

Zerstörungsfreie Prüfung pressgehärteter Karosserieteile mit 3MA

Christian CONRAD*, Rolf KERN*, Harald KOPP*, Bernd WOLTER*
* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP

Kurzfassung. Verstärkungselemente der Automobilkarosserie wie B-Säule, Längsträger und Tunnelverstärkung werden aus höchstfesten Stählen gefertigt, um das Fahrzeuggewicht zu minimieren und die Crash-Sicherheit zu maximieren. Bei der Fertigung dieser Bauteile setzen Hersteller und Zulieferer der Automobilindustrie vermehrt auf das sogenannte Presshärten von Bauteilen aus härtbarem borlegiertem Stahl. Denn dieses Verfahren stellt eine gute Umformbarkeit und gleichzeitig ein Höchstmaß an Crash-Festigkeit sicher. Beim Presshärten werden die umzuformenden Platinen in einem Durchlaufofen austenitisiert und anschließend in einer speziellen, wassergekühlten Presse umgeformt und gleichzeitig abschreckgehärtet. Dieser hochkomplexe Fertigungsprozess muss kontinuierlich überwacht und die Fertigungsqualität der Produkte muss durch stichprobenartige Prüfung der mechanisch-technologischen Kenngrößen sichergestellt sein. Werden hierfür zerstörende Prüfverfahren eingesetzt, so ist der Prüfaufwand enorm. Der damit verbundene Zeit- und Kostenaufwand steht einer Erhöhung von Produktivität und Wirtschaftlichkeit im Wege. Am IZFP ist es gelungen, für diese Prüfaufgabe ein zerstörungsfreies Prüfverfahren zu qualifizieren. Eingesetzt wird die sogenannte 3MA-Prüftechnik, die eine gerätetechnische und methodische Kombination von vier elektromagnetischen Prüfverfahren zur Werkstoffcharakterisierung darstellt. Mit 3MA gelingt es, mehrere relevante Qualitätsmerkmale des Werkstoffs, z. B. die Härte und die Kenngrößen des Zugversuchs gleichzeitig zu bestimmen. Für diese Anwendung wurde 3MA validiert und wird mittlerweile in vielen Unternehmen eingesetzt, die pressgehärtete Bauteile herstellen.

1. Einführung

Presshärten oder auch Formhärten ist ein Verfahren zur Herstellung von hochfesten Verstärkungselementen der Automobilkarosserie, wie B-Säule, Längsträger und Tunnelverstärkung, die dem Insassenschutz im Crash-Fall dienen. Das Verfahren wurde schon 1973 patentiert und wird in der automobilen Serienproduktion seit 1986 bereits eingesetzt, spielte zunächst aber eher eine untergeordnete Rolle [1]. Erst in jüngster Zeit entwickelte es sich zu einem der wichtigsten Herstellungsverfahren der Karosserieproduktion. 1987 wurden weltweit ca. 3 Mio. pressgehärtete Bauteile produziert und 10 Jahre später waren es etwa 10 Mio. Die Jahresproduktion stieg 2007 sprunghaft auf 100 Mio. an, liegt heute bei über 150 Mio. und soll bis 2015 auf rund 600 Mio. Stück pro Jahr wachsen [2].

Die Ursachen für diesen starken Zuwachs finden sich im enormen Leichtbaupotential bei gleichzeitig hoher Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Der Werkstoff ist während des Umformens weich und duktil, so dass sich komplexe Bauteilgeometrien mit hoher Maßhaltigkeit realisieren lassen. Im Endzustand liegen Festigkeiten von bis zu 2000 MPa vor.

Hierdurch wird ein optimaler Insassenschutz beim Crash gewährleistet und gleichzeitig der hierfür erforderliche Materialeinsatz und damit das Bauteilgewicht reduziert.

Weitere Vorteile im Vergleich zu anderen Umformverfahren ergeben sich durch die einfache Herstellbarkeit von Bauteilen mit lokal maßgeschneiderten (engl. tailored) Eigenschaften [3]. Solche Bauteile ermöglichen es, das lokale Verformungsverhalten individuell an die beim Crash auftretenden Belastungen anzupassen. Bauteile mit gradierten Eigenschaften sind aber auch bzgl. der Weiterverarbeitung vorteilhaft. So erleichtert eine im Flanschbereich reduzierte Härte bzw. Festigkeit das Besäumen oder das mechanischen Fügen der Bauteile.

