

Beschreibung des Bake-Hardening-Effektes bei modernen Karosseriestählen

Müller, R.; Mütze, S.

Abstract

Die Zielstellung der vorgestellten Arbeiten ist die Erarbeitung von Grundlagen zur gezielten Einstellung von Werkstoffverfestigungen in der Blechumformung. Die Untersuchungen finden im Rahmen der Innovationsallianz „Green Carbody Technologies“, Verbundprojekt 2 - Performance Presswerk (InnoCaT2), Teilvorhaben: Verfahrens-, Werkzeug- und Anlagenentwicklung und -optimierung unter ressourcenrelevanten Gesichtspunkten, Teilprojekt 2.1.1: Ausnutzung und Verbesserung der Bake-Hardening- und Work-Hardening-Effekte statt. Das Umformvermögen der Werkstoffe soll bei verschiedenartigen Beanspruchungen (Lastpfaden) unter Berücksichtigung der Festigkeitsanforderungen an die Bauteile sowie der Verformungsreserven bei einer Crashbeanspruchung betrachtet werden. Zu berücksichtigen sind dabei sowohl die Werkstoffverfestigungen während des Umformvorganges (Work-Hardening) als auch während einer anschließenden Wärmebehandlung im KTL-Prozess (Bake-Hardening). Dazu ist es erforderlich, das Werkstoffverhalten umfassend experimentell zu ermitteln und spezifische, unter realen Prozessbedingungen ermittelte Kennwerte für unterschiedliche Simulationsprogramme detailliert zur Verfügung zu stellen. Ziel dabei ist es, die benannten Effekte bereits bei der Bauteilauslegung bewusst zu nutzen und somit ein bisher nicht aktiv genutztes Potenzial zur effizienten Nutzung von Ressourcen auszuschöpfen.

1 Einleitung

Im Zuge von Maßnahmen zur Reduzierung der Masse der Fahrzeuge werden in der Automobilproduktion bereits verschiedene Möglichkeiten, insbesondere auch im Karosseriebereich genutzt, das Potenzial der Blechwerkstoffe möglichst vollständig auszuschöpfen:

- Einstellung einer hohen Zugfestigkeit und Streckgrenze (höher- und hochfeste Stähle)
- Spezifische Werkstoffzusammensetzungen und Fertigungstechnologien, auch unter Nutzung erhöhter Temperaturen, wie z.B. beim Presshärten
- Einsatz von Tailored Welded oder Tailored Rolled Blanks
- Einsatz von Patchworktechnik
- Erhöhung des Streckzieh- gegenüber des Tiefziehanteils

Eine weitere Möglichkeit, deren Anwendung noch erhebliche Reserven aufweist ist die Einstellung und Nutzung von Verfestigungseffekten, den Bake-Hardening- und Work-Hardening-Effekten. Das Work-Hardening charakterisiert die Erhöhung der Streckgrenze nach einer plastischen Umformung. Es beschreibt somit die Verfestigung eines Werkstoffes in Abhängigkeit des Reckgrades bzw. der Verformung. Bake-Hardening ist ein zusätzlicher strukturbedingter Verfestigungseffekt im Material, der infolge einer Wärmebehandlung mit moderater Temperatur (etwa 170°C), wie sie in der Fahrzeugindustrie beim KTL-Prozess stattfindet, eintritt.

Die materialphysikalischen Effekte des Work-Hardenings und des Bake-Hardenings werden bei der Verarbeitung von Blechen genutzt, um die Festigkeitseigenschaften der hergestellten Produkte gezielt zu verbessern. Während die Verfestigung bei der Umformung (Work-Hardening) dem Vorgang der plastischen Verformung inhärent und damit nur teilweise beeinflussbar ist, kann das Bake-Hardening durch Prozessparameter weitgehend gesteuert werden. Jedoch existiert ein enger Zusammenhang zwischen der Fähigkeit des Werkstoffes zum Bake-Hardening und der ertragenen Vorverformung, so dass eine gemeinsame Betrachtung beider Effekte sinnvoll erscheint. Als sekundärer Effekt der Verfestigung des Bauteilwerkstoffes kann eine Reduzierung der Masse des Werkstückes erreicht werden, indem eine geringere Blechdicke erforderlich wird.

2 Stand der Technik

Das zusätzliche Potenzial der Bake-Hardening Effekte zur Erhöhung der Bauteilfestigkeit von Karosseriestrukturen wurde bereits in den 80iger Jahren des vorigen Jahrhunderts erkannt und zuerst vor allem in Japan genutzt [1], [2]. Die Phänomene der erhöhten Festigkeit wurden zunächst nur phänomenologisch

beschrieben. Sich intensivierende Forschungsbemühungen führten nach und nach zu einem tieferen Verständnis der strukturellen Ursachen für die beobachteten Effekte, gleichzeitig wurden weitere Werkstoffe und ein Vielzahl von Einflussgrößen auf den Prozess in die Betrachtungen einbezogen und untersucht [3], [4], [5]. Es zeigte sich, dass der Effekt außer bei Stahl auch bei weiteren Metallen und bei den immer breiter genutzten Mehrphasenstählen auftritt [6], [7], [8]. Als wesentlichste Einflussgrößen auf das Bake-Hardening wurden neben dem Kohlenstoffgehalt die Beigabe von Legierungselementen, die Korngröße, eine ggf. stattfindende Wärmebehandlung und die erfolgte Vordehnung erkannt.

Bei den speziellen Bake-Hardening-Stählen handelt es sich um härteste Stähle mit Streckgrenzenzuwachs durch das Lackeinbrennen [9], [10], [11]. Beim Einbrennen des Automobillackes durch eine kontrollierte Reckalterung wird eine Streckgrenzensteigerung von mindestens 35-40 N/mm² erzielt. BH-Stähle besitzen eine niedrige Streckgrenze im Anlieferungszustand sowie hohe r- und n-Werte. Besonders für nur gering umgeformte Bauteile bewirkt die Festigkeitssteigerung durch das Lackeinbrennen eine höhere Beulfestigkeit. Diese Stähle eignen sich vor allem für flache Außenhautteile wie Dächer, Motorhauben und Türaußenbleche.

In [12] wird für die höher- und härtesten Mehrphasenstähle wie Dualphasenstähle, TRIP-Stähle, Complexphasenstähle und Martensitphasen-Stähle das Potenzial einer Bake-Hardening-Behandlung aufgezeigt. Nach den Angaben in den entsprechenden Werkstoffdatenblättern erfolgt die Wärmebehandlung bei einer Temperatur von 170 °C und einer Haltezeit von 20 Minuten. Unter Einbeziehung einer Vorverformung werden werkstoffbezogenen BH-Werte von 40-140 N/mm² erreicht. Je höher dabei die Verformung, umso höher ist auch die erzielbare Festigkeitssteigerung. Dualphasenstähle z.B. von Salzgitter Flachstahl [11] vereinen sowohl höhere Festigkeiten durch die Einlagerung von festigkeitssteigernden Phasen in der weicheren ferritischen Grundmatrix als auch eine gute Umformbarkeit.

Die aus der Literatur zitierten, überwiegend experimentell geprägten Untersuchungen und Ergebnisse stellen umfangreiches, nutzbares Datenmaterial zur Verfügung. Es bietet die Grundlage für die Auswahl von geeigneten Werkstoffen, für die Konzipierung von Prozessketten und für die Durchführung von Versuchen zur Werkstoffcharakterisierung zum experimentellen Nachweis der eingestellten Effekte. Trotz der erzielten Fortschritte beim Verständnis der physikalischen Prozesse, die zum Work- und Bake-Hardening führen, zum Einfluss verschiedener Prozessparameter und dem Zusammenspiel zwischen Vorverformung und Bake-Hardening, werden diese Effekte bei der

Bauteildimensionierung in der Automobilindustrie bisher kaum systematisch genutzt. Es fehlen noch Untersuchungen, welche für eine repräsentativ ausgewählte Palette von geeigneten Stahlwerkstoffen und für relevante Bauteilklassen der Karosseriefertigung die erzielbaren Streckgrenzenerhöhungen in Bezug auf praxisrelevante Auslegungskriterien der Automobilherstellung bewerten. Neben der statischen Auslegung (Steifigkeit, Festigkeit) müssen dabei auch die strukturdynamischen und crashrelevanten Aspekte in die Betrachtungen einbezogen werden. Die volle Ausschöpfung der Möglichkeiten etwa zur Blechdickenreduzierung im praxistauglichen Einsatz in der Serienproduktion erfordert außerdem Aussagen zur Robustheit der Prozessketten (Vorverformung, Umformung, Wärmebehandlung, KTL-Prozess) hinsichtlich der zum Teil statistisch schwankenden Einflussparameter.

Eine wesentliche Zielgröße der Fertigung im Automobilbau ist neben der gewöhnlichen Bauteilstabilität und -festigkeit durch die Crasheigenschaften der Baugruppen im Strukturbereich gegeben. Es sind bisher keine Untersuchungen bekannt, die die durch Anwendung von Work- und Bake-Hardening erreichten Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Bauteilen direkt anhand einer anschließenden Crashsimulation bewerten. Die hierdurch gegebene Unsicherheit hinsichtlich der finalen Bauteileigenschaften steht einer weiteren Reduktion der Blechdicke entgegen. Im Ergebnis bleibt in der Anwendung ein nicht unerhebliches Potenzial an Festigkeitsreserven bzw. Möglichkeiten zur Werkstoffeinsparung vorerst ungenutzt.

3 Experimentelle Untersuchungen zum Bake-Hardening Verhalten

3.1 Werkstoffauswahl

Für die Untersuchungen wurden Stähle ausgewählt, welche typischen Anwendungen im Karosseriebau (Außenhauteinsatz) entsprechen. Die Auswahl der Materialien beschränkt sich auf konventionelle, am Markt frei verfügbare höherfeste bzw. mehrphasige Stähle, somit ist potentiellen Nutzern die unkomplizierte Umsetzung der Ergebnisse ermöglicht. Als Materialien für die Bake-Hardening Untersuchungen wurden die folgenden Stahlwerkstoffe gewählt:

- HCT600XD $s_0 = 0,50$ mm
- HC220BD $s_0 = 0,53$ mm
- DX54D+Z100MB $s_0 = 0,62$ mm
- HCT500XD $s_0 = 0,53$ mm

Bei dem HCT600XD handelt es sich um einen feuerverzinkten Dualphasenstahl, Produktionsjahr 2007 eines Drittlieferanten. Dieser Stahl wurde in das Werkstoffportfolio aufgenommen, um als Referenz für einen natürlich gealterten Werkstoff sowie einen Werkstoff mit durchaus üblichen Chargenschwankungen zu dienen. Der HC220BD ist ein mikrolegierter Stahl welcher speziell für automobiler Anwendungen entwickelt wurde. Er weist ein ausgeprägtes Bake-Hardening Vermögen auf. Der DX54D+Z100MB ist eine weiche Umformgüte, welche als Referenzwerkstoff dient und in Außenhautanwendungen ihren Einsatz findet. Der HCT500XD ist ebenfalls ein feuerverzinkter Dualphasenstahl mit aktuellem Produktionsdatum. An diesem Material sollte sich im Vergleich zu dem HCT600XD deutlich ein Effekt darstellen lassen.

3.2 Prüfversuche zur Werkstoffcharakterisierung

3.2.1 Zugversuch

Die zurzeit gebräuchlichste Prüfung zur Ermittlung von Werkstoffkennwerten ist der Zugversuch nach DIN EN ISO 6892 [13]. Mit diesem Versuch werden die Werkstoffe in ihrem Anfangszustand charakterisiert. Die Versuchsdurchführung erfolgt reibungsfrei unter definierten Temperaturen und Geschwindigkeiten. In der folgenden Tabelle 1 sind die wesentlichen mechanischen Kennwerte aller vorgestellten Werkstoffe zusammengestellt.

Tabelle 1: Mechanische Kennwerte

Blechwerkstoff	Streckgrenze [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Gleichmaßdehnung [%]	Bruchdehnung [%]
HCT600XD	373	571	12,7	23,1
HC220BD	221	349	19,2	37,4
DX54D+Z100MB	194	331	23,2	41,2
HCT500XD	321	573	17,4	26,7

3.2.2 Maxi-Bulge-Test

Zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens bei höheren Umformgraden wird der Maxi-Bulge-Test (MBT) [14] des Fraunhofer IWU verwendet (Bild 1). Er zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- Ein Matrizendurchmesser von 500 mm ermöglicht die exakte Anwendung der Membrantheorie durch das Verhältnis Blechdicke/Durchmesser $< 0,003$.
- Große Schließkräfte bis maximal 50000 kN blockieren das Nachfließen des Werkstoffs aus dem Flanschbereich auch bei großen Werkstofffestigkeiten.
- Auswertefehler werden durch synchronisierte hochgenaue In-Prozess-Messung von Druck und Verformung, optische Messung lokaler Verschiebungen ε_1 und ε_2 zur Ermittlung lokaler Radien, vermieden.
- Die plastische Anisotropie der Werkstoffe durch Anisotropiekennwerte aus dem einachsigen Zugversuch wird berücksichtigt.

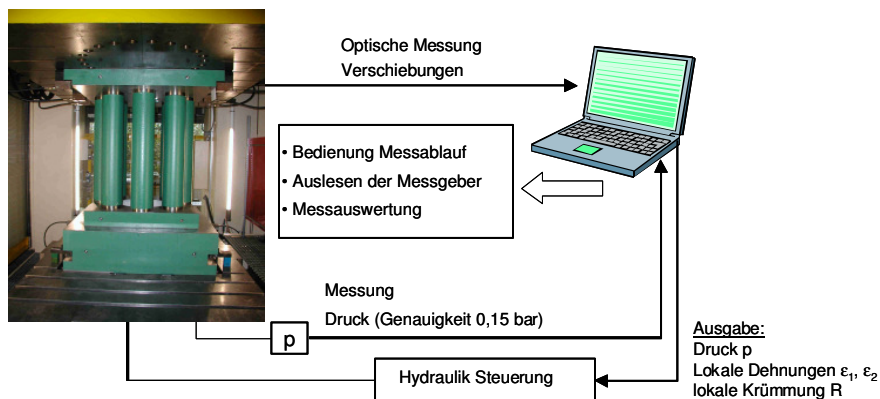


Bild 1: MBT-Werkzeug im eingebauten Zustand und Messkette

Im Bild 2 sind die Verläufe der aus den Werten des einachsigen Zugversuches sowie aus dem MBT approximierten Fließkurven für die ausgewählten Blechwerkstoffe dargestellt. Wichtig ist, dass beide Kurven ein kongruentes Verfestigungsverhalten zeigen.

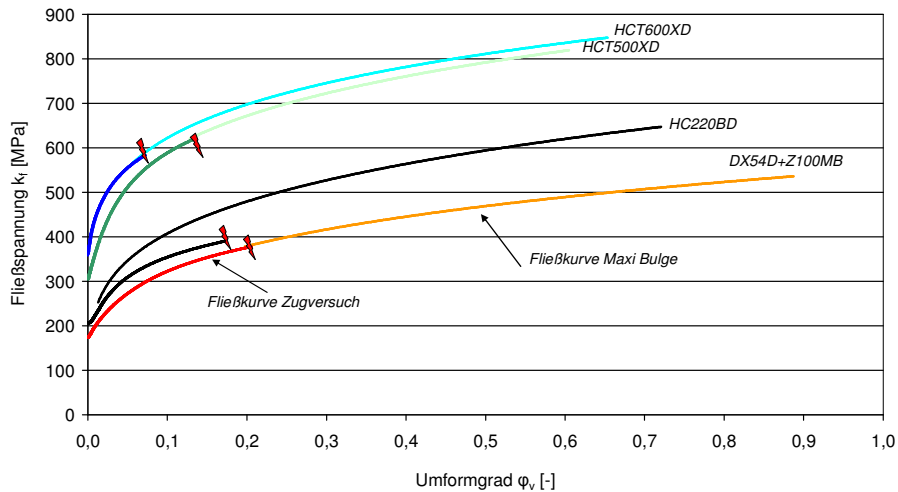


Bild 2: Fließkurven aus Zugversuch und Maxi-Bulge-Test

3.2.3 Grenzformänderungskurve

Bei der Simulation von Blechumformvorgängen wird üblicherweise zur Ermittlung des Versagens durch Reißen das Grenzformänderungsdiagramm zugrunde gelegt.

Die Aufnahme der Grenzformänderungskurve erfolgt durch eine Verformung von seitlich taillierten Streifen unterschiedlicher Breite über einen Halbkugelstempel [15]. Dabei werden In-process die Verformungen mittels optischen Messsystems aufgenommen und daraus die Dehnungen berechnet. Durch die Proben-taillierung erfolgt ein senkrecht einfließen der Probenkante über den Zieh-ringradius womit ein frühzeitiges Reißen in diesem Bereich verhindert und der Versagensort in die Probenmitte verlegt wird. Durch große Stempelradien werden starke Krümmungen vermieden und durch den Einsatz geeigneter Schmiermittel (Schmierfett, Öl oder Teflonfolie) Reibungseinflüsse verringert. Im folgenden Bild 3 sind für alle Blechwerkstoffe die Grenzformänderungskurven dargestellt.

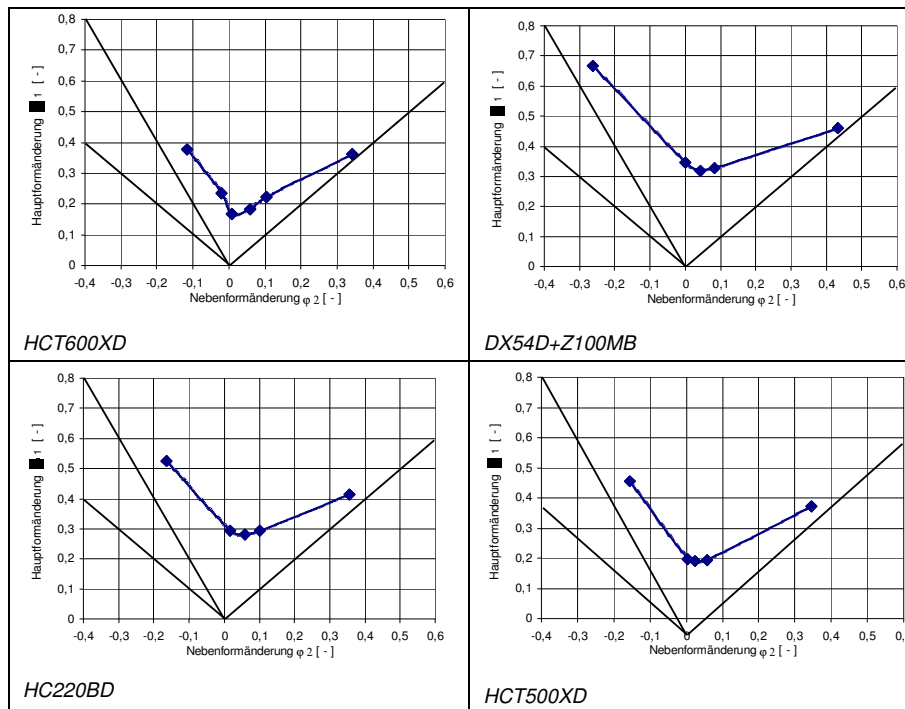
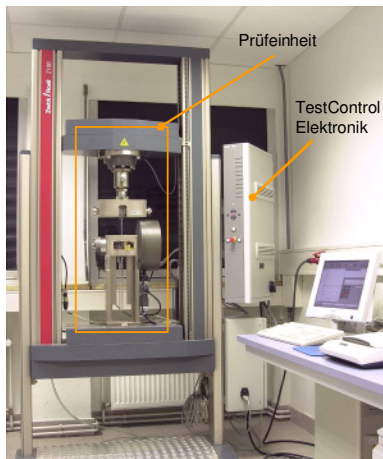


Bild 3 Grenzformänderungskurven

3.2.4 Reibversuch nach Renault

Neben den das Werkstoffverhalten während der Umformung beschreibenden Kenngrößen haben auch noch den Prozess beschreibende Kennzahlen einen großen Einfluss auf das Simulationsergebnis. Die größte Bedeutung kommt dabei der exakten Beschreibung des tribologischen Systems von Werkzeug und Werkstück zu. In den meisten Simulationsprogrammen wird dafür das Coulomb'sche Gesetz mit einem konstanten Reibwert für eine Reibpaarung verwendet. Verschiedene Werkzeug- und Werkstückoberfläche, verschiedene Schmierstoffe, wechselnde Temperaturen, unterschiedliche Geschwindigkeiten und örtliche Druckverhältnisse in der Wirkfuge sind die verschiedenen Einflussgrößen die berücksichtigt werden müssen. Im folgenden Bild 4 ist der Versuchsstand zur Aufnahme des Reibkoeffizienten bei SZMF dargestellt. Auf diesem wird der im folgenden Bild 5 dargestellte und kurz beschriebene Reibversuch nach Renault durchgeführt.



Fmax : 100kN
 Prüfgeschwindigkeit : 0,0005...1500mm/min
 Arbeitsraum : 1260x640mm
 Tribologische Einheit Fmax : 30kN

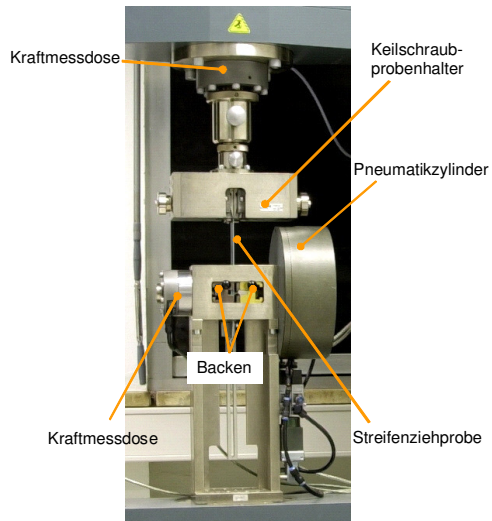
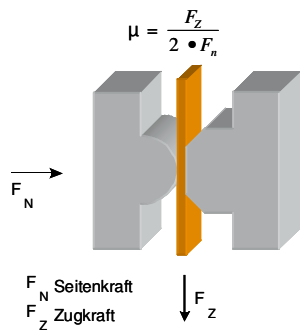


Bild 4: Versuchsstand zur Aufnahme eines Reibkoeffizienten bei SZMF



Prinzip des Renault -Tests:

Reibversuche mit linienförmigem Kontakt. Durch diesen Test wird die Adhäsionsneigung der Oberfläche charakterisiert (Neigung zu Kaltverschweißungen).

Gemessene Größe:
 • Zugkraft

Berechnete Größe
 • Reibkoeffizient

Probenabmessung : 50 ± 0,5 mm x 300mm
 Probenlage : Länge in Walzrichtung
 Probenvorbehandlung : Entgraten; Reinigen, 10 min US-Petroläther-Bad; Beölen (Tauchen in Quaker N 6130 und 20 h vertikal ablaufen lassen)
 Werkzeugwerkstoff : Werkstoff-Nr. 1.3342 (SC-6-5-2; Schnellarbeitsstahl); Härte 62...65 HRC
 Normalkraft : 500 daN
 Geschwindigkeit : 20 mm/min
 Reibweg : 50 mm (1. Durchgang 55 mm)
 Durchläufe : 5 für Oberseite, 5 für Unterseite (neue Probe), ohne Zwischenreinigung oder Neubeölung
 Beurteilung : Visuelle Beurteilung beider Seiten nach jedem Durchlauf

Bild 5: Reibwertaufnahme nach Renault

Die Reibkoeffizienten der verschiedenen Blechwerkstoffe sind im Bild 6 dargestellt.

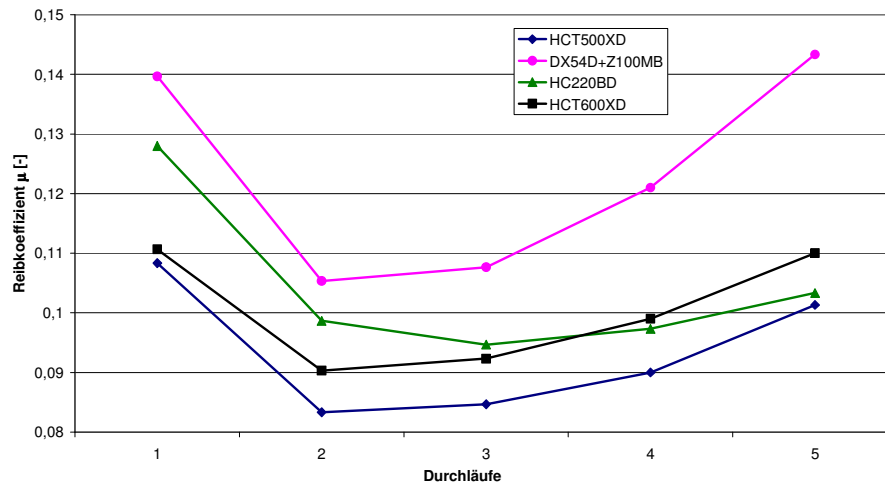


Bild 6: Darstellung der ermittelten Reibwerte für alle Versuchswerkstoffe

3.3 Prüfversuche zur Beschreibung des Bake-Hardening

In einem ersten Schritt wurden zur Charakterisierung des Work-Hardