

Prozessnahe Umformsimulation des Presshärtens mit LS-DYNA

Christian Klimmek¹, Hossein Karbasian², Alexander Brosius², A. Erman Tekkaya²

¹Simuform GmbH, Dortmund, Deutschland

²Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL), Dortmund, Deutschland

Abstract:

At present, hot stamping represents an innovative manufacturing process for forming high strength steels, implying a sheet at austenite temperature being rapidly cooled down and formed into a die at the same time (quenching). This forming process is used for the manufacturing of automobile structural components with a strength of up to 1500 MPa, thus enabling extensive cost savings and good crash performance. Better formability at elevated temperatures and lower springback are further advantages of parts formed by hot stamping. The Finite Element Analysis is an essential precondition for a good process design including all process parameters. This paper presents the finite element simulation of a hot stamping process by means of experimentally calculated material and process data.

Keywords:

Hot Stamping, High Strength Steel, Thermo-mechanical coupled simulation

1 Presshärten

Die Warmumformung von höchstfesten Vergütungsstählen ermöglicht durch ein kombiniertes Umformen und Abschrecken (Presshärten) die Herstellung von crashrelevanten Bauteilen mit einer ausgezeichneten Festigkeit. Presshärten ist ein spezielles Umformverfahren zum Umformen von höchstfesten Vergütungsstählen wie dem 22MnB5. Dazu wird die Platine zunächst bis zur Austenitisierungstemperatur in einem Ofen erwärmt. Danach wird die erwärmte Platine des vorbeschichteten höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5 in ein Presswerkzeug transportiert. Beim Schließen des mit einer internen Wasserkühlung versehenen Werkzeuges wird das Bauteil umgeformt und gleichzeitig abgeschreckt (Bild 1). Durch Maßnahmen wie das Aufbringen einer Al-Si-Beschichtung wird die Verzundung des Stahls während des gesamten Prozesses verhindert. Zu den Vorteilen des Verfahrens gehören die bessere Umformbarkeit von Stahl bei den hohen Prozesstemperaturen und die hohen erreichbaren Bauteilfestigkeiten. Presshärten wird für die Herstellung von Komponenten der Fahrgastzelle eingesetzt. [1-9]

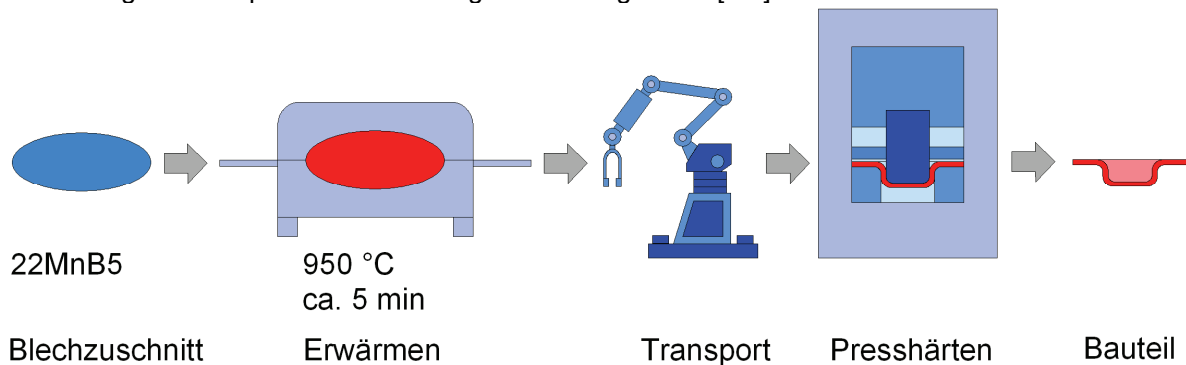


Bild 1: Prozessablauf des Presshärtens von höchstfesten Vergütungsstählen

Die Eigenschaften eines pressgehärteten Bauteils werden durch die thermischen, mechanischen und prozessspezifischen Einflussgrößen, die in Bild 2 zusammengestellt sind, beeinflusst. Eine ganzheitliche Untersuchung dieses komplexen Umformprozesses erfordert die Berücksichtigung möglichst aller genannten physikalischen Effekte. Durch die komplexen Einflüsse aus thermischen und mechanischen Prozesskennwerten wie temperaturabhängiges Fließverhalten des Materials können nicht alle physikalisch bedeutenden Effekte während des Presshärtens in einer konventionellen FE-Simulation mit akzeptablen Antwortzeiten erfasst werden. Somit sind spezielle Annahmen bei der Modellbildung und Definition der Prozessparameter erforderlich, die eine effiziente und prozessnahe FE-Modellierung des Presshärtens ermöglichen.

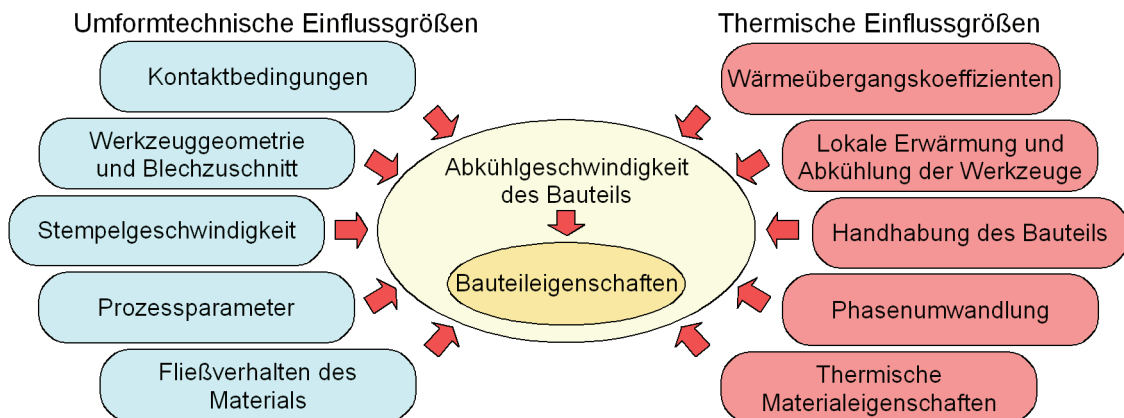


Bild 2: Mechanische und thermische Einflussgrößen auf die Bauteileigenschaften beim Presshärten

2 Entwicklung eines Demonstrators

Zur Durchführung der Umformversuche und zur Umformung von Bauteilgeometrien unterschiedlicher Komplexität wurde innerhalb der DFG-Forschergruppe FOR552 ein modulares Werkzeugsystem am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen konstruiert, das am IUL gefertigt und eingesetzt wurde. Bei der Auslegung dieses modularen Werkzeugsystems wurden das Einsatzgebiet, die

spezifischen Ansätze für die Methodenplanung und für Prozessführung berücksichtigt. Somit ist das Werkzeug in zwei Varianten einsetzbar (siehe Bild 3). Bei der ersten Variante wird die Platine ohne Gegenstempel umgeformt. Bei der zweiten Variante kann eine Vertiefung durch einen verfahrenbaren Gegenstempel erzeugt werden.

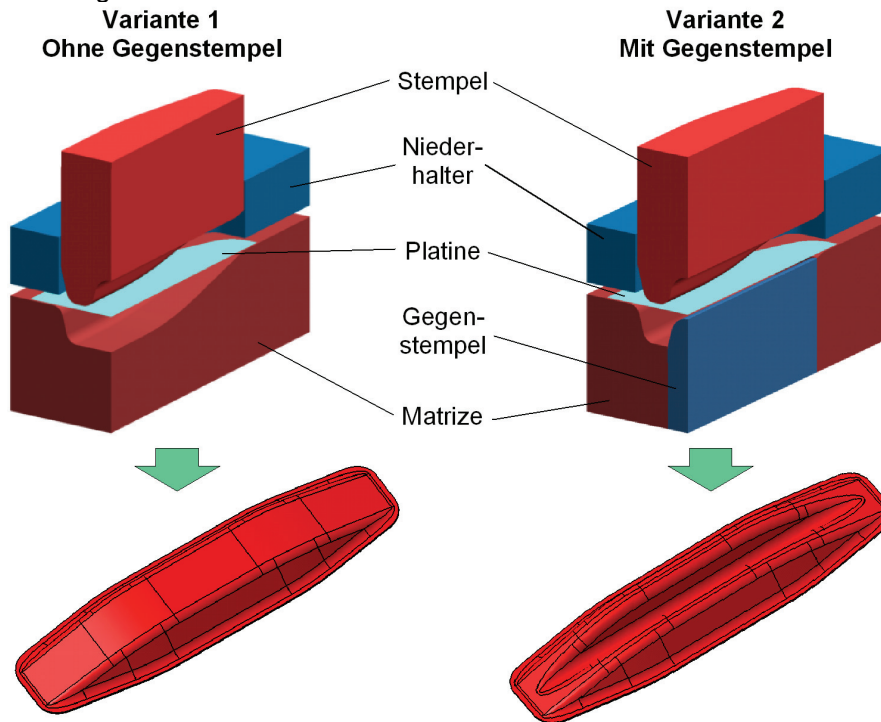


Bild 3: Varianten des modularen Werkzeugsystems zur Umformung von Bauteilen mit unterschiedlichen Geometrien

Für die Umformversuche wurde eine hydraulische 1000 kN Ziehpressen HYDRAP HPSZK 100-1000/650 eingesetzt. Bild 4 zeigt den Versuchsaufbau und die relevanten Prozessparameter dieses Werkzeugsystems. Für die gezielte Steuerung der Wärmeübertragung über den Flansch des Bauteils wurden einstellbare Distanzelemente auf dem Niederhalter eingebaut. Die numerischen und experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass die optimale Niederhalterdistanzierung 2 bis 3 mm beträgt.

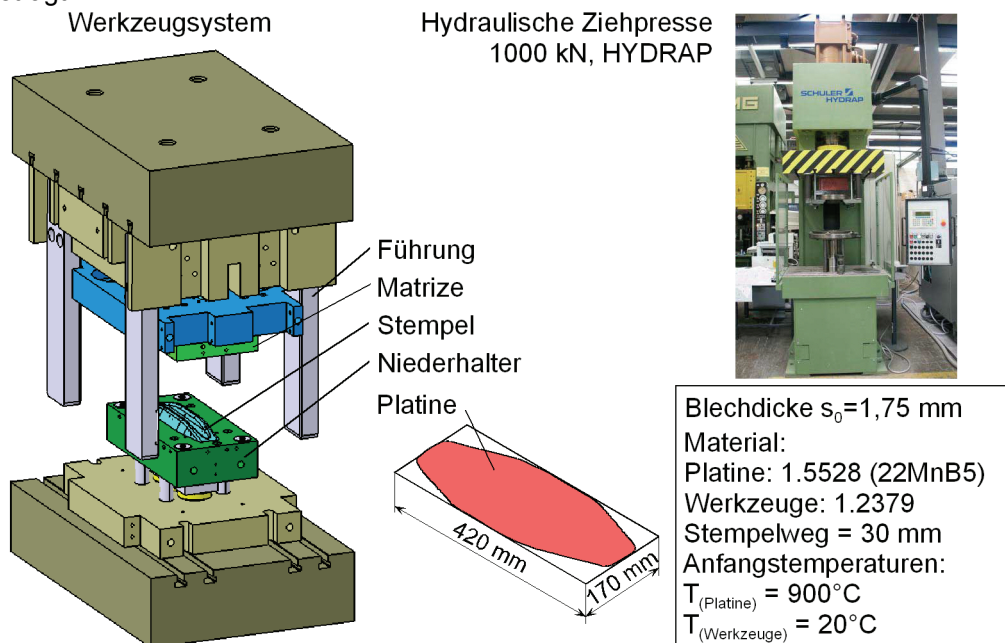


Bild 4: Versuchsaufbau und Prozessparameter des Werkzeugsystems

Die integrierten Kühlkanäle in den Werkzeugen ermöglichen eine schnelle und gleichmäßige Abkühlung des Bauteils, die für das Erreichen der gewünschten mechanischen Bauteileigenschaften erforderlich ist. Die Temperaturmessung während des Umformprozesses erfolgt sowohl durch die Thermoelemente, die in den Werkzeugen vorgesehen sind, als auch durch eine Thermographiekamera, die die Platinentemperatur vor und nach dem Presshärten aufnimmt.

Bei der Durchführung der Umformversuche wurden die Blechzuschnitte in einem Ofen bei einer Temperatur von 950 °C in ca. 5 min austenitisiert. Anschließend wurde die Platine in das Werkzeugsystem transportiert und pressgehärtet. Für die Ermittlung der Bauteiltemperatur während des Umformverfahrens wurde eine Versuchsreihe bei unterschiedlichen Haltezeiten durchgeführt und unmittelbar nach der Öffnung des Werkzeugs die Bauteiltemperatur mit einer Thermographiekamera aufgenommen. Bild 5 zeigt die aufgenommenen Thermographiebilder und die Haltezeiten beim Presshärten der ersten Variante des Werkzeugsystems.

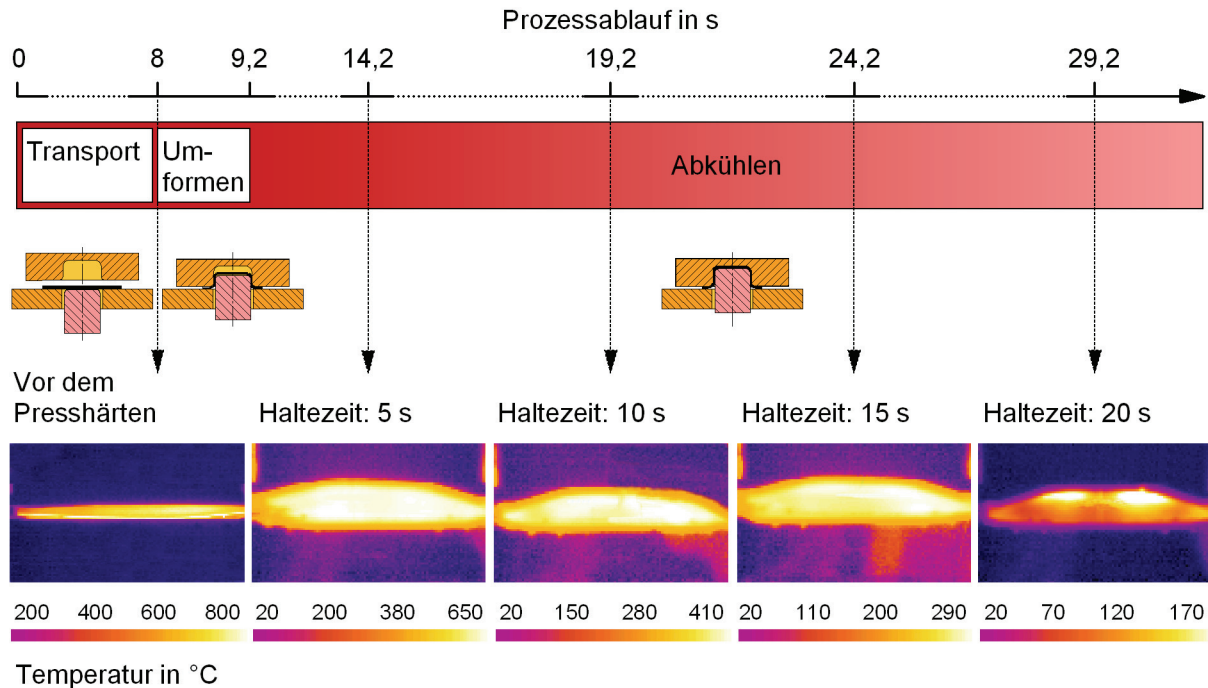


Bild 5: Thermographieaufnahmen bei unterschiedlichen Haltezeiten

3 Thermo-mechanisch gekoppelte FE-Simulation

Im Allgemeinen werden das Wärmeleitungsproblem und das mechanische Problem bei den meisten FE-Systemen gekoppelt in jedem Inkrement ganzheitlich gelöst. Berücksichtigt man hierbei, dass bei einer expliziten Zeitintegration der kleinste Zeitschritt sich in der Regel nach dem mechanischen Problem richtet, so ist dieser Zeitschritt für eine thermische Analyse des Problems weitaus zu klein. Zur Lösung des thermischen Problems ist grundsätzlich auch eine implizite Zeitintegration besser geeignet. Somit ist es nahe liegend, eine Methodik für das thermo-mechanisch gekoppelte Problem anzusetzen, das für die thermische Aufgabenstellung eine implizite Zeitintegration und für die mechanische Aufgabenstellung eine explizite Zeitintegration ansetzt. Auf diese Weise realisiert man gleichzeitig eine stabile Kontaktberechnung während des Umformprozesses. Der Zeitschritt für die implizite Zeitintegration sollte jedoch so angesetzt werden, dass die thermischen Rand- und Übergangsbedingungen hinreichend genau die Formänderungen und die Kontaktbedingungen erfassen. Sinnvolle Werte sind hierbei für den thermischen Zeitschritt circa 10 x mechanischer Zeitschritt bis 100 x mechanischer Zeitschritt. Dieses Lösungskonzept wird in LS-Dyna verfolgt und ist hierdurch zur Lösung der thermo-mechanisch gekoppelten Probleme besonders gut geeignet.

Die Berücksichtigung eines sinnvollen Zeitschritts ist nicht die einzige Umstellung im Vergleich zu einem reinen Kaltumformprozess, den man hier berücksichtigen sollte. Zumal mit Hilfe dieser gekoppelten Berechnungen auch eine Aussage über die Temperaturfelder im Werkzeug bzw. auf der Werkzeugoberfläche gewonnen werden kann, bedarf es einer sorgfältigen Vernetzung der Werkzeuggeometrien. Zu stark verzerrte Elemente, die bei einer Kaltumformung lediglich die

Kontaktfläche darzustellen haben, sind für die Berechnung des Temperaturfeldes nicht geeignet. In Bild 6 ist der Unterschied unterschiedlicher Netze zu sehen.

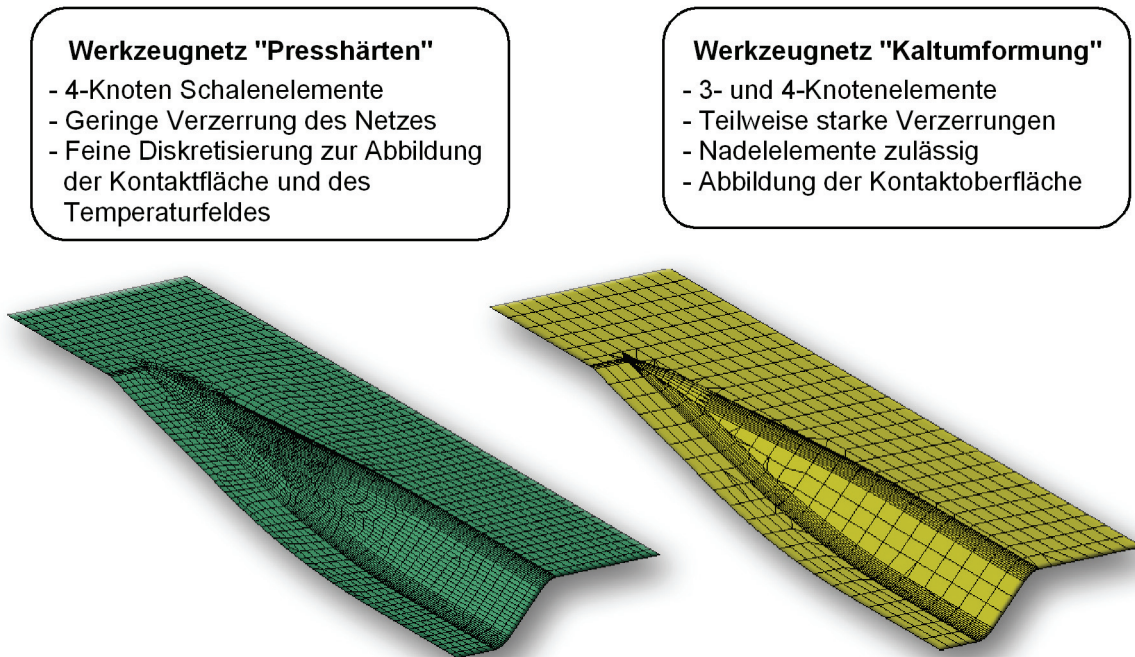


Bild 6: Prozessgerechte Vernetzung der Werkzeugwirkflächen

Des Weiteren ist im Vorfeld der Berechnung zu klären, welche Zielgrößen für eine Prozessauslegung auszuwerten sind. Dieser Aspekt beeinflusst die Modellierung erheblich. Sofern das Temperaturfeld im inneren der Umformwerkzeuge zur Auslegung von Kühlkanälen beispielsweise im Zentrum der Untersuchung steht, ist eine Vernetzung von Volumenelementen erforderlich, das wiederum zu einem starken Anstieg der Rechenzeiten und einem hohen Aufwand bei der Vernetzung führt. Mit Blick auf eine Machbarkeitsprüfung und mit Blick auf die Berücksichtigung der Temperaturfelder auf der Werkzeugoberfläche und der Ermittlung der Abkühlraten im Bleich bis zum Erreichen des UT im Umformprozess ist eine Modellierung mit Schalenelementen kosteneffizienter. Dieses Vorgehen ist am Beispiel einer Trägerstruktur modelliert und mit den experimentellen Untersuchungen verglichen worden. Zur Validierung der Ergebnisse ist das aufgenommene Temperaturfeld aus den experimentellen Untersuchungen mit Hilfe einer Thermografiekamera genutzt worden. Ergänzend wurde die Oberflächentemperatur des Blechformteils nach der Umformung und nach der Haltezeit mit Hilfe eines Thermoelements aufgenommen. Bild 7 zeigt in einer kompakten Darstellung die Einflussgrößen, die in das Berechnungsmodell integriert wurden.

Die Temperaturverteilung im Bauteil mit Hilfe der Modellierung durch Schalenelemente ist in Bild 8 zu sehen. Der Vergleich der Temperaturverteilung aus der FEM und aus den Bildaufnahmen mit Hilfe der Videothermografie in Bild 3 zeigt eine gute Übereinstimmung. Sicherlich ist die Abbildung des Temperaturfeldes über die Zeit bis zu einem Zeitraum von circa 5 Sekunden vertretbar, darüber hinaus aber immer stärker fehlerbehaftet. Dies liegt daran, dass die Wärmeleitung in das Werkzeug nicht korrekt abgebildet werden kann.

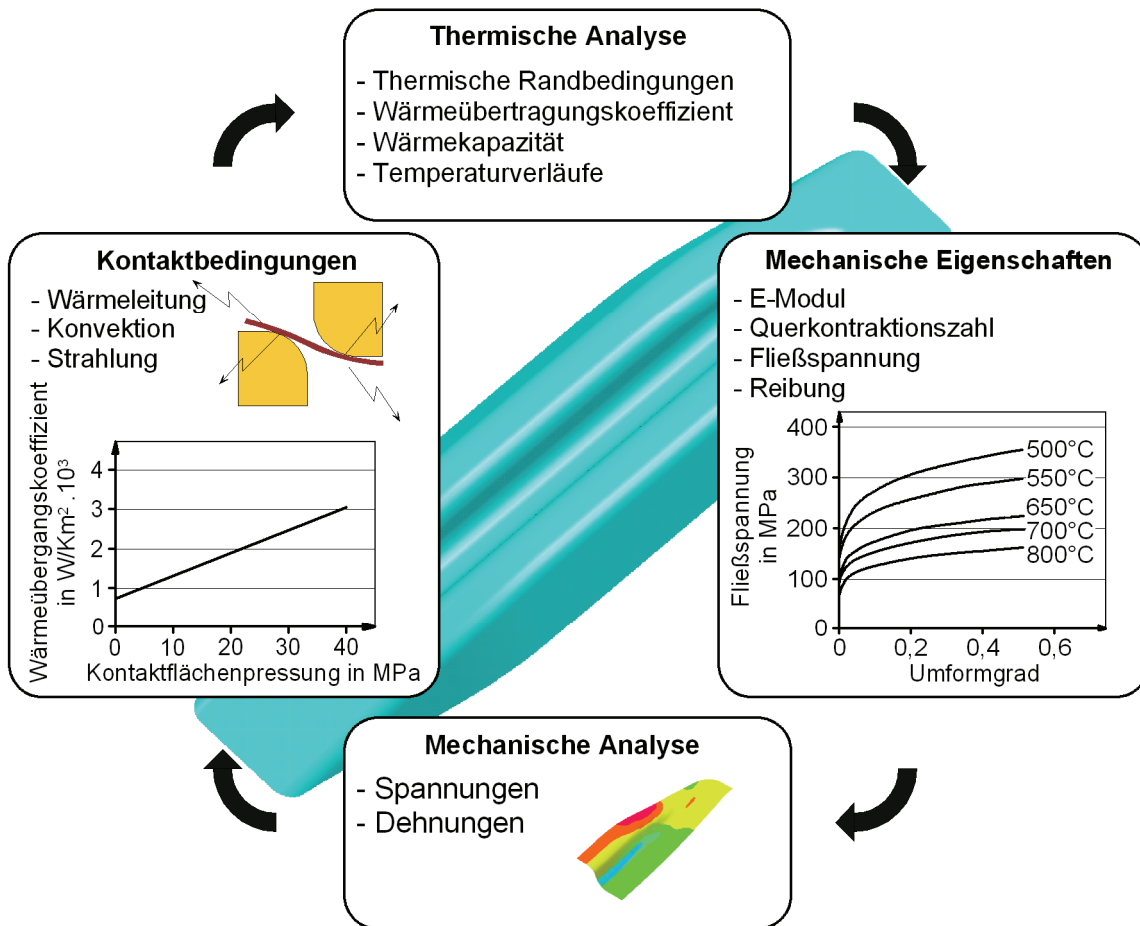


Bild 7: Vorgehensweise bei den thermo-mechanisch gekoppelten Analysen [10]

Temperaturverteilung nach UT

Temperaturverteilung nach 5 Sekunden

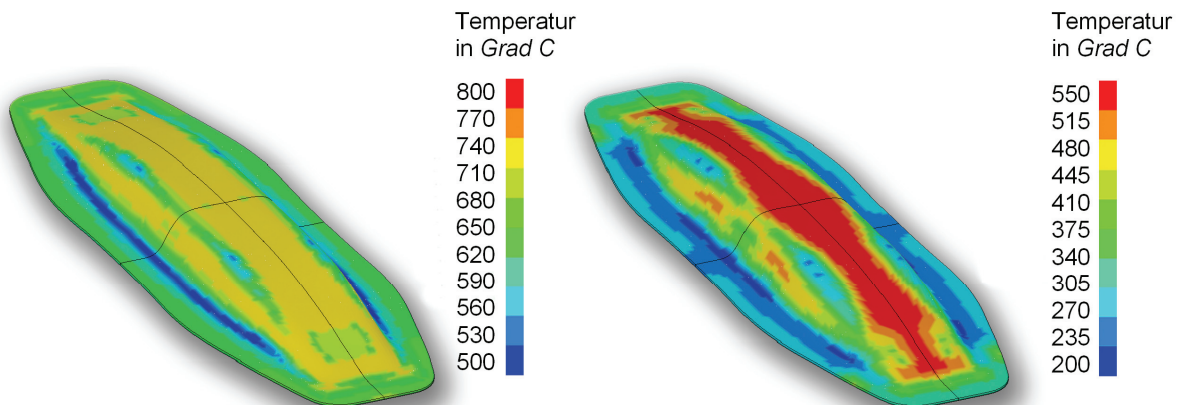
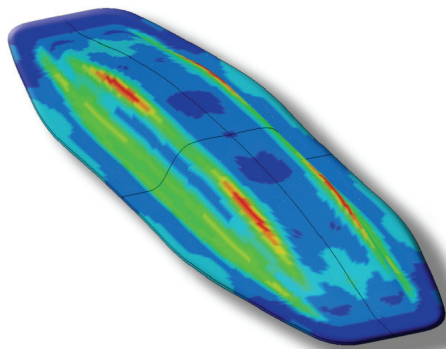


Bild 8: Temperatur nach Erreich des UT bzw. nach weiteren 5 Sekunden Haltezeit im Werkzeug

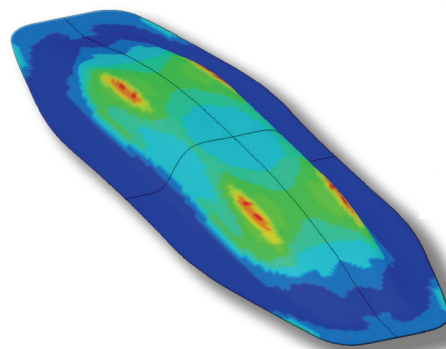
Die Umformung dieses Bauteils zeigt, dass keine kritischen Umformzonen vorhanden sind. Diese Aussage lässt sich über die Blechdickenverteilung ableiten. Die Formänderungsanalyse durch die Einbindung einer Grenzformänderungskurve sind derzeit mit Hilfe von Warm-FLCs nicht möglich. Das Formänderungsvermögen in einem Grenzformänderungsschaubild lässt sich lediglich durch die Einbindung einer konventionellen FLC für den Werkstoff vornehmen. In Bild 9 sind die plastische Vergleichsformänderung und die Blechdickenverteilung für das untersuchte Bauteil dargestellt.

Plastische Vergleichsformänderung



0,150
0,135
0,120
0,105
0,090
0,075
0,060
0,045
0,030
0,015
0,000

Blechdickenverteilung



Blechdicke
in mm

1,75
1,74
1,73
1,72
1,71
1,70
1,69
1,68
1,67
1,66
1,65

Bild 9: Formänderung und Blechdicke im Bauteil

Eine vorsichtige Aussage und Prognose über das Gefüge im Bauteil lässt sich mit Hilfe der Abkühlkurven und deren Übertragung in ein ZTU-Diagramm vornehmen. In Bild 10 sind die Abkühlkurven aus 5 unterschiedlichen Bereichen des Bauteils in einer logarithmischen Form dargestellt.

Abkühlkurven im Bauteil nach 5 Sekunden

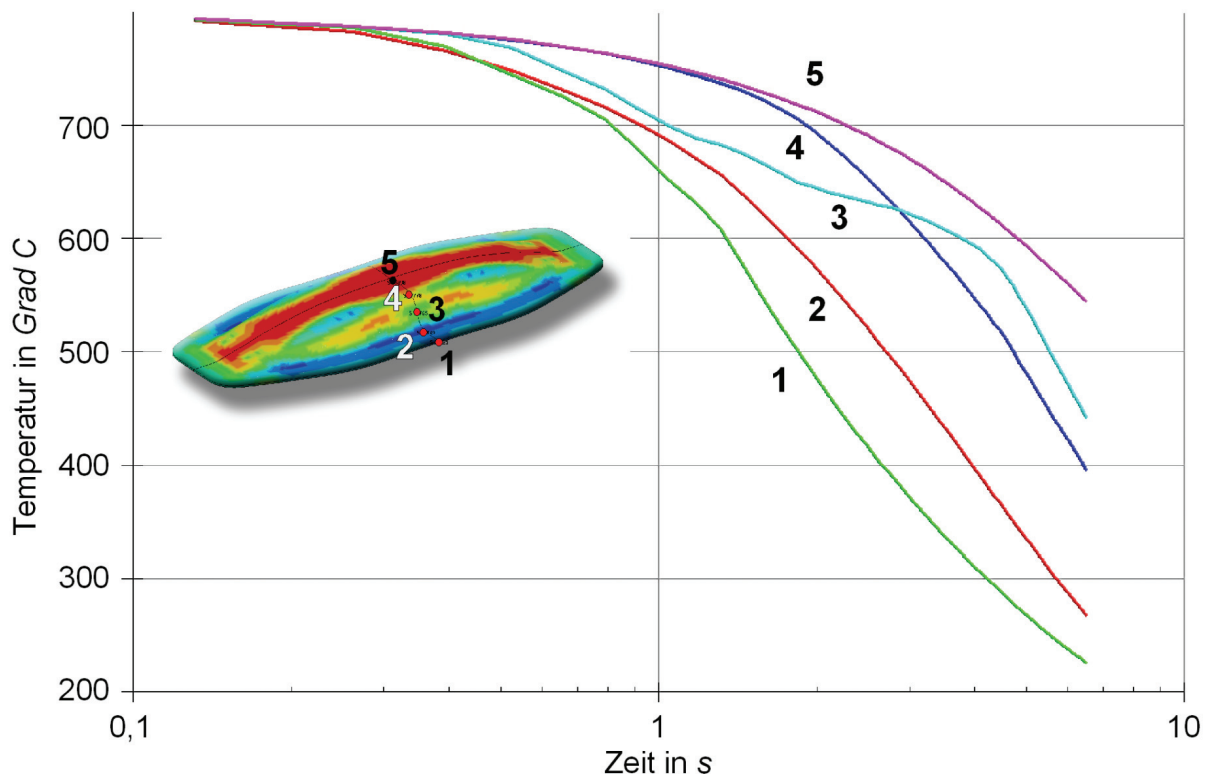


Bild 10: Abkühlvorgang im Bauteil in unterschiedlichen Bereichen

Die zeitliche Ableitung der Abkühlkurven zeigt, dass die Bereiche 1 bis 3 die kritische Abkühlrate von 27 K/s weit überschreiten. Der Bereich wird erst nach UT mit einer Abkühlrate, die größer als 27 K/s ist abgekühlt. Im Bereich 5 liegt die Abkühlrate unterhalb von 27 K/s. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die geometrische Gestaltung des Stempels mit mittleren Bereich des Bauteils keine Kontaktfläche aufweist. Auf diese Weise kommt es nicht zum Kontakt zwischen Stempel und Bauteil.

Die Flächenpressung ist ferner sehr gering, so dass der Wärmeübergang hier nur einen geringen Beitrag zur Abkühlung des Bauteils leistet. Durch diese Ausbuchtung im Werkzeug ist ein „Wärmedepot“ vorhanden. Dieses Wärmedepot kann beispielsweise dazu genutzt werden, bestimmte Bauteilbereiche nicht gänzlich aushärten zu lassen und auf diese Weise eine beanspruchungsgerechte Restduktilität im Bauteil zu belassen.

4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag konnte dargestellt werden, dass das Presshärten mit Hilfe von Schalenelementen für Haltezeiten bis circa 5 Sekunden im Werkzeug modelliert werden kann. Darüber hinaus sind die Experimente und die Berechnungen in guter Übereinstimmung. Grundlage hierzu sind thermische Auswertungen der FEM und deren Vergleich mit einer Videothermografieanalyse. Darüber hinaus können die Abkühlraten im Bauteil ermittelt und eine Voraussage über das Gefüge im Bauteil getroffen werden. Die numerisch erworbenen Erkenntnisse sind die Grundlage für die Prozessauslegung und -optimierung im Rahmen einer numerischen Methodenplanung bei der Warmumformung höchstfester Vergütungsstähle.

Bei der Durchführung der Presshärtversuche wurde das Werkzeugsystem, das innerhalb der DFG-Forschergruppe FOR552 ausgelegt und gefertigt wurde, verwendet. Anhand des modular aufgebauten Werkzeugsystems und integrierter Messvorrichtungen können Bauteile unterschiedlicher Komplexität hergestellt und die relevanten Prozessparameter aufgenommen werden.

5 Literatur

- [1] Sikora, S.; Lenze, F.-J.: Hot-Forming-Process Important Parameters for the Production of High-Strength BIW Parts. International Deep Drawing Research Group IDDRG 2006, Porto, Seite: 295-301
- [2] Kolleck, R.; Lenze, F.-J.: Warmumformung und Kaltumformung - zwei ergänzende Verfahren für den Karosserieleichtbau. In: Siegert, K. (Hrsg.), Neuere Entwicklungen in der Blechumformung, Werkstoffinformationsgesellschaft, Frankfurt 2004, Seite: 345-254
- [3] Nicolas, Y.: Hot Stamping – eine neue Warmumformtechnologie. ThyssenKrupp techforum, Juli 2005, Seite: 40-47
- [4] Kolleck, R.; Pfanner, S.; Herbiert, K.; Lind, C.: Press Hardening of Boron Steel Sheets – Forming and Tooling Technology with high Potential. International Deep Drawing Research Group IDDRG 2005, Besancon, Seite: 1-10
- [5] Winkel, J.: Presshärten von Stahlblech – Potenzierete Festigkeitswerte. Automotive Materials, 04(2004), Seite: 18-20
- [6] Haller, D.: Anlagen zur Verarbeitung innovativer Blechwerkstoffe. EFB-Kolloquium, Tagungsband: T 24. Lösungen für die Verarbeitung moderner Blechwerkstoffe, Stuttgart, 2004
- [7] Kolleck, R.; Steinhöfer, D.; Feindt, J.-A.: Warmumformung und Kaltumformung – zwei ergänzende Verfahren für den Karosserieleichtbau. In: Siegert, K. (Hrsg.), Neuere Entwicklungen in der Blechumformung. Werkstoffinformationsgesellschaft, Frankfurt 2004, Seite: 245-254
- [8] Austerhoff, N.; Rostek, W.: Hot stamping und Wärmebehandlung von höchstfesten Stählen am Beispiel der Karosserie- und Fahrwerkbauteile. In: Tagungsband 5. Europäische Karosserie-Leichtbau-Konferenz „Stahl-Spaceframes contra Schalenbauweise“, Bad Neuheim, 2002, Seite: 1-10
- [9] Tröster, T.; Rostek, W.: Innovative Warmumformung. In: Siegert, K. (Hrsg.), Neuere Entwicklungen in der Blechumformung. Werkstoffinformationsgesellschaft, Frankfurt 2004, Seite: 51-65
- [10] Tekkaya, A.E.; Karbasian, H.; Homberg, W.; Kleiner, M.: Thermo-mechanical Coupled Simulation of Hot Stamping Components for Process Design, Production Engineering Research and Development, Volume 1, August 2007, Seite: 85-89.