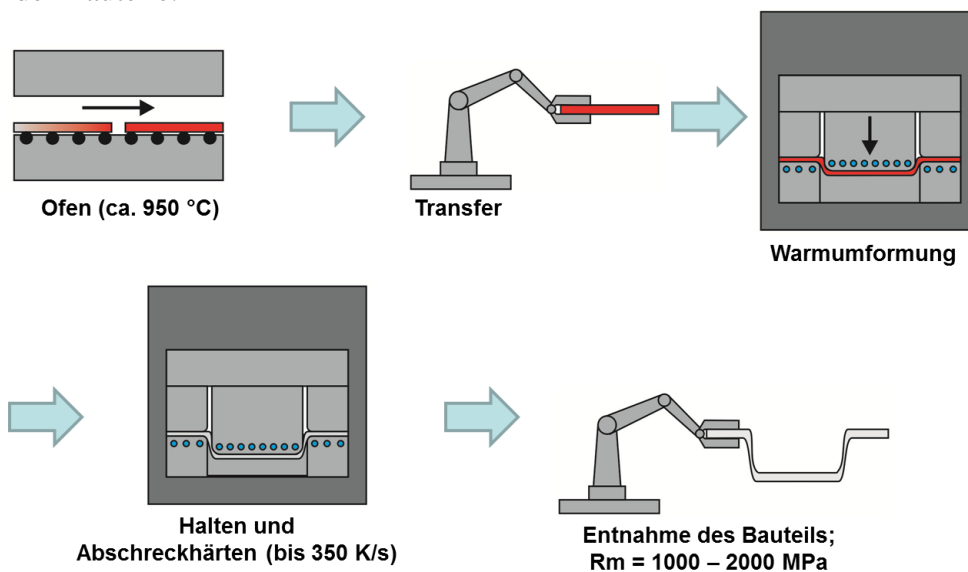


Abbildung 1. Prozessablauf beim direkten Presshärten

Der direkte Presshärteprozess wird schematisch in Abbildung 1 erläutert. Hier kommen ebene Platinen aus einem härtbaren borlegierten Stahl (z.B. 22MnB5) zum Einsatz. Zunächst werden die von einem Coil vereinzelt Platinen mit ferritisch-perlitischen Ausgangsgefüge ($R_m \approx 500 - 700 \text{ MPa}$) homogen oder partiell im Ofen auf eine Temperatur oberhalb der werkstoffspezifischen A_{c3} -Temperatur (ca. 950°C) erwärmt, d.h. austenitisiert. Der Ofen kann dabei als Durchlaufofen ausgelegt sein, wie in Abbildung 1 dargestellt. Auch stationäre Öfen sind bekannt, welche aus Einzelstacks aufgebaut sind. Nach dem Aufheizen wird die Platine mittels Transfervorrichtung (z.B. Roboter) aus dem Ofen entnommen und in das Presswerkzeug eingelegt.

Die Platine wird nun schnell zu einem Blechbauteil umgeformt. Da dies bei noch hohen Temperaturen geschieht, sind die erforderlichen Umformkräfte gering. Anschließend wird das Bauteil im geschlossenen Presswerkzeug gehalten, welches mit speziellen Kühlkanälen durchzogen ist, durch das ein Kühlmittel, zumeist Wasser, fließt. Das Bauteil wird nun homogen oder ggf. auch nur lokal (partiell) oberhalb einer werkstoffspezifischen kritischen Abkühlrate (d.h. mind. 27 K/s , oft bis 350 K/s) abschreckgehärtet. Im umgeformten, abschreckgehärteten Bauteil liegt ein martensitisches Gefüge vor, welches je nach Temperaturroute beim Aufheizen und Abkühlen entweder homogen ausgebildet ist oder partiell auch weichere Bereiche mit Mischgefügen (Bainit, Ferrit, Perlit, etc.) aufweisen kann.

Meist verarbeitet man beschichtete Platinen, um im Ofen eine Verzunderung der Oberfläche zu verhindern, anschließend eine gute Umformbarkeit mit geringem Reibwert zu gewährleisten und letztlich das entstandene Bauteil vor Korrosion zu schützen. Typischerweise kommt eine AlSi-Beschichtung zum Einsatz, die durch Feueraluminierung aufgebracht wird. Daneben kennt man organisch-anorganische Beschichtungen mit Al- und Mg-Partikeln. Aufgrund der Forderung nach kathodischem Korrosionsschutz werden in jüngster Zeit auch verschiedene Zn- und Zn-Ni-Beschichtungen eingesetzt. Daneben sind weitere Beschichtungssysteme entwickelt worden [4]. Üblicherweise bildet sich erst während des Aufheizens der Platine im Ofen eine Diffusionsschicht aus Grundmaterial und Beschichtung aus, die für die spätere Umformbarkeit erforderlich ist (siehe Abbildung 2).

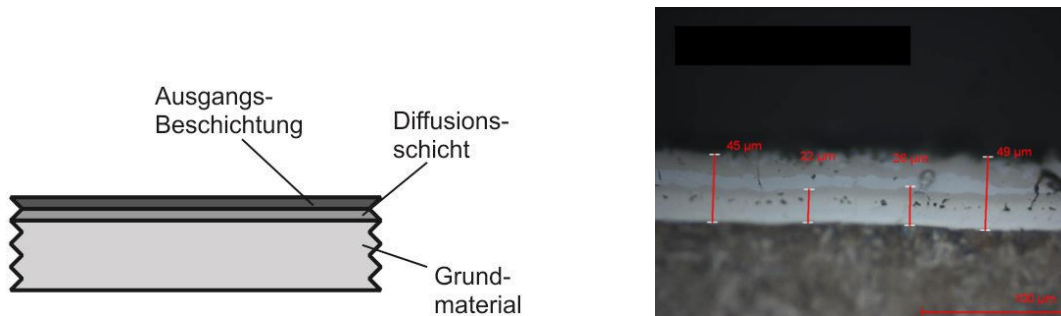


Abbildung 2. Beschichtungssystem mit Diffusionsschicht; schematische Darstellung (links) und mikroskop. Aufnahme am Schriff (rechts).

2. Ausgangssituation und Aufgabenstellung

Beim Presshärten werden die mechanisch-technologischen Eigenschaften des Stahls nicht bei der Stahlproduktion sondern erst bei der Stahlverarbeitung eingestellt. Um diese für das Crash-Verhalten relevanten Eigenschaften in der gewünschten Ausprägung einzustellen, sind die Stellgrößen des Prozesses, wie Durchlaufzeit und Temperaturführung im Ofen, die Haltezeit im Transfer, die Schließ-, Halte- und Öffnungszeit der Presse, sowie deren Stempelkraft und Kühlmittelzufuhr in engen Grenzen zu führen. Daneben sind potentielle Störgrößen zu berücksichtigen, wie sie sich u. a. aus dem Verschleiß des Presswerkzeugs oder Störungen im Kühlkreislauf ergeben. Weiterhin muss dafür gesorgt werden, dass sich im Ofen eine Diffusionsschicht bildet und auf die gewünschte Dicke anwächst und dabei nicht abtropft oder an den Transportrollen bei einem Durchlaufofen oder an den Aufnahmen bei einer stationären Erhitzung anhaftet. Auch dies hängt wiederum von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab. Das Presshärten stellt somit eine komplexe Abfolge, sich wechselseitig beeinflussender Prozessschritte dar und ist daher nur schwierig zu beherrschen.

Andererseits werden sicherheitsrelevante Bauteile produziert, deren Konformität der Produktmerkmale, insbesondere der mechanisch-technologischen Eigenschaften des Stahls und die Eigenschaften der Beschichtung, unbedingt sicherzustellen ist. Üblicherweise werden stichprobenartig Verfahren der zerstörenden Prüfung (ZP), z.B. Zugversuch, Härteprüfung und Metallografie eingesetzt [5]. Die Kritikalität des Prozesses und der Produkte machen allerdings einen erheblichen Prüfumfang bei hoher Prüfhäufigkeit erforderlich, was beim Einsatz von ZP mit enormen Prüfkosten verbunden ist, insbesondere da diese höchstfesten Werkstoffe eine aufwendige Probenpräparation und eine besondere Ausführung der Prüfmittel (Zugmaschine) erforderlich machen.

Noch nachteiliger ist der hohe Zeitaufwand für die ZP, demzufolge Prozessstörungen erst spät erkannt werden, wenn bereits Ausschuss in erheblichem Umfang produziert wurde, bevor korrigierend in den Prozess eingegriffen werden kann. Gerade in der automobilen Großserienproduktion ist dies inakzeptabel. Hinzu kommt, dass die oben beschriebenen partiell pressgehärteten Bauteile einen Übergangsbereich aufweisen, in dem ein steiler Gradient der Werkstoffeigenschaften (z.B. $dR_m/dx > 100 \text{ MPa/cm}$) vorliegt. Die ZP dieses Übergangsbereich im Zugversuch ist nicht möglich, da hierfür mehrere cm lange Zugstäbe entnommen werden müssten.

Daher bestand die Aufgabe darin, ein Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung (ZFP) zu identifizieren, mit dem man die oben beschriebenen Merkmale des Werkstoffs und der Beschichtung auch im Übergangsbereich bestimmen kann und dieses Verfahren für den Einsatz in der automobilen Großserienproduktion zu qualifizieren.

3. Durchführung

3.1 3MA-Prüftechnik

Als geeignetes zFP-Verfahren wurde die in Abbildung 3MA-Prüftechnik (3MA = Mikromagnetische Multiparametrische Mikrostruktur- und Spannungs-Analyse) identifiziert, welche in der Stahlindustrie bereits für die Feinblechprüfung eingesetzt wird [6]. In Abbildung 3 ist ein manuelles Prüfsystem der 3MA-Prüftechnik dargestellt.

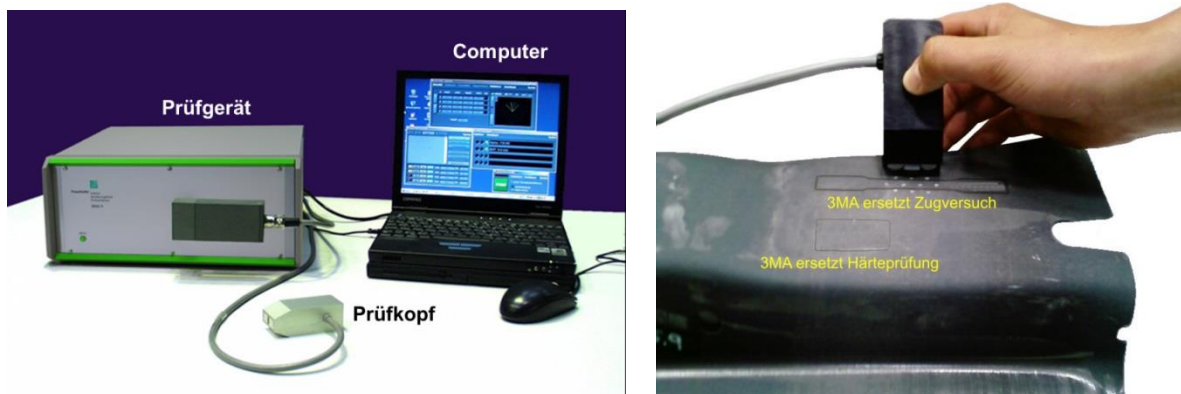


Abbildung 3. 3MA-Prüftechnik;
Komponenten des Prüfsystems (links) und Applikation an einem pressgehärteten Bauteil (rechts).

Mit 3MA werden mehrere elektromagnetische Kenngrößen im Bauteil gemessen. Diese Messgrößen weisen Korrelationen zu den sogenannten Zielgrößen auf, also den definitionsgemäß nur zerstörend messbaren mechanisch-technologischen Kenngrößen des Werkstoffs.

3.2 Kalibrierung

Bei neuen Prüfaufgaben, wie dem Presshärten sind die Zusammenhänge zwischen Mess- und Zielgrößen a priori unbekannt und müssen vor dem Einsatz von 3MA auf Basis experimenteller Daten ermittelt werden. Im Rahmen dieser sogenannten Kalibrierung wird eine Auswertefunktion für jede Zielgröße bestimmt, die deren Abhängigkeit von den Messgrößen mathematisch beschreibt. Grundsätzlich können mehrere Zielgrößen gleichzeitig einkalibriert werden. Im Anschluss an die Kalibrierung sind alle einkalibrierten Zielgrößen simultan in einem einzelnen Prüfvorgang bestimmbar.

Die Auswertefunktionen sind i. A. werkstoffspezifisch. So müssen bei Tailor Welded Blanks unterschiedliche Auswertefunktionen für den härtbaren und den nicht härtbaren Stahl verwendet werden. Andererseits zeigte sich, dass Chargenschwankungen oder der Wechsel des Werkstofflieferanten keinen nachweisbaren Einfluss auf die 3MA-Ergebnisse haben. In geringerem Maße beeinflussen auch die Blechdicke und die Beschichtung die 3MA-Prüfgrößen. Ersteres hat zur Folge, dass für Blechdicken größer 1 mm eine andere Auswertefunktion verwendet wird als für die dünneren Bleche. Letzteres wird dazu genutzt um mit 3MA auch die Beschichtungsdicke zu bestimmen.

3.3 Validierung

Um die nicht-genormte 3MA-Prüftechnik in der industriellen Produktion als Ergänzung oder gar als Ersatz für die genormten Verfahren der ZP einsetzen zu können, muss der Nachweis geführt werden, dass 3MA für die beabsichtigte Anwendung geeignet ist. Hier eröffnet die DIN EN ISO/IEC 17025 den Weg über eine Verfahrensvalidierung durch ein akkreditiertes Prüflabor [7]. Neben der exakten Beschreibung der Randbedingungen und der Anforderungen an Prüfverfahren, Prüfteile, Prüfdurchführung und Prüfpersonal, die im Sinne einer qualitätsgesicherten Anwendung einzuhalten sind, beinhaltet die Validierung die Bestimmung der Messunsicherheit entsprechend GUM für jede der einkalibrierten Zielgrößen [8]. Als Quellen der Messunsicherheit wurden hierbei Equipment, Prüfobjekt, Temperatur, Bediener und Referenzverfahren (für Kalibrierung) berücksichtigt.

Das Prüfmittel 3MA wird hier quasi als Messmittel eingesetzt. In der Automobilproduktion muss die Eignung eines Messmittels nachgewiesen werden, wenn es wie 3MA für das Überwachen und Regeln von Fertigungsprozessen eingesetzt wird, obwohl solche Messmittelfähigkeitsanalysen bisher nicht in einer Norm festgelegt sind. Bei einer solchen Analyse entsprechend MSA werden zufällige und systematische Abweichungen des Messmittels bestimmt und diese ins Verhältnis zur Toleranz des messtechnisch zu erfassenden Merkmals gesetzt [9].

4. Ergebnisse

Als Zielgrößen wurden die Härte (H in HV), die Zugfestigkeit (Rm in MPa), die Streckgrenze (Rp0.2 in MPa), die Bruchdehnung (A50 in %) und die Gleichmaßdehnung (Ag in %) des Stahls, sowie im Fall von AlSi die Gesamtschichtdicke (GSD in μm) und die Diffusionsschichtdicke (DSD in μm) einkalibriert. Die Werte dieser 7 Zielgrößen können mit dem kalibrierten 3MA-Prüfsystem innerhalb von 6 Sekunden simultan bestimmt werden. Die Ergebnisse der Bestimmung der Messunsicherheit sind tabellarisch in Tabelle 1 dargestellt und Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse einer Messmittelfähigkeitsanalyse. Dargestellt sind σ , die Standardabweichung von 120 Wiederholungsmessungen, Bi, die systematische Messabweichung, die daraus ermittelten Fähigkeitskennwerte Cg und Cgk, der Kennwert R&R und das Ergebnis der Linearitätsuntersuchung.

