

Neue Entwicklungen in der Erwärmungstechnologie beim Warmumformen von Blechen

Vasily Ploshikhin, Jürgen Kaiser, Helmuth Bleier
Neue Materialien Bayreuth GmbH
Gottlieb-Keim-Straße 60
D-95448 Bayreuth

Markus Langejürgen, Christian Lengsdorf
SMS Elotherm GmbH
In der Fleute 2
D-42897 Remscheid

Michael Heyde, Karl Roll
Daimler AG
Bela Barenyi Straße 1
HPC050 B512
D-71059 Sindelfingen

Zusammenfassung / Abstract

Presshärteprozesse gewinnen in der Fertigung von crashrelevanten Bauteilen immer mehr an Bedeutung. In den letzten Jahren kommen auch neue Technologien wie das Tailored Tempering hinzu, womit auch gezielt gradierte Bauteile hergestellt werden können. Dennoch geschieht die Erwärmung der Platinen auf 950 °C mit einem Ofen. Aufgrund gestiegener Energiekosten und der größeren Bedeutung der ressourcenschonenden Produktion wurde das Projekt FlexWB gestartet, das sich mit der Erwärmung der Platinen über Kontaktwärmebehandlung beschäftigt. Dieser Artikel beschäftigt sich mit der Anlagenauslegung der induktiv beheizten Kontaktplatten. Durch verschiedene Optimierungsmaßnahmen konnte eine homogene Aufheizung der Platten erreicht werden, was die Grundlage für die weitere Verarbeitung legt. Des Weiteren werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie Werkstoffeigenschaften entlang der Prozesskette berechnet werden können.

Presshardening becomes more and more important in the production of crashworthy car body parts. Recently new technologies like the tailored tempering allows the production of press hardened parts with graded properties. However the heating process of the blanks up to 950 °C is still realised by means of a furnace. Thus the project "FlexWB" was started in awareness of increasing energy costs and resource efficient production. The heating process is based on the contact heat treatment with two plates. This article will present the system engineering of the heated plates. Through different optimization processes a homogenous temperature distribution of the plates could be reached what represent the basis for further forming operations. In Addition possibilites for simulating the forming process will be presented, which allows the modelling of the microstructure along the process chain.

1. Einleitung

Die weltweiten Automobilhersteller geraten immer mehr in ein Spannungsfeld, teilweise kontroverser Erwartungen. Viele Faktoren wie politische Entscheidungen in Bezug auf Klimaverträglichkeit von Fahrzeugen, steigende Komfortanforderungen der Kunden oder schnellere Umsetzung von neuen Antriebssystemen spielen eine wichtige Rolle, wenn es um die Konzeption neuer Modelle geht. Nur unter Beachtung der Gesamtheit aller Faktoren kann es möglich sein, erfolgreich im Wettbewerb zu bestehen.

Einen wesentlichen Beitrag in der Auslegung eines neuen Fahrzeuges liefert die Fahrzeugstruktur. Gerade im Bereich der Fahrzeugkarosserie sind die Möglichkeiten des konsequenten Leichtbaus noch nicht vollständig ausgeschöpft.

Immer wieder ergeben sich neue Ansatzpunkte, Gewicht zu sparen, das Schwingungs- und Steifigkeitsverhalten zu verbessern, sowie die Insassensicherheit zu erhöhen. Auf der einen Seite kann dies durch einen optimierten Materialmix aus Stahl, Aluminium und Faserverbundwerkstoffen erreicht werden. Andererseits spielt die Gestaltung der Bauteile eine wesentliche Rolle in Bezug auf das Steifigkeits- und Schwingungsverhalten.

Gerade in der Entwicklung neuer Stahlblechwerkstoffe hat sich im letzten Jahrzehnt viel getan. Es ist auch zu beobachten, dass Stahl nicht vollständig substituiert werden konnte, weil neue Mehrphasenstähle oder warmumformbare Stähle einen entscheidenden Vorteil gegenüber Aluminium und Magnesium aufweisen.

Um den komplexen Anforderungen aus den Crashlastfällen gerecht zu werden, werden vermehrt gradierte Werkstoffe eingesetzt, speziell wenn es um pressgehärtete Bauteile geht. Tailored Tempering beschreibt dabei ein Verfahren, womit weiche und harte Bereiche in einem Bauteil eingestellt werden können. Dabei findet die Erwärmung des Blechs immer noch konventionell über einen Ofen statt. Aufgrund des erhöhten Bewusstseins der Erhöhung der Ressourceneffizienz gibt es das Projekt „FlexWB“, was sich mit einem ofenfreien Aufheizprozess beschäftigt, wodurch anschließend auch gradierte Bauteileigenschaften eingestellt werden können. Fokus bei dieser Arbeit ist die Einbindung der Kontaktwärmebehandlung für den Platinenerwärmungsprozess.

1.1 Forschungshintergrund

Hintergrund dieses Forschungsvorhabens ist das Projekt FlexWB (Flexible Wärmebehandlung zur gezielten Gestaltung von Bauteileigenschaften und zur Erhöhung der Energieeffizienz der Prozesskette Warmumformen)

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird / wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.“

2. Grundlagen und Optimierung der induktiven Erwärmung für die Kontaktwärmebehandlung

Die Firma SMS ELOTHERM beteiligte sich auch schon an dem Vorgängerprojekt.. Im ersten Ansatz erfolgte eine direkte Erwärmung kleiner Bleche bzw. Blechausschnitte mittels Induktionserwärmung.. In Grundsatzversuchen sind Blechenden induktiv erwärmt und abgekühlt worden. Die Ergebnisse der anschließenden Napfziehversuche flossen in die Bearbeitung einer B-Säule ein. Dort konnte durch diese Art der Wärmebehandlung eine Verbesserung des Produkts erreicht werden. Insbesondere die Rissbildung beim Umformen konnte wirksam verhindert werden.

Beim induktiven Erwärmen von großflächigen Geometrien kam es aufgrund der hohen Leistungsdichten zu thermischen Spannungen. Diese Spannungen im Bauteil führten zu einem Verzug des Materials und somit zu einer inhomogenen Wärmeverteilung im Bauteil. Daraus generierte sich der Einsatz von Kontaktplatten zum verzugfreien Aufheizen von Dünoblechen. Zum Aufheizen dieser Kontaktplatten wurde wieder auf die Induktionserwärmung zurückgegriffen, weil damit hohe Leistungsdichten und somit kurze Aufheizzeiten möglich sind.

Die induktive Beheizung von Gesenken und Werkzeugformen ist Bestandteil des Programms der SMS ELOTHERM. Bei Anwendungen im Bereich Wärmebehandlung wie z.B. dem Glühen vor dem Weiterverarbeiten (z.B. Umformen) gibt es Erfahrungen mit verschiedensten Metallen und Legierungen.

Arbeiten im Projekt FlexWB:

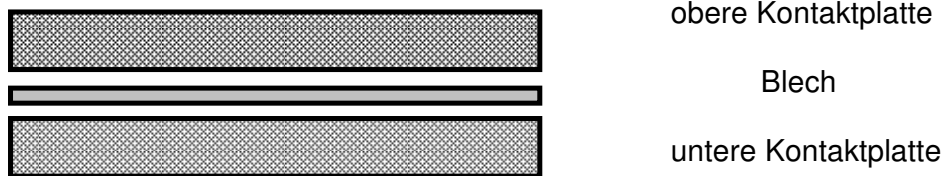


Abb. 1: Prinzip der Kontaktwärmebehandlung / Principle of contact heat treatment

Aus geometrischen Gründen ist die Aufheizung der Kontaktplatten jeweils nur von einer Seite möglich. Das bedeutet, dass für eine gleichmäßige Erwärmung der Kontaktplatten ein Flächeninduktor entwickelt werden musste. Weil ein Spiralinduktor prinzipbedingt im Zentrum eine Temperatursenke besitzt, fiel die Entscheidung zugunsten eines mäanderförmigen Induktors.

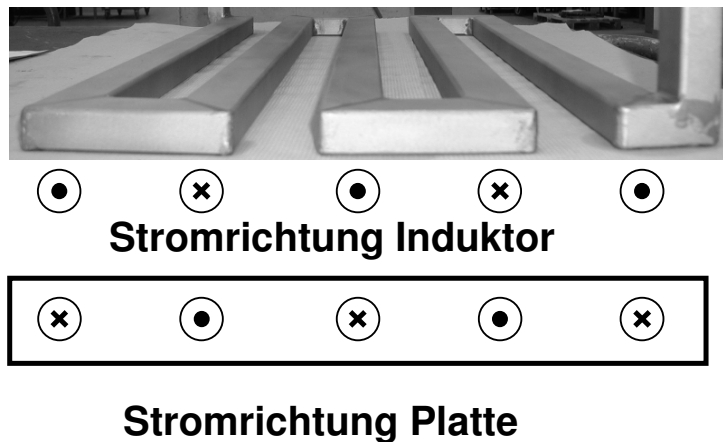


Abb. 2: Stromrichtung im Induktor und in der Kontaktplatte / Directions of current in inductor and contact plate

Bei den ersten Versuchen stellte sich heraus, dass es an den Umführungen des Mäanderinduktors starke Temperaturunterschiede aufgrund von Feldeinbrüchen gab. Um diese zu kompensieren, wurden Ferrite zur Feldkonzentration auf dem Kupferleiter ergänzt.

