

Ansätze zur Erzeugung duktiler Bauteilbereiche beim Formhärten

Bernd-Arno Behrens^a, Florian Nürnberger^b, Sven Hübner^a, Masood Jalanesh^a, Florian Bohne^a, Jörn Wehmeyer^a, Oleksandr Golovko^b, Sinan Yarcu^a, Kai Wölki^{*a}

^aInstitut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover

^bInstitut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover

*woelki@ifum.uni-hannover.de

Einleitung

Formgehärtete Bauteile werden aufgrund des großen Leichtbaupotenzials häufig in Karosseriestrukturen eingesetzt. Beim Formhärten werden die Prozessschritte des Umformens und der Wärmebehandlung miteinander vereint, indem eine Platine aus härtbarem Stahl auf etwa 930 – 950 °C erwärmt wird, um ein austenitisches Gefüge zu erzeugen. Anschließend wird das Blech in einem wassergekühlten Umformwerkzeug umgeformt und gleichzeitig abgeschreckt, was eine martensitische Umwandlung hervorruft. Der Martensit entsteht hierbei durch ein diffusionsloses Umklappen des kubisch-flächenzentrierten Gitters zu einem tetragonal raumzentrierten Gitter. Mittels Formhärten lassen sich auf diese Weise geometrisch komplexe Bauteile mit hohen Festigkeiten herstellen. Ein mit der hohen Härte bzw. Festigkeit einhergehender Nachteil ist jedoch die anschließend eingeschränkte mechanische Fügbarkeit dieser Bauteile. Sowohl aus diesem Grund als auch der erhöhten Crashperformance ist der Bedarf nach formgehärteten Bauteilen mit lokal angepassten Festigkeitseigenschaften gestiegen. Grundsätzlich können formgehärtete Bauteile mit gradierten Eigenschaften auf drei verschiedenen Arten hergestellt werden: Partielles Austenitisieren der Platine vor dem Formhärten [1], lokal variierende Abkühlung vor bzw. während der Umformung [2] und partielles Anlassen nach dem Formhärten [3].

Im vorliegenden Whitepaper werden zwei unterschiedliche Ansätze (Ofenmaskierung, Temperierstation) vorgestellt, mit denen sich lokal definierte Bereiche mit reduzierter Festigkeit im Bauteil erzeugen lassen. Zum einen wird während der industriell praxisüblichen Erwärmungsphase im Ofen ein Maskierungskonzept für die Blechplatine verwendet, die geometrisch an die Bereiche angepasst werden kann, in denen das Bauteil nach dem Formhärten eine höhere Duktilität aufweisen soll. Durch die Maskierung wird aufgrund der Wärmekapazität und der Isolierwirkung während der Ofenverweildauer die Erwärmung des Blechwerkstoffs lokal verringert, woraus eine auf die nicht abgedeckten Bereiche begrenzte Austenitisierung resultiert. Zum anderen kann die Prozesskette verändert werden, sodass im Anschluss an das Erwärmen der Platinen im Ofen und vor deren Transfer zum Umformwerkzeug der Zwischenschritt einer lokalen Vorkühlung integriert werden. Bei dieser werden definierte Bereiche der Platine in einer Temperierstation mit einem einphasigen Kühlmedium (Luft) vorgekühlt, so dass sich in diesen Werkstoffbereichen bei dem anschließenden

Formhärten ein duktileres Gefüge bildet. Dabei werden diffusionsgesteuerte Prozesse angestrebt, um bainitische Bereiche mit gegenüber dem Martensit verringerter Festigkeit lokal auszubilden. Das Prinzip zur Nutzung einer Temperierungsstation konnte beim Formhärten bereits erfolgreich zur Reduzierung von Prozesszeiten eingesetzt werden [4-6]. Formgehärtete Bauteile wurden innerhalb dieser modifizierten Prozesskette frühzeitig bei erhöhten Temperaturen aus dem Formhärtewerkzeug entnommen und durch die Temperiereinheit mit Hilfe eines Sprayfelds (Wasser-Luft-Gemisch) lokal abgekühlt. Aufgrund der sehr kurzen Haltezeit im Werkzeug und einer kurzen Verweildauer in der Temperierungsstation konnte die üblicherweise verwendete Haltezeit im Werkzeug verkürzt und eine wirtschaftlichere Gestaltung des Formhärteprozesses ermöglicht werden.

Ofenmaskierung

Die Beeinflussung der Bauteiltemperatur vor dem Formhärten während der Austenitisierungsphase im Ofen ist eine bereits bekannte Methode zur Einstellung von lokal variierenden Eigenschaften. Beispielsweise wurde in [7] die Wärmeleitung im unteren Bereich einer B-Säule durch isolierende Materialien signifikant verringert. Auf diese Weise wird eine Austenitisierung vermieden und folglich besitzen die maskierten Bereiche eine höhere Duktilität bzw. Umformbarkeit im Vergleich zu den austenitisierten und anschließend formgehärteten Zonen. Ferner werden in [8] Maskierungen während der Erwärmung im Ofen eingesetzt, wobei die Maskierung die Form des späteren Bauteils besitzt. Die Maskierung wird durch mindestens zwei Formschalen realisiert, die von beiden Seiten an das Formhärtebauteil angelegt werden. Es wird empfohlen Metalle, Keramiken oder hitzebeständige Fasermaterialien als Abdeckmaterialien zu verwenden. Im Folgenden wird ein neuartiger Ansatz vorgestellt, der auf den zuvor beschriebenen Verfahren beruht, jedoch kostengünstig realisiert werden kann.

Grundsätzlich besteht das industrielle Maskierungskonzept aus zwei verschiedenen Einheiten: Greifer und Maskierungsgestell, siehe Abbildung 1.

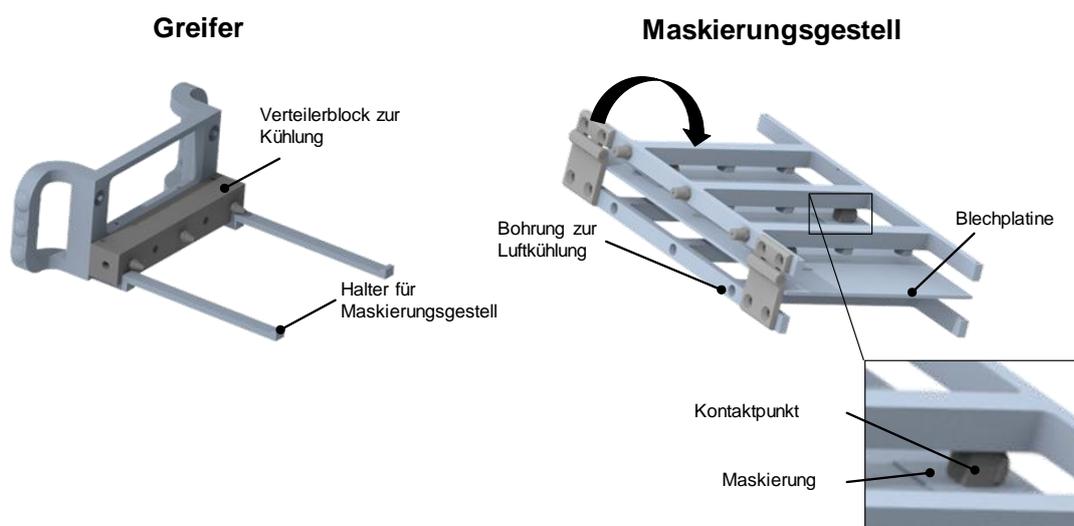


Abbildung 1: Konzept der Maskierung bestehend aus Greifer (links) und Maskierungsgestell (rechts)

Die Vorrichtung besteht aus zwei Einheiten (Greifer und Maskierungsgestell), die voneinander trennbar sind. Das Maskierungsgestell verbleibt während der Erwärmungsphase im Ofen, während der Greifer lediglich für den Transport eingesetzt wird. Der Greifer besteht aus Aluminium-Bügelgriffen sowie Baustahl (1.0570) und besitzt darüber hinaus einen Verteilerblock für eine Luftkühlung. Das Maskierungswerkzeug kann mit diesem nach dem Auswerfen der Formhärteplatine mit Druckluft gekühlt werden. Der Maskierungsrahmen kann manuell eingesetzt und entfernt werden und besteht aus einem hitzebeständigem Edelstahl (1.4571).

In Vorversuchen wurden unterschiedliche Maskierungswerkstoffe (Keramik, nichtrostende Stähle) auf ihre Eignung hin untersucht [9]. Dabei wurden sowohl die Anordnung (einseitig, zweiseitig) als auch die Dicke (1 mm, 2 mm, 3 mm) der Materialien variiert. Zugleich wurde festgestellt, dass mit dem Edelstahl X2CrTiNb18 sowohl in 2 mm als auch in 1 mm Blechdicke einerseits die Eignung zur hinreichenden Reduzierung des Wärmestroms vorhanden ist, als auch eine geeignete Abstufung vom gehärteten zum duktilen Gefüge möglich ist. Bei der Verwendung der Keramik HT175 erfolgte keine diffusive Umwandlung der AlSi-Schicht, was notwendig wäre für einen ausreichenden Korrosionsschutz. Darüber hinaus war ein scharfer Übergangsbereich (von hoher zu niedriger Festigkeit) vorhanden. Härtemessungen zeigten darüber hinaus, dass mit einer steigenden Anzahl von Maskierungslagen die Übergangsfläche abnimmt. Bei Einsatz einer zweiseitigen Maskierung (X2CrTiNb18) mit einer Dicke von je 1 mm konnte eine maximale Härte­differenz von 167 HV und bei einer Dicke von je 2 mm eine maximale Härte­differenz von 279 HV per 3MA (Multi-Parameter Mikro-Magnetische Mikrostruktur- und Spannungsanalysator) gemessen werden.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde bei den folgenden Versuchen die zuvor vorgestellte Vorrichtung des Maskierungskonzeptes eingesetzt. Als Maskierungswerkstoff wurde der Edelstahl X2CrTiNb18 mit den Abmessungen 50 mm x 50 mm in einer Dicke von 1 mm verwendet. Das Maskierungsgestell verblieb zusammen mit der Formhärteplatine in einem Ofen bei einer Temperatur von 950 °C für 6 min. Nach der Austenitisierung wurde das Maskierungsgestell inklusive Formplatine mit dem Greifer händisch aus dem Ofen entfernt und auf eine Zwischenstation abgelegt. Auf dieser wurde das Gestell geöffnet und die partiell austenitisierte Formhärteplatine in das Plattenwerkzeug transferiert und formgehärtet. Innerhalb der Versuchsreihe wurde die Anzahl der Blechlagen variiert. Es wurden sowohl eine Maskierung mit einem Blech je Seite als auch eine Maskierung mit drei Blechen je Seite untersucht. Die Auswertung der Versuche erfolgte anhand von metallographischen Gefügebildern und Härtemessungen, siehe Abbildung 2.

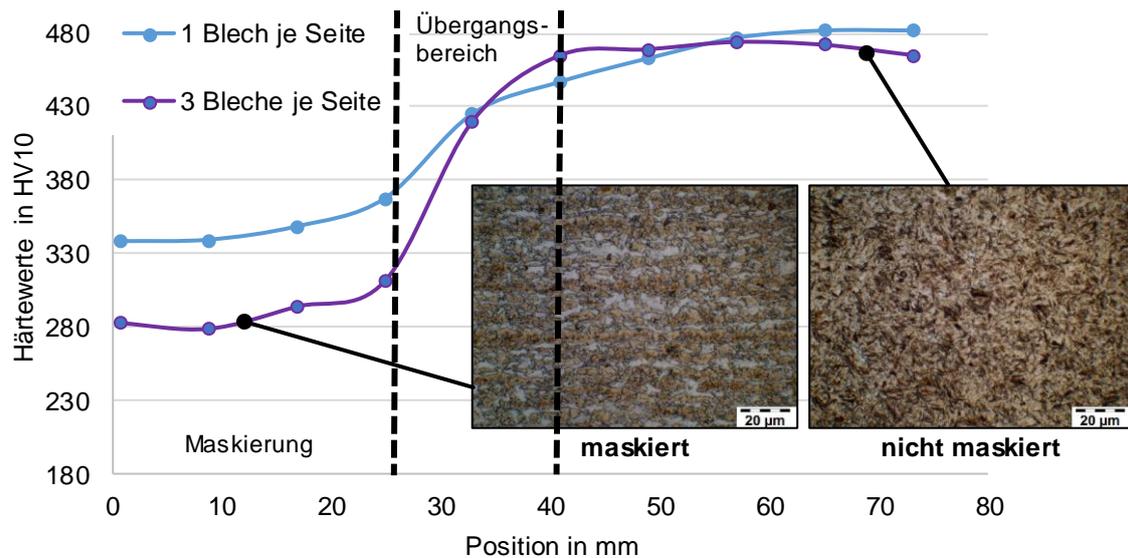


Abbildung 2: Gemessene Härtewerte und metallographische Gefügebilder (Ätzung: 2% HNO₃) bei einer Maskierung von 50 mm x 50 mm mit unterschiedlichen Maskierungslagen

Wie anhand von Abbildung 2 zu erkennen ist, lassen sich mit dem Maskierungskonzept bei Verwendung von einem Blech je Seite Härtewerte von etwa 340 HV erreichen. Im Vergleich dazu lassen sich bei Einsatz von drei Blechen je Seite die Härtewerte auf 280 HV reduzieren. In diesem Fall resultieren jedoch steile Übergänge von der duktilen zur harten Zone mit der Folge einer möglichen Kerbwirkung. Um einen derartigen versagensanfälligen Bauteilbereich zu verhindern, sollte daher ein Blech je Seite eingesetzt werden. Weiterhin sind in der Abbildung die unterschiedlichen Gefüge dargestellt. Während bei den maskierten Bereichen (duktile Zonen) im Wesentlichen ein ferritisch-perlitisches Ausgangsgefüge vorliegt, ist bei den nicht maskierten Arealen nach dem Formhärten ein martensitisches Gefüge ersichtlich. Basierend auf den vorliegenden Ergebnissen ergibt sich weiterhin Optimierungspotenzial. Unter Einsatz der numerischen Simulation könnte sowohl die Maskierungsdicke als auch die – geometrie für diesen Anwendungsfall optimiert werden. Da bei Einsatz einer Maskierung mit jeweils einem Blech je Seite die Austenitisierung nicht vollständig unterbunden werden konnte, sollte unter Einsatz numerischer Simulationen die Maskierungsdicke und die Maskierungsgeometrie optimiert werden, sodass im maskierten Bereich die Austenitisierung vollständig verhindert und folglich das ferritisch-perlitische Ausgangsgefüge mit seinen geringen Härtewerten erhalten bleibt.

Temperierungsstation

Ein weiterer Ansatz zur Erzeugung maßgeschneiderter Eigenschaften beim Formhärten ist der Einsatz einer dem Ofenprozess nachgeschalteten Temperierungsstation. Mit Hilfe dieses Verfahrens ist es möglich, Teilbereiche der Platine vor Beginn des eigentlichen Formhärten gezielt vorzukühlen, sodass sich nach der Umformung bei gleichförmigen Abkühlraten im Formhärtewerkzeug bainitische Gefüge lokal mit verringerter Festigkeit ausbilden. Die Verweildauer und

die Abkühlbedingungen müssen in der Temperierungsstation derart gewählt werden, dass eine geeignete Platinentemperatur sichergestellt werden kann. Die Verwendung einer Temperierungseinheit bietet im Vergleich zum Maskierungskonzept den Vorteil, dass keine aufwändige Ofentechnik eingesetzt werden muss und dass auf Absorbermassen verzichtet werden kann.

Grundsätzlich besteht die Temperierungsstation aus einem Düsenfeld, das zur Vorkühlung eingesetzt wird, sowie der dazugehörigen Peripherie (Messrechner, Kesselwagen). Der Kesselwagen dient dabei zur Versorgung des Düsenfelds mit Druckluft. Mit Hilfe von Proportional-Druckregelventilen, die über eine Messkarte die einzelnen Ventile ansteuern, lässt sich ein definierter Luftdruck erzeugen.

Das grundlegende Prinzip zur gezielten Wärmeabfuhr vor dem eigentlichen Formhärten und folglich zur Erzeugung duktiler Bereiche ist in Abbildung 3 (rechts) dargestellt.

