abbildungen zeigen exemplarisch den Temperaturverlauf der einzelnen Messstellen:

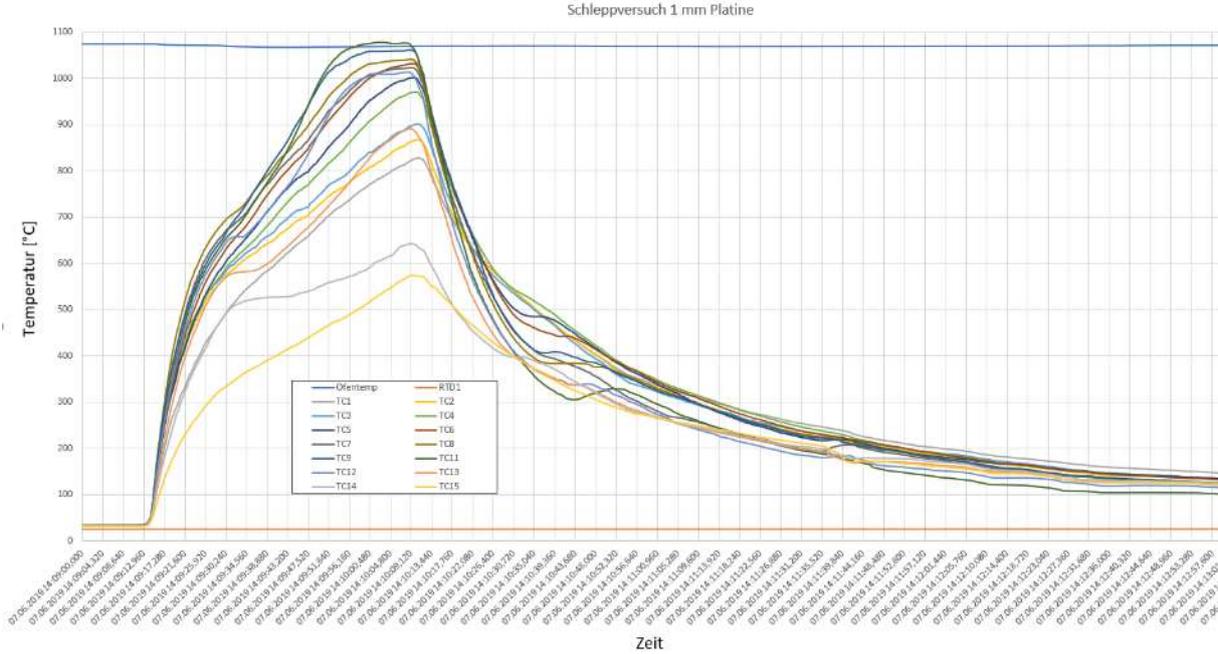


Abbildung 49 - Schleppversuch 1 mm Platine

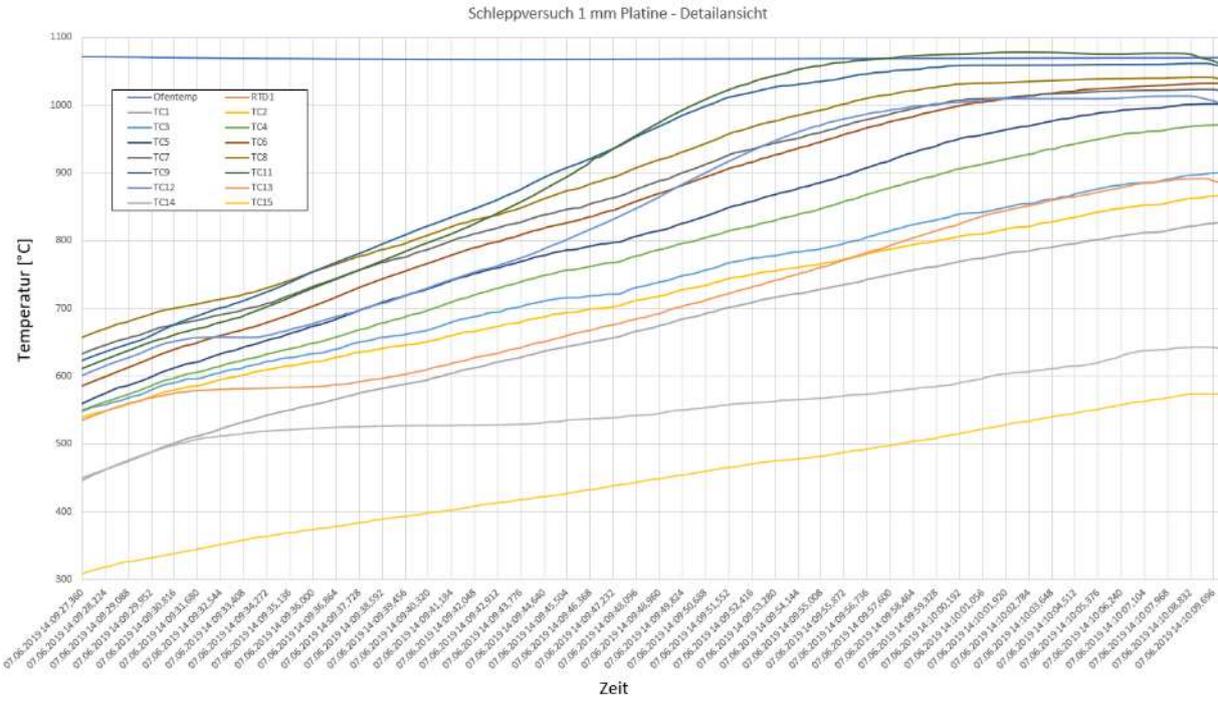


Abbildung 50 - Schleppversuch 1 mm Platine, Detailsicht

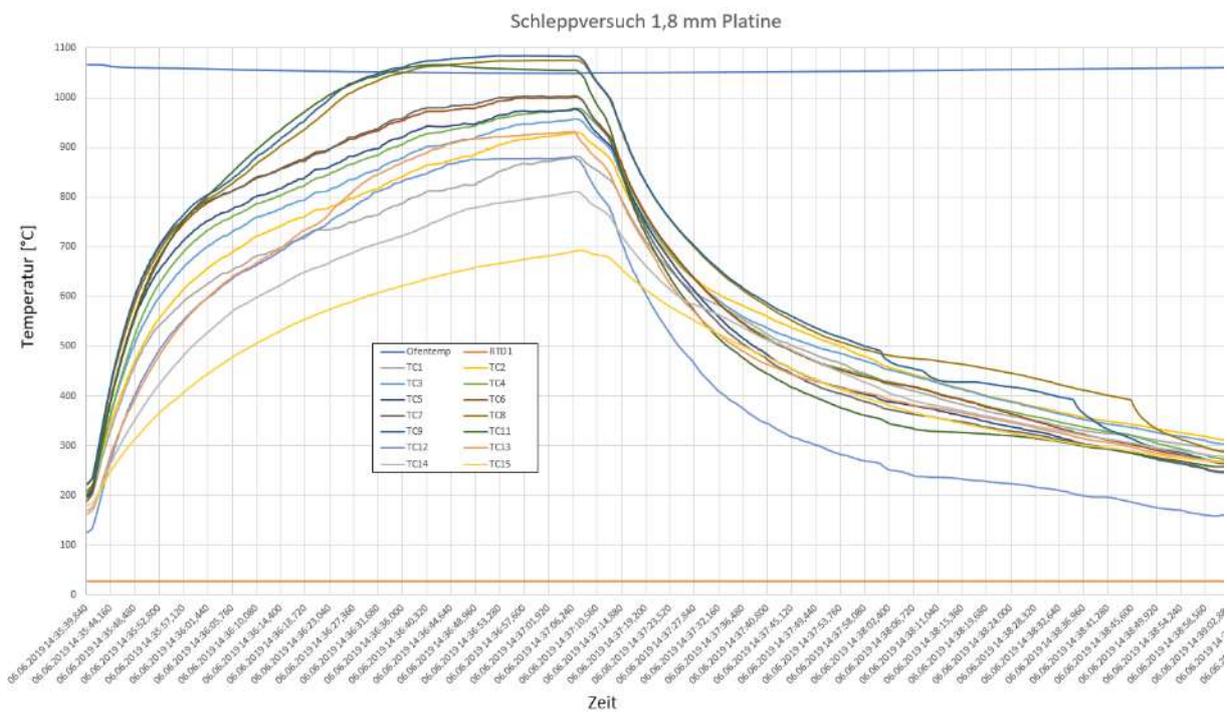


Abbildung 51 - Schleppversuch 1,8 mm Platine