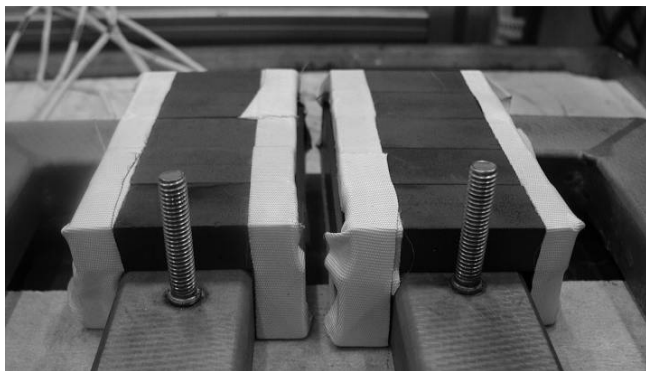


Abb. 3: Ferrite zur lokalen Feldkonzentration / ferrites for lokal flux concentration



Abb. 4: Messaufbau für vollständig mit Ferriten bestückten Induktor / Testing setup for inductor with ferrites

Messungen mit den partiell angebrachten Ferriten zeigten neben einer Verbesserung der Temperaturverteilung auch einen positiven Einfluss auf den elektrischen Wirkungsgrad. Zur Erhöhung der Energieeffizienz wurde im nächsten Schritt der komplette Induktor mit Ferriten bestückt. Allerdings bildeten sich unterschiedliche Temperaturzonen durch einzelne Leiter aus, wie im Bild zu sehen ist.

Deshalb ist im nächsten Schritt die Leitergeometrie optimiert worden. Mit einem zusätzlichen Leiterast ergaben sich Verbesserungen bei der Anschluss-technik, da der Strom nun von einer Seite eingespeist werden kann. Somit ist es nicht mehr erforderlich den Rückleiter schräg hinter dem Induktor zurück zu führen. Durch diese Maßnahme konnte auch die Bauhöhe der gesamten Einheit erheblich reduziert werden.



Abb. 5: Versuchsaufbau mit optimierter Induktorgeometrie / Test setup with optimized inductor geometry

Im Bild kann man die Abbildung der Leiterschleifen auf der Platte erkennen. An den Umföhrungen sieht man leichte Inhomogenitäten. In der Endausbaustufe werden diese dadurch kompensiert, dass die gegenüberliegenden Platten um genau einen halben Leiterabstand versetzt angeordnet werden. Im letzten Schritt wurden 2 Platten und 2 Induktoren (in Reihenschaltung) nebeneinander angeordnet. Die Platten wurden zusätzlich mit mehreren Schichten

einer Glasgewebematte isoliert, so dass sich der Temperatureausgleich noch besser auswirken kann, weil am Rand über Abstrahlung keine Wärme mehr verloren geht. Diese Anordnung simuliert sehr genau die späteren Arbeitsbedingungen des Kontaktplatte.

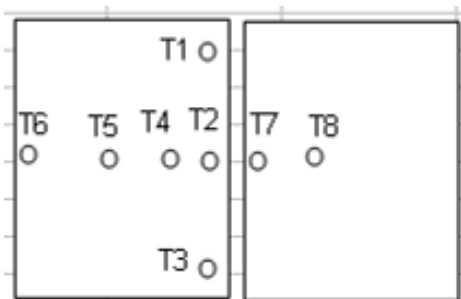


Abb. 6: Versuch mit 2 Induktoren und Simulation der späteren Arbeitsbedingungen der Kontaktwärmepatte (rechtes Bild: Messstellen auf der Platte) / Testing of 2 inductors in simulated real working conditions (right: position of thermocouples)

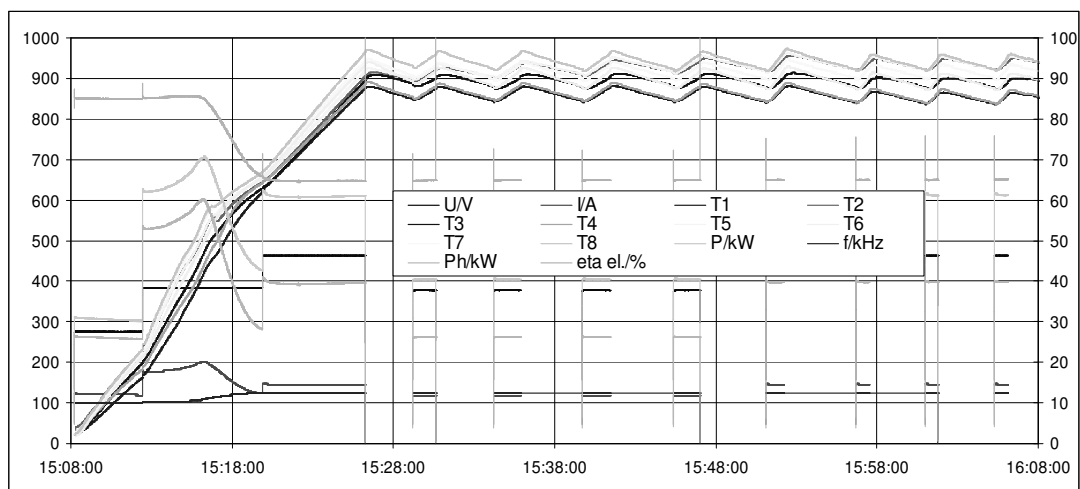


Abb. 7: Gemessene Temperaturen und Umrichterdaten für Versuch mit 2 Induktoren / measured temperatures and converter data for test with 2 inductors

Die Abb. 7 zeigt das einmalige Hochheizen, Abkühlen und Nachheizen im stationären Betrieb.

Schritte zur Optimierung in Zahlen:

Stufe	Anzahl Leiter	Leiterbestückung	eta el. < C	eta el. > C
1.	5 Leiter (31/40mm)	blank	57 %	
2.	5 Leiter (31/40mm)	Ferrite am Ende	63 %	
3.	5 Leiter (31/40mm)	Ferrite komplett	85 %	61 %
4.	6 Leiter (35/21mm)	Ferrite komplett	88 %	67 %
5.	2 x 6 Leiter (35/21mm)	Ferrite komplett	89 %	72 %
6.	2 x 6 Leiter (35/21mm)	Ferrite komplett	85 %	65 %
<i>eta el.</i> : <i>elektrischer Wirkungsgrad Induktor</i> <i><C / >C</i> : <i>unter Curietemperatur / über Curietemperatur (723 °C)</i>				

3. Umsetzung der neuen Anlagentechnik und Aufbau der Prozesskette

Das Verbundvorhaben „Flexible Wärmebehandlung zur gezielten Gestaltung von Bauteileigenschaften und zur Erhöhung der Energieeffizienz der Prozesskette Warmumformen (FlexWB)“ hat die Entwicklung und Realisierung von innovativen, flexiblen und energieeffizienten Prozessketten für das Warmumformen von Blechwerkstoffen aus hochfesten Stählen zum Ziel.

Den entscheidenden Ansatz lieferte die von der Neue Materialien Bayreuth GmbH im Rahmen eines Verbundprojektes mit der Audi AG, Daimler AG, ThyssenKrupp Steel AG und SMS Elotherm GmbH entwickelte sog. Kontaktwärmebehandlung. Diese stellt ein aussichtsreiches Verfahren dar, das geeignet ist, sowohl Bauteileigenschaften flexibel einzustellen, als auch die Energieeffizienz im Vergleich zum ausschließlichen Einsatz von Wärmeöfen während des Warmumformens zu verbessern. Die prinzipielle Machbarkeit dieses Verfahrens konnte im Rahmen von Versuchsaufbauten nachgewiesen werden [1].

Der Kern dieses Erwärmungsverfahrens sind Kontaktplatten, welche für den Erwärmungsprozess auf die benötigte Temperatur aufgeheizt werden. In Abb. 8 ist der prinzipielle Aufbau dieser Erwärmungsvorrichtung dargestellt. In einer Prozessvariante wird z.B. das zu erwärmende Blech zwischen die temperierten Kontaktplatten eingelegt, die Kontaktplatten fahren zusammen und stellen einen Kontakt mit der Blechoberfläche her. Dabei erwärmt sich das Blech durch Konduktion maximal auf die eingestellte Kontaktplattentemperatur. Anschließend wird das erwärmte Blech entnommen und einer Umformpresse zugeführt.

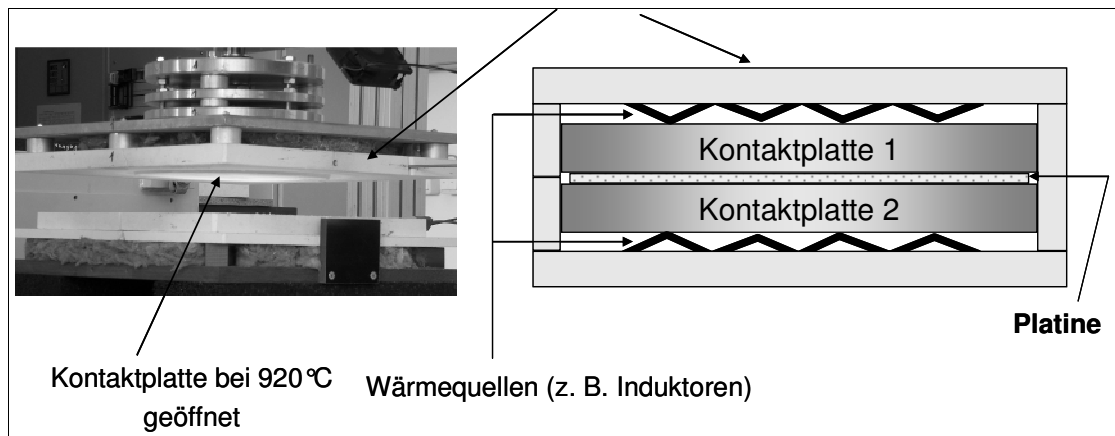


Abb. 8: Prinzip der Kontaktwärmebehandlung / the main principle of contact heat treatment

Die Wärmebehandlung von AlSi - beschichteten Blechen ist durch diese Art der Wärmeübertragung, im Vergleich zur konventionellen Erwärmung durch Strahlung und Konvektion, deutlich schneller durchführbar als im Ofen. Hierdurch können vorteilhafte Diffusionsvorgänge in der Beschichtungszone der Platine genutzt und die Ausbildung der Diffusionszone bei höheren Temperaturen stark beschleunigt werden (Abb. 9). Dadurch ist mit Kontakterwärmung eine signifikant geringere Prozesszeit für den Vorgang der Werkstoffvorbereitung erreichbar.

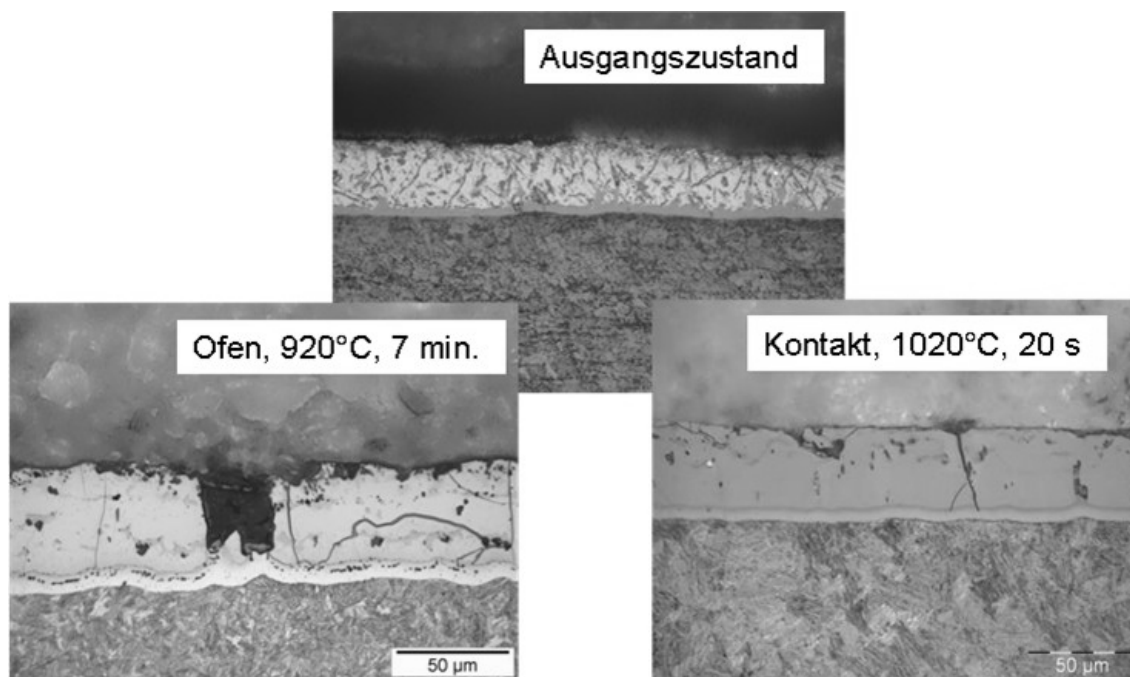


Abb. 9: beschleunigte Diffusion durch Kontaktwärmebehandlung / accelerated diffusion through contact heat treatment

3.1 Anforderungsgerechte Entwicklung der Kontakterwärmung

Eine sehr wichtige Anforderung an dieses Erwärmungsverfahren ist die Gleichmäßigkeit der Wärmeverteilung in den Kontakterwärmungsplatten. Dadurch werden die Eigenschaftsverteilung und die Ausbildung der Diffusionszone maßgeblich beeinflusst. Die Auslegung der Induktorgeometrie und der Kontaktplattendicke wurden durch den Einsatz numerischer Simulation unterstützt. Hierbei lag der Fokus auf einer möglichst homogenen Temperaturverteilung in den Kontakterwärmungsplatten. Um eine Aussage über eine optimale Auslegung der Kontaktplattendicke und der Induktorgeometrie treffen zu können wurde die induktive Erwärmung der Kontaktplatten sowohl für unterschiedliche Kontaktplattendicken als auch für verschiedenste Induktorgeometrien numerisch untersucht. Die numerische Simulation verschiedener Induktorvarianten zeigte, dass eine gleichmäßige Erwärmung der Kontaktplatten sowohl mit vielen schmalen als auch mit wenigen breiten Leitern, welche jeweils gleichmäßig über die Kontaktplattenbreite angeordnet sind, erreicht werden kann (siehe Abb.10).