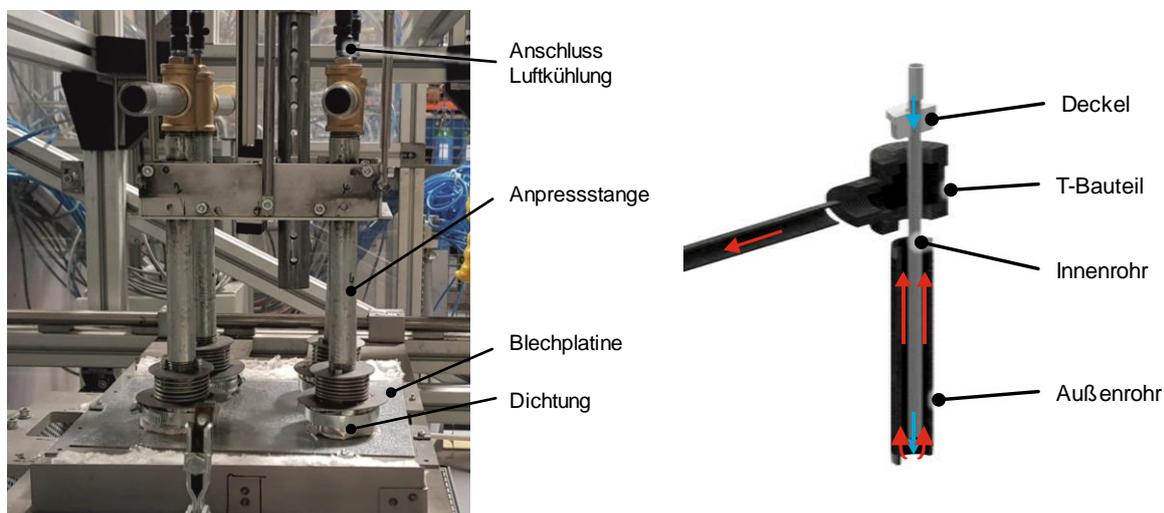


Abbildung 3: Aufbau des Kühlungskonzeptes zur Erzeugung von vier duktilen Fügezonen (links) sowie das schematische Konzept zur gezielten Wärmeabfuhr (rechts)

Das Konzept besteht aus einem koaxialen Rohrsystem, mit dem die Vorkühlung der Blechplatte durch das innere Rohr (Werkstoff: Kupfer, Durchmesser: 6 mm) mittels Druckluft erfolgt (blauer Pfeil). Das äußere Rohr besitzt zwei Funktionen: zum einen wird die Wärme abtransportiert (roter Pfeil) und zum anderen begrenzt es den abzukühlenden Bereich auf eine definierte Fläche. Zur Erzeugung von mehreren duktilen Fügezonen, wurden insgesamt vier koaxiale Rohrsysteme eingesetzt, siehe Abbildung 3 (links). Der Aluminiumrahmen wird dabei durch zwei Führungsstangen über Gleitführungen stabilisiert, um Schwingungen der Kühlvorrichtung beim Hoch- und Herunterfahren zu unterbinden. Der gesamte Aufbau ist in vertikaler Richtung verfahrbar und wird mit einem Pneumatikzylinder angetrieben. Es wurde eine Dichtung entwickelt und montiert, um ein seitwärtiges Ausströmen der Luft aus dem koaxialen Rohrsystem zu verhindern. Die Dichtung wurde derart konzipiert, dass etwaige Unebenheiten der Platine kompensiert werden können, da die Formhärteplatte nach dem Erwärmungsprozess im Kammerofen einen gewissen Verzug aufweisen kann. Die wichtigsten Komponenten der Dichtung sind dabei ein O- sowie Dichtring, eine

Feder und Dämmwolle. Der O-Ring bewirkt ein Gelenkspiel, welches den Unebenheiten der Blechplatte entgegenwirkt. Die Dämmwolle dient zur Aufrechterhaltung der Temperatur. Beim Herunterfahren der Kühlvorrichtung wird die Feder eingedrückt und sorgt folglich für einen ausreichenden Anpressdruck auf die Platine.

In Vorversuchen wurde ermittelt, welcher Luftdruck und Zeitraum geeignet ist, um zu verhindern, dass die kritische Abkühlgeschwindigkeit von 27 K/s überschritten wird. Es wurde festgestellt, dass Drücke von 0,5-0,7 bar zielführend sind. Alle höheren Luftdrücke führen zumindest teilweise zu Abkühlraten oberhalb von 27 K/s. Zur Erzeugung von möglichst duktilen Bereichen wurde der Luftdruck für die weiteren Versuche daher auf 0,5 bar festgelegt. Aus dem ZTU-Diagramm des Versuchswerkstoffes 22MnB5 geht hervor, dass die Temperaturen zur Bildung eines bainitischen Gefüges zwischen 650 °C und 370 °C mit Abkühlzeiten zwischen 15 s und 100 s liegen. Folglich wurden die zu untersuchenden Zieltemperaturen der vorzukühlenden Bereiche bei Entnahme aus der Temperierungsstation auf 600 °C, 500 °C, 450 °C, 400 °C und 350 °C begrenzt. Im Anschluss wurden die Platinen in einem Wasserbad abgeschreckt.

Um den Einfluss der partiellen Abkühlung auf die mechanischen Eigenschaften zu untersuchen, wurden Härtemessungen an unterschiedlichen Bereichen der formgehärteten Platine durchgeführt. Die Härteprüfung erfolgte nach Vickers entsprechend der DIN EN ISO 6507. Es wurde eine Diamantpyramide mit einer Prüfkraft von 10 N auf die Oberfläche des zu untersuchenden Werkstoffes gedrückt. Darüber hinaus wurden metallographische Gefügeuntersuchungen durchgeführt. Einige exemplarische Versuchsergebnisse der gemessenen Härtewerte inklusive metallographischer Gefügebilder verschiedener Härtezone sind in Abbildung 4 dargestellt.

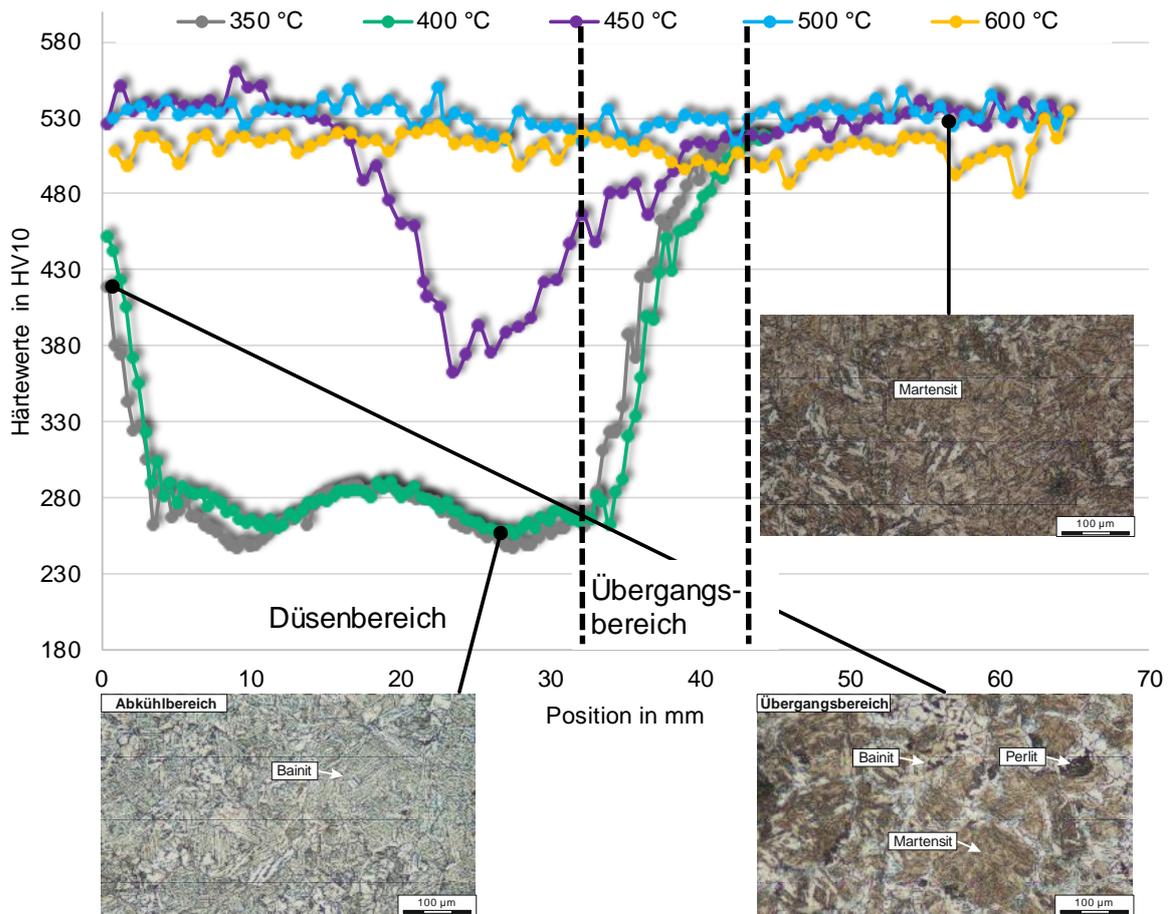


Abbildung 4: Gemessene Härteverläufe bei unterschiedlichen Abkühltemperaturen unter Verwendung der Temperierungsstation sowie metallographische Gefügebilder einzelner Härteverläufe

Wie aus Abbildung 4 ersichtlich ist, führen die verschiedenen Zieltemperaturen der Vorkühlung zu unterschiedlich resultierenden Härteverläufen nach dem anschließenden Abschrecken. Bei Verwendung von Temperaturen zwischen 500 °C und 600 °C (blaue, gelbe Kurve) treten keine signifikanten Änderungen im Abkühlbereich, in der Übergangszone sowie den ungekühlten Bereichen in den Härteverläufen auf. Die Härteverläufe liegen nahezu alle auf einem identischen Niveau. Folglich sind diese Temperaturen zur Erzeugung eines weichen Bereiches ungeeignet. Erste deutlich sichtbare Änderungen im Härteverlauf sind bei einer Abkühlung auf 450 °C (lila Kurve) zu sehen. Es tritt eine Abnahme auf eine Härte von etwa 360 HV10 auf. Die Größe des duktilen Bereiches beschränkt sich dabei auf ca. 6 mm. Wird der Übergangsbereich hinzugezogen, wurde insgesamt ein Areal mit einem Durchmesser von ca. 11 mm lokal in der Duktilität gesteigert. Die besten Ergebnisse im Hinblick auf duktile Bereiche, bei denen vollständig bainitische Gefüge erzeugt worden sind, werden bei Vorkühltemperaturen von 350 °C und 400 °C erreicht. Innerhalb dieser beiden Versuchsreihen konnten keine signifikanten Unterschiede bezüglich resultierender Härteverläufe festgestellt werden. Bei beiden Versuchsreihen wird eine Härte von etwa 250 HV10 erreicht. Der Durchmesser des erzeugten duktilen Bereiches inklusive Übergangszone beträgt ca. 30 mm. Wie Abbildung 4 zu entnehmen ist, lag im vorgekühlten Bereich ein vollständig bainitisches Gefüge vor, während in der

Übergangszone ein Mischgefüge aus Martensit, Perlit und Bainit zu beobachten ist. Außerhalb des vorgekühlten Bereiches lag nach dem Abschrecken ein Gefüge aus Martensit vor.

Zusammenfassung

Im vorliegenden Whitepaper wurden zwei Ansätze vorgestellt, welche die Erzeugung gradiert Bauteileigenschaften beim Formhärten auf unterschiedliche Weise ermöglichen.

Die gezielte Beeinflussung bzw. Unterdrückung der Austenitisierung im Ofen stellt eine Möglichkeit dar, um in ausgewählten Bereichen eine höhere Duktilität zu erzielen, da ein Härten in diesen Bereichen nicht möglich ist. Mit Hilfe des vorgestellten Konzeptes konnte eine partielle Austenitisierung des Ausgangswerkstoffs erzielt werden. Hierfür wurde die Formhärteplatte vor dem Einlegen in den Ofen mit einer Maskierung versehen. Während der Erwärmungsphase im Ofen wurden daher nur bestimmte Zonen auf Temperaturen oberhalb der Austenitisierungstemperatur erwärmt. In den Bereichen, die keine Austenitisierung erfahren haben, lag nach dem Formhärten ein ferritisch-perlitisches Ausgangsgefüge vor. Folglich resultierte eine lokal gesteigerte Duktilität und eine reduzierte Härte in diesen Bereichen. Die Härte konnte bei diesem Ansatz auf einen Wert von etwa 280 HV verringert werden.

Durch den Einsatz einer Temperierstation konnten die Auswirkungen einer partiellen Temperaturführung in unterschiedlichen Bereichen der Formhärteplatte untersucht werden. Es wurde festgestellt, dass sich bei Vorkühltemperaturen auf 350 °C bzw. 400 °C duktile Bereiche erzeugen ließen. Basierend auf diesen Versuchsparametern konnte die Härte von 530 HV auf 250 HV reduziert und ein bainitisches Gefüge erzeugt werden. Mit Hilfe dieser Zwischenstation, die eine Temperierung nach dem Ofenprozess und unmittelbar vor dem Formhärteprozess ermöglicht, lassen sich möglicherweise gradierte Härteverläufe und folglich maßgeschneiderte Bauteileigenschaften erzeugen.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung der Erkenntnistransfer-Projekte „Erzeugung von Bereichen mit reduzierter Festigkeit an formgehärteten Bauteilen mittels einer Temperierstation“ (Projektnummer 313453754) sowie „Partielles Formhärten durch Einsatz einer Maskierung im Ofenprozess“ (Projektnummer 310404283) und der Volkswagen AG für die Kooperation und Bereitstellung des Stahlwerkstoffs.

Literaturverzeichnis

- [1] Zimmermann, F.; Volk, W.; Spörer, J.; Pfestorf, M.: Aktuelle Anwendungen im Bereich der Warmumformung höchstfester Stahlgüten im Karosseriebau und zukünftige Trends. Tagungsband, 6. Erlanger Workshop Warmblechumformung, Erlangen, 2011, pp. 81-94

- [2] Galdos, L.; Sanz de Argandona, E.; Ortubay, R.: Towards the Generation of Tailored Tempered Components: Concept Definition and Process Parameters Optimization. In: IDDRG Conference 2013 Zurich, Switzerland. Pp.425-430
- [3] Zimmermann, F.; Spörer, J.; Maier-Komor, P.; Rank, G.; Volk, W.: Partielles Flammanlassen von pressgehärteten Stählen und die Auswirkungen auf Oberfläche und Verzug. Tagungsband, 8. Erlanger Workshop Warmblechumformung, Erlangen, 2013, pp. 34-48
- [4] Behrens, B.-A.; Moritz, J.; Schrödter, J.; Bach, F.-W.; Diekamp, M.: Prozessoptimierung beim Presshärten. AiF-Abschlussbericht, Europäische Forschungsvereinigung für Blechverarbeitung e. V., Hannover, 2013.
- [5] Behrens, B.-A.; Bouguecha, A.; Hübner, S.; Moritz, J.; Schrödter, J.; Bach, F.-W.; Nürnberger, F.; Diekamp, M.: Prozessoptimierung beim Presshärten. EFB-Kolloquium: Umformen, Schneiden, Verbinden im Leichtbau, 16.-17.04.2013, Fellbach, 2013.
- [6] Behrens, B.-A.; Bach, F.-W.; Diekamp, M.; Hübner, S.; Nürnberger, F.; Schrödter, J.; Wolf, L.; Moritz, J.: Process Time Reduction of Hot Stamping by Means of Early Extraction from the Press, In: 4th International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel, 9-12.06.2013, Lulea, Schweden, pp. 259-266, 2013.
- [7] DE20014361U1: B-Säule für ein Krafffahrzeug / Partielle Abdeckung. Benteler-Werke AG (2000).
- [8] EP2264193A1: Herstellung eines partiell pressgehärteten Blechbauteils. BMW AG (2010).
- [9] Behrens, B.-A.; Hübner, S.; Chugreev, A.; Bohne, F.; Seel, A.; Jalanesh, M.; Wölki, K.: Investigation of masking concepts for influencing the austenitization process during press hardening. In: Procedia Manufacturing, Volume 15, (2018), pp. 1095-1102.