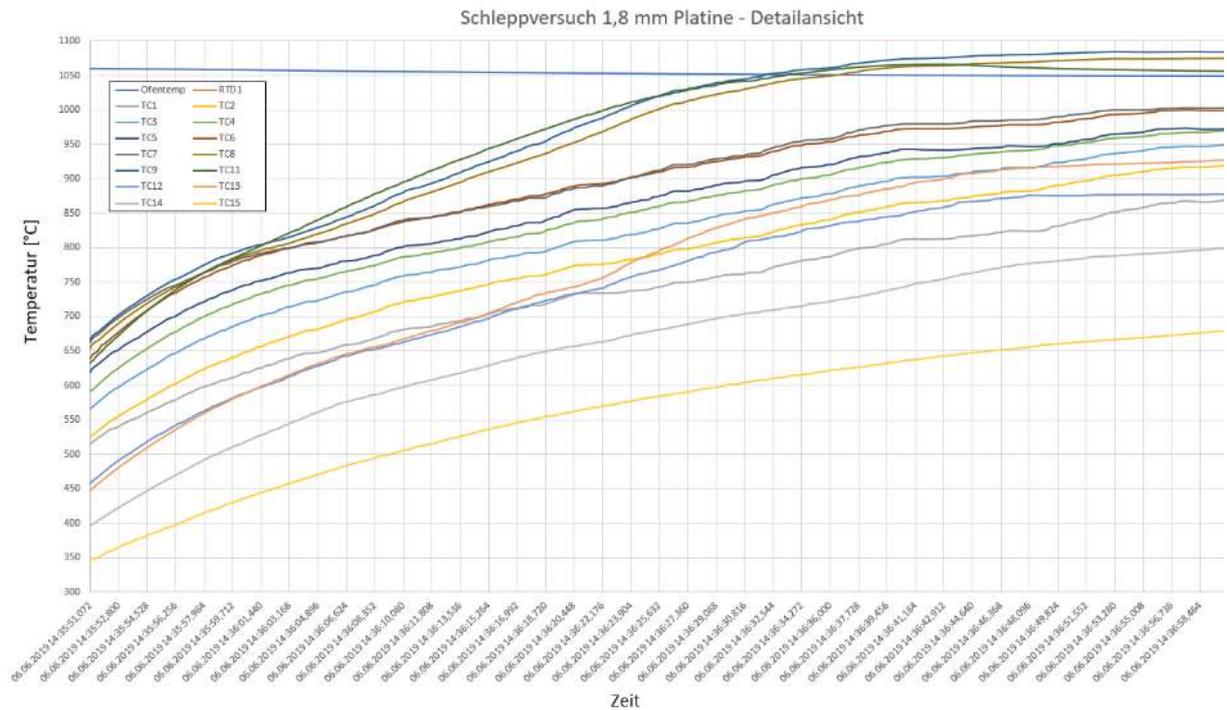


Abbildung 52 - Schleppversuch 1,8 mm Platine, Detailsicht

Durch den Aufbau der Messfühler musste der Abstand zwischen den Heizmodulen auf 80 mm vergrößert werden, was zur Folge hatte, dass die Temperatur zwischen den Strahlern sich aufgrund der Wärmeverluste durch den vergrößerten Spalt nur noch auf ca. 1.060 °C einstellen konnte. Dadurch verlängerten sich die Aufheizzeiten

entsprechend für die Erwärmdauer von 700 °C auf 920 °C (ausgewertet für die heißesten Elemente TC 9 und TC 11):

1 mm Platine: ca. 16 Sekunden

1,8 mm Platine: ca. 21 Sekunden

Zur Ermittlung der Übergangsbreiten der Platinen wurde der Zeitpunkt gewählt, an dem das heißeste Element jeweils die 920 °C erreicht hatte:

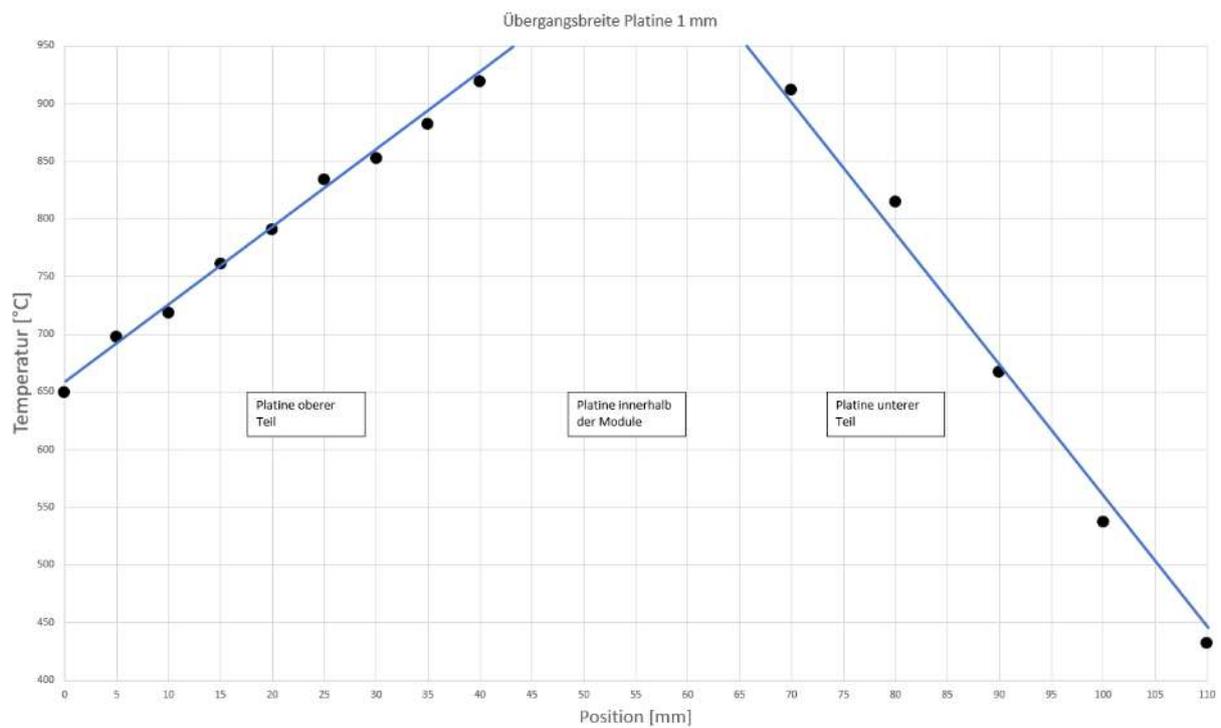


Abbildung 53 - Übergangsbreite Platine 1 mm

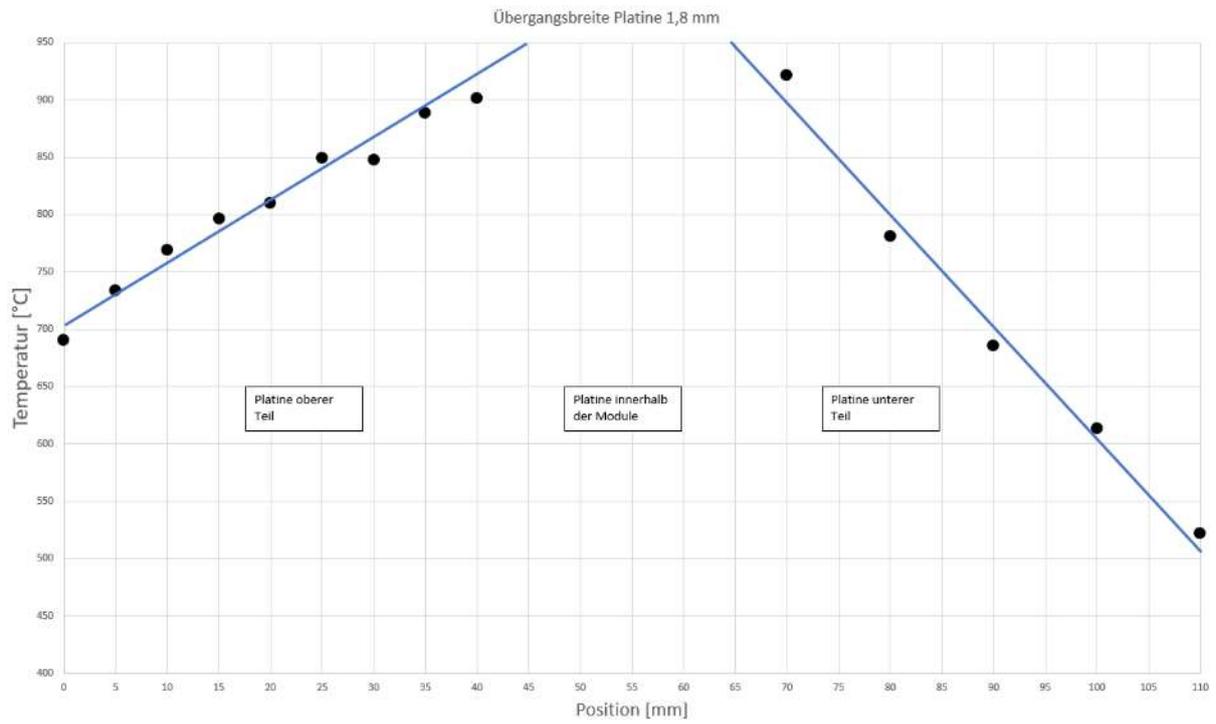


Abbildung 54 - Übergangsbreite Platine 1,8 mm

Bei beiden Platinenstärken ergeben sich für den Übergangsbereich von 750 °C auf 920 °C Breiten von ca. 3 cm.

## 9 Diskussion und Ausblick

Die Funktionsweise des Demonstrators zur partiellen Erwärmung von Platinen wurde erfolgreich getestet: die Platinen konnten kontaktlos im definierten Bereich auf die geforderten  $> 920 \text{ °C}$  erwärmt werden.

Die Übergangszone warm – kalt ( $< 750 \text{ °C}$  auf  $> 900 \text{ °C}$ ) wurde durch diese Methode im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik erheblich verbessert (ca. 3 cm, Ergebnisse in längsgeteilten Rollenherdöfen liegen bei idealerweise 4-5 cm).

Da der Ofenraum mit dieser Methode nur noch auf  $700 \text{ °C}$  anstelle  $> 900 \text{ °C}$  aufgeheizt werden muss, sinken die Verluste durch Abstrahlung und Wärmeverlusten durch Öffnungen erheblich, so dass, je nach Ofentyp und -größe, erhebliche Energieeinsparungen möglich werden.

Als problematisch erwies sich der Nachweis der Aufheizgeschwindigkeit der Platinen: die Anbringung von Schlepperelementen vergrößert den benötigten Raum zwischen den Modulen um ca. den Faktor 10 (80 mm anstelle der später angedachten 8 mm). Dies verringert die erreichbare Temperatur zwischen den Modulen bei maximaler Leistung durch Abstrahlverluste bedingt durch den größeren Spaltraum auf ca.  $1.080 \text{ °C}$  anstelle  $1.300 \text{ °C}$ , was durch den  $T^4$  – Zusammenhang einen sehr großen Einfluss darstellt. Weiterhin mussten die Elemente und die an der Platine angebrachten Befestigungen mit erwärmt werden, so dass sich in Summe die Erwärmdauer im Vergleich zur optischen Messung ungefähr vervierfacht hat.

Durch die gewonnenen Erkenntnisse der Versuchsergebnisse sind weitere Verbesserungen geplant:

- Konstruktion einer Führungsschiene zum exakteren Einfahren der Platinen, um den Modulabstand weiter verringern zu können, was die benötigte Leistung zum Erreichen der Ofenraumtemperatur und die Verluste verringert
- Verfahrbare Module: die Platine stoppt jeweils kurz in der Mitte zwischen den Modulen und sie werden so nah wie möglich zusammengefahren
- Bei der jetzigen Methode können nur „Streifen“ partiell erwärmt werden. Wird die Platine zwischen den Modulen kurz angehalten, wäre eine beliebige Figur durch eine Schablone denkbar, die nur definierte Teilbereiche der Platine erwärmt

Derzeit sind an der Gesamtanlage noch Transportprobleme beim Einfahren in das Presswerkzeug zu lösen. Sobald an diesem Punkt ein funktionierendes Konzept erarbeitet wurde, kann das Modul zur partiellen Erwärmung der Platinen in die Gesamtanlage integriert werden.

## Quellen

[Schwartz]: Schwartz wilden Industries, <https://schwartz-wba.com/>

[Thyssen Krupp, EP 2324938]: <https://data.epo.org/gpi/EP3363554A1-HOT-STAMPING-METHOD>

[Ruhstrat]: <http://thermal-solutions.eisenmann.com>

[Universität Wuppertal]: Institut für Werkstoffe, Stahlwissen (<https://www.fuw.uni-wuppertal.de/de/ausstattung-und-geraeteverantwortliche/werkstoff-software/stahlwissenr.html>)

[Trumpf]: Trumpf Laservertrieb,  
[https://www.trumpf.com/de\\_DE/anwendungen/oberflaechen-bearbeiten/laserhaerten/](https://www.trumpf.com/de_DE/anwendungen/oberflaechen-bearbeiten/laserhaerten/)

[Bättenhausen]: Fa. Bättenhausen ind. Wärme- und Elektrotechnik GmbH,  
[www.baettenhausen.de](http://www.baettenhausen.de)

[Berghütten]: <https://berghuetten-gmbh.de/produkte/heizstabe-aus-silizium-karbid/>

[Optris]: Optris Infrared measurements (<https://www.optris.de/infrarotkamas>)

[Vibrans]: Dissertation Dipl.-Ing. Tobias Vibrans, "Induktive Erwärmung von Formplatinen für die Warmumformung",  
<http://monarch.qucosa.de/api/qucosa%3A20612/attachment/ATT-0/>

[ArcelorMittal]: ArcelorMittal Deutschland, <https://germany.arcelormittal.com/>