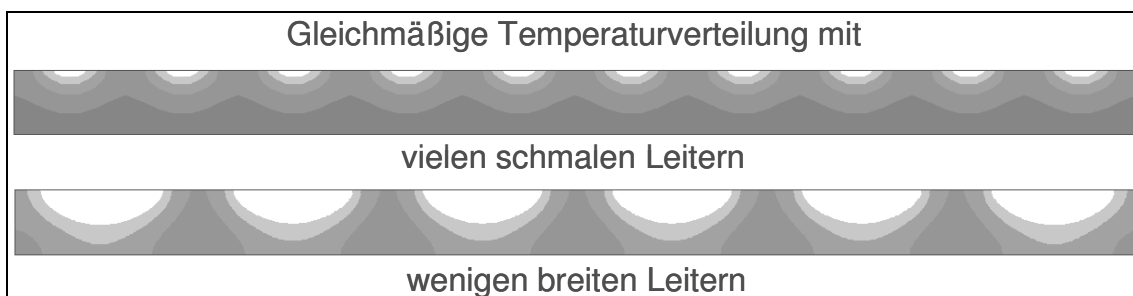


Abb. 10: Temperaturverteilung bei unterschiedlicher Leiteranzahl und Leiterbreite / temperature distribution with different conductor number and conductor width

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen weiterhin, dass sich im Bereich einer Kontaktplattendicke von 20 bis 25mm, hinsichtlich des max. Temperaturunterschiedes, mit dem gewählten Werkstoff ein Optimum einstellt, wie Abb. 11 zeigt.

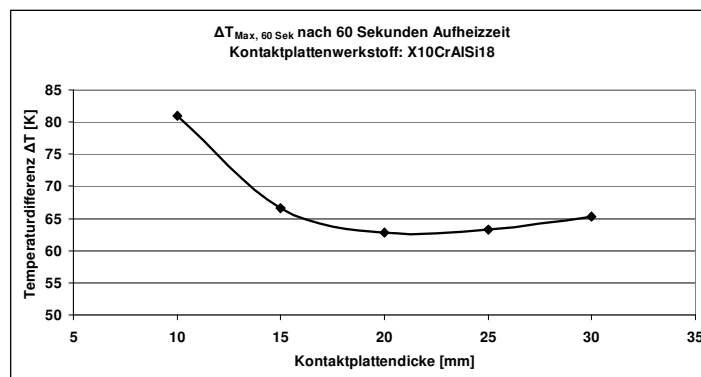


Abb. 11: Abhängigkeit des max. Temperaturgradienten von der gewählten Kontaktplattendicke / max. temperature gradient in dependence of contact plate thickness

Weiterhin wurde, um die bei der Kontaktwärmebehandlung von Stahlblechen erreichbaren Taktzeiten in einer ersten Näherung bestimmen zu können, mehrere Wärmebehandlungszyklen numerisch simuliert. Ziel hierbei war die Bestimmung eines Prozessfensters, in welchem eine konstante Blechentnahmetemperatur erzielt wird. Hierbei zeigte sich, dass mit der bei NMB geplanten Versuchsanlage bereits Taktzeiten ab 30 Sekunden, abhängig von der Blechgeometrie, erreicht werden können.

4. Möglichkeiten der Simulation der Wärmebehandlung und der resultierenden Werkstoffeigenschaften

Die Simulation des Presshärteverfahrens ist für die Auslegung der Prozessketten des Warmumformens unentbehrlich. Dabei ist allerdings zu beachten, dass für die Simulation von Warmumformprozessen eine wesentlich größere Menge an Eingangsparametern zur Verfügung stehen muss, als dies bei der Kaltumformsimulation der Fall ist. Im Folgenden soll auf die einzelnen Phasen und die Herausforderungen der Modellierung eingegangen werden. Die Prozesskette kann in einzelne Bereiche untergliedert werden, wie in Abb. 12 dargestellt.



Abb. 12: Prozesskette des Presshärtens mit Platinenerwärmung durch Kontaktwärmebehandlung / process chain of press hardening with blank heating with contact heat treatment

Generell handelt es sich bei den Phasen der Erwärmung, der Transferphase, der Liegephase auf den Fixierstiften im Werkzeug um rein thermische Simulationen. Diese haben den Vorteil, dass das mechanische Modell nicht mit berücksichtigt wird, sodass die Rechenzeiten entsprechend klein sind. Außerdem spielen rein die thermischen Eigenschaften der Platine eine Rolle. Bei Modellierung einer Kontaktwärmebehandlung ist der Wärmeübergangskoeffizient zwischen der Kontaktplatte und der Platine ein entscheidender Faktor. Hierzu gibt es mehrere mögliche Simulationsvarianten, die sich in ihrem Modellierungsaufwand erheblich unterscheiden. Schnelle Varianten rechnen mit Vereinfachungen des Modells, wie die Modellierung mit Konvektionsrandbedingungen, wo der Parameter Wärmeübergangskoeffizient „künstlich“ über den Abgleich der Zeit-Temperatur-Kurven der Platine eingestellt wird. Bei der physikalisch richtigen Modellierung der Kontaktwärmebehandlung ist jedoch auch der Druck eine signifikante Größe, hat er doch großen Einfluss auf die Durchwärmung und die Austenitisierung der Platine. In diesem Fall handelt es sich bei der Simulation eine thermo-mechanisch gekoppelte Rechnung, was wiederum mehr Aufwand in der Berechnung bedeutet. Genau wie beim Abkühlvorgang während des Umformvorgangs ist die Druckabhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten zu beachten.

Mithilfe eines kleinen Versuchswerkzeuges konnten viele verschiedene Temperaturverläufe aufgenommen werden, die dann mit den Verläufen in der Simulation verglichen wurden (Abb. 13 und Abb. 14). Der Wärmeübergangskoeffizient konnte so ermittelt und in der Simulation eingesetzt und optimiert werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Wärmeübergangskoeffizient über die Transfer-, Liege- und Schließphase nicht konstant ist. Des Weiteren muss er auch in der Liegephase oberflächenabhängig berücksichtigt werden, da es beim Liegen im Werkzeug zum Wärmestau unter der Platine kommt und somit die Konvektion geringer ausfällt als an der freien Oberfläche.

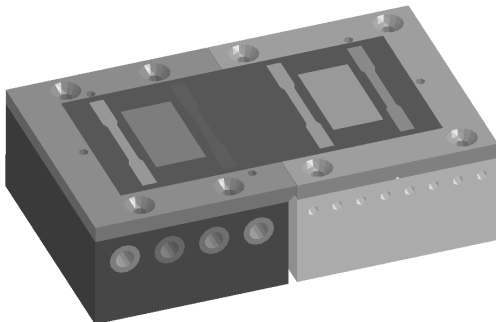


Abb. 13: Versuchswerkzeug zur Aufnahme von temperaturabhängigen Kennwerten / Experimental tool for recording thermal properties

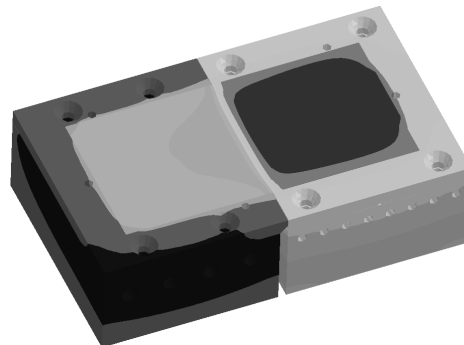


Abb. 14: Simulation der Temperaturverteilung / simulation of the temperature distribution

Für die Umformphase wird ein Materialmodell in LS-Dyna genutzt, was über die Abkühlkurven die Gefügeverteilung anhand von empirischen und reaktionskinetischen Gleichungen berechnet [2]. Dazu ist das exakte Wissen der chemischen Zusammensetzung notwendig. Da als Grundlage die kinetische Gefügereaktion bei der Abkühlung genutzt wird, funktioniert die Berechnung mithilfe der Aktivierungsenergien der einzelnen Phasen. Diese müssen als Eingangsparameter eingegeben werden. Da diese Größen sehr schwer zu bestimmen sind, bietet sich eine Optimierungsrechnung mittels LS-OPT an, um die Werte für die Aktivierungsenergien zu finden. Des Weiteren benötigt das Modell einen sogenannten Bor-Faktor für die Umwandlung von Austenit in Ferrit und einen weiteren Faktor für die Umwandlung von Austenit in Perlit. Auch hier bietet sich eine Optimierungsrechnung für die Ermittlung der Parameter an. Um das Verhalten des Materialmodells zu validieren, werden in einem Entwicklungsprojekt mit der Firma Dynamore Ein-Element-Tests durchgeführt. Dazu wurde jedem Element eine Abkühlkurve vorgegeben und die Gefügereaktion betrachtet. Der Abgleich der Parameter erfolgte dabei über die erreichte Härte an den Abkühlkurven im ZTU-Diagramm des 22MnB5 Stahls. Exemplarisch sind verschiedene Ergebnisparameter des Modells dargestellt.

Abb. 15 zeigt dabei die Berechnung der Martensit- und Vickershärteverteilung eines Referenzbauteils der Numisheet BM03, die von Livermore Software Technology (LSTC) durchgeführt wurde. Allerdings beruhen die im Modell genutzten Werkstoffmodelldaten auf Parameterstudien aus der Literatur, sodass konkrete Daten innerhalb des Projektes FlexWB und anderen verwandten Projekten erarbeitet werden sollen, damit das Modell entsprechend kalibriert werden kann. Erste Abgleiche des Werkstoffmodells zeigen dabei ein gutes Materialverhalten.