Tabelle 1. Erweiterte Messunsicherheit.

Merkmal	Härte	Rp02	Rm	A50	Ag
Einheit	HV	MPa	MPa	%	%
Kombinierte Messunsicherheit	2.1	10.3	5.9	0.18	0.04

Tabelle 2. Ergebnisse der Messmittelfähigkeitsanalyse.

Merkmal	Härte	Rp02	Rm	A50	Ag
Einheit	HV	MPa	MPa	%	%
Standardabw., σ	1.8	5.8	4.6	0.06	0.03
Systemat. Abw., Bi	0.2	-1.7	-3.8	0.09	0.10
Cg	3.33	2.16	3.80	2.50	4.17
Cgk	3.28	2.01	3.89	1.75	2.50
R&R [%]	15.6	10.4	8.2	4.9	7.1
Linearität	$\leq 10\%$	$\leq 10\%$	10%	$\leq 10\%$	$\leq 10\%$

Die Diagramme in Abbildung 4 zeigen die Gegenüberstellung der mittels 3MA bestimmten Werte und der mit zP gemessenen Werte der Zielgrößen für Rm und A50. Hierbei stellt Δy jeweils den Mittelwert der betragsmäßigen Abweichungen zwischen beiden Verfahren dar. Es ist zu berücksichtigen, dass hierzu nicht nur die Messunsicherheit von 3MA sondern auch die Messunsicherheit des zerstörenden Referenzverfahrens beiträgt.

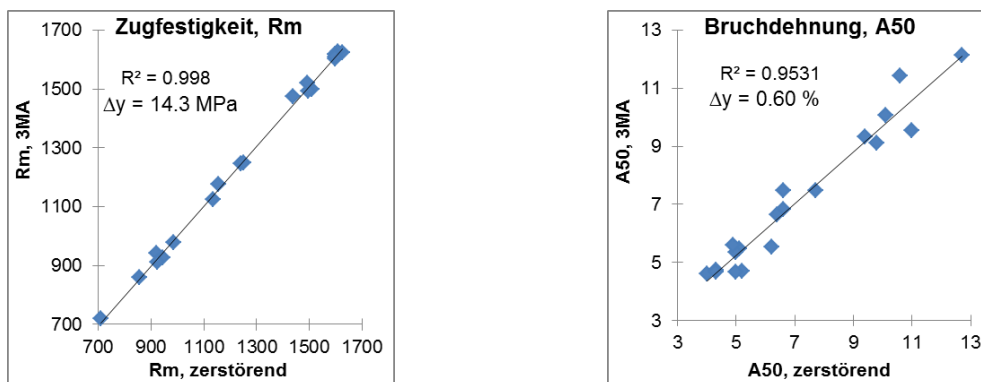


Abbildung 4. Gegenüberstellung der zerstörungsfrei und zerstörend bestimmten Werte für die Zugfestigkeit Rm (links) und die Bruchdehnung A50 (rechts).

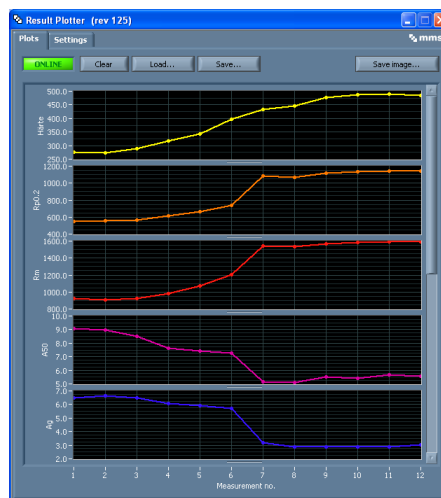


Abbildung 5. Ergebnis der 3MA-Prüfung des Übergangsbereichs.

3MA kann auch für die detaillierte Charakterisierung des Übergangsbereich eingesetzt werden, wie Abbildung 5 zeigt. Dargestellt ist der mittels 3MA bestimmte Verlauf der einkalibrierten Zielgrößen im Übergangsbereich von ca. 10 cm Breite. Ein produktionsintegriertes Prüf-/Messmittel muss weitere Anforderungen erfüllen. Hierzu zählt die direkte Austauschbarkeit (plug'n'play) von Prüfköpfen und Prüfgeräten. Um dies zu gewährleisten, werden die elektrotechnischen Eigenschaften der 3MA-Prüfsysteme charakterisiert und aneinander angeglichen. Den größten Beitrag zur Messunsicherheit lieferte ursprünglich der Bedieneinfluss. Mittlerweile wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen, um diesen Beitrag zu minimieren. Durch eine intensive Schulung des Prüfpersonals sollen Bedienfehler vermieden werden. Andererseits werden Bedienfehler mittlerweile automatisch erkannt und mit einer entsprechenden Fehlermeldung quittiert.

5. Zusammenfassung

Mit dem Presshärten werden Strukturelemente der Karosserie aus höchstfestem Stahl gefertigt, deren Qualität für die Crash-Festigkeit des Fahrzeug maßgeblich ist. Daher ist es erforderlich, die mechanisch-technologischen Eigenschaften des Stahls und die Eigenschaften der Beschichtung stichprobenartig zu prüfen. Mit der 3MA-Prüftechnik steht ein schnelles und damit kostengünstiges zerstörungsfreies Prüfverfahren für diese Aufgabe zur Verfügung. Die Härte und die Kenngrößen des Zugversuchs im Grundwerkstoff (Stahl) und die Dicken der verschiedenen Anteile der Beschichtung können gleichzeitig bestimmt werden. Für diesen Anwendungszweck wurde eine Validierung der 3MA-Prüftechnik durchgeführt. Die dabei bestimmten „Messunsicherheiten“ lagen in der Größenordnung der zerstörenden Prüfung. 3MA wird derzeit als manuelles Prüfverfahren fertigungsbegleitend in der Produktion eingesetzt. Das Verfahren ist aber auch vollständig automatisierbar und kann als Inline-Prüfverfahren in den Fertigungsprozess integriert werden.

Referenzen

- [1] Ridderstrale, C.E.: Verfahren zur Herstellung eines Werkstücks aus gehärtetem Stahl. Angemeldet durch Plannja AB. am 06.11.1973. Veröffentlichungsnr: EP1645345A2.
- [2] Oldenburg, M.; Lindkvist, G.: Tool thermal cycle design for manufacturing of components with tailored material properties. In : Oldenburg, M. ; Steinhoff, K. ; Prakash, B.: Tagungsband 3rd International Conference Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel CHS2, Kassel, Germany, 2011 S. 203-210.
- [3] Banik, J.; Lenze, F.-J.; Sikora, S.; Laurenz, R.: Tailored properties – A pivotal question for hot forming. In: Oldenburg, M. ; Steinhoff, K. ; Prakash, B.: Tagungsband 3rd International Conference Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel CHS2, Kassel, 2011, S. 13-20.
- [4] Fan, D. W.; De Cooman, B. C.: State-of-the-Knowledge on Coating Systems for Hot Stamped Parts. steel research int. 83 No. 9999, DOI: 10.1002/srin.201100292, 2012.
- [5] Kurz, T.; Larour, P.; Till, E.: Crashperformance und Duktilität von pressgehärteten Stählen - Reicht der Zugversuch zur Beschreibung?, Tagungsband 4. Erlanger Workshop Warmblechumformung, S. 107, 2009.
- [6] Wolter, B.; Dobmann, G.; Kern, R.: Kontinuierliche Inline-Prüfung von Qualitätsmerkmalen in Feinblech; Tagungsband Werkstoffprüfung 2005. DVM report 641, 2005, S. 137-146.
- [7] DIN EN ISO/IEC 17025: Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien, Beuth Verlag, 2005.
- [8] ISO/IEC Guide 98-3:2008: Uncertainty of measurement -- Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), 1995.
- [9] DIN EN ISO 10012: Messmanagementsysteme - Anforderungen an Messprozesse und Messmittel, Beuth Verlag, 2003.