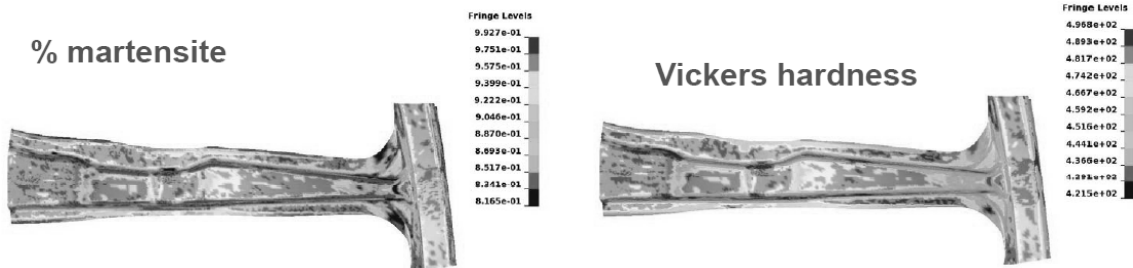


Abb. 15: Martensit- und Vickershärteverteilung der Simulation mit MAT-244 / martensite phase and Vickers hardness distribution of the simulation with MAT-244 [Quelle LSTC]

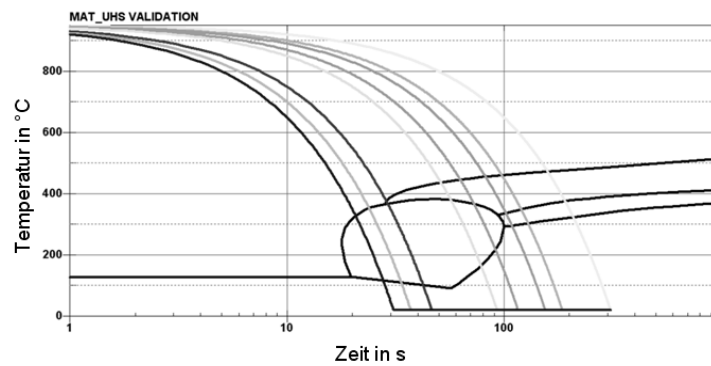


Abb. 17: Abkühlkurven und ZTU-Diagramm von USIBOR 1500 / cooling curves and CCT-diagramm of USIBOR

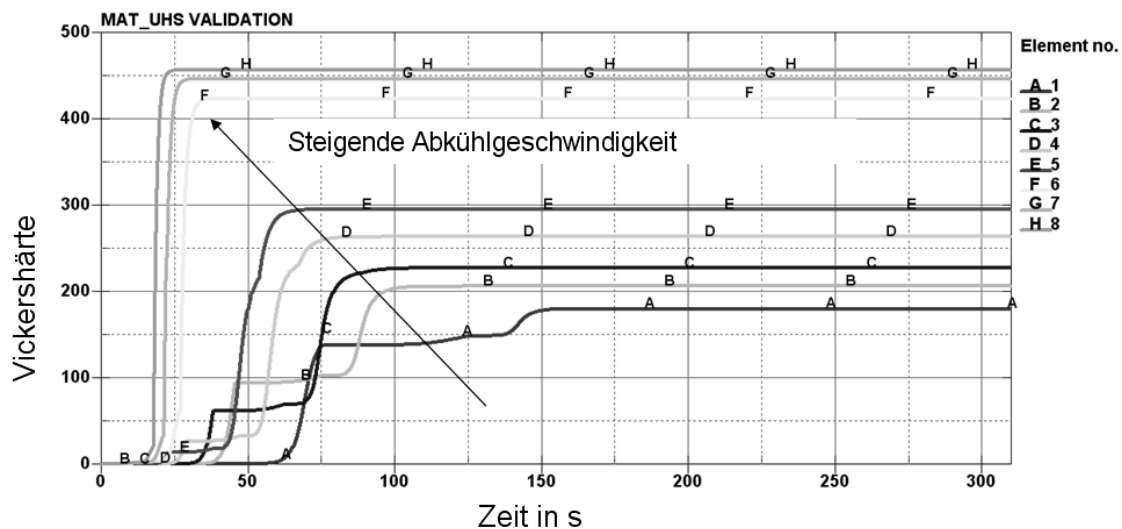


Abb. 18: Entwicklung der Härte über der Zeit / evolution of the hardness along time

5. Zusammenfassung

In den vorliegenden Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Kontaktwärmebehandlung eine gute Möglichkeit bietet, Platinen homogen für den Presshärteprozess zu erwärmen. Die Anlagentechnik der Induktion und der Kontaktplatten konnte mittels simulativer Verfahren angepasst und optimiert werden. Nebenher wurden die Entwicklungen in Bezug auf die Simulation der einzelnen Phasen des Presshärteprozesses vorangetrieben, ebenso die Validierung des Materialmodells für die Berechnung der Gefügeverteilung mit LS-Dyna. Nächste Schritte sind der Aufbau der kompletten Anlage mit der Transfereinheit sowie den Umformwerkzeugen. In der Simulation ist der nächste Schritt die Einbindung eines Umformwerkzeuges und die Bestimmung der Abkühlbedingungen an einem Realwerkzeug.

6. Literatur

- [1] Experimentelle Untersuchungen des Umformverhaltens von hochfesten Stählen CP-W[®] 800 und MS-W[®] 1200, Projektbericht, Kompetenzzentrum Neue Materialien Nordbayern, 2007
- [2] Paul Akerstrom, Modelling and Simulation of hot stamping, Dissertation Lulea University of Technology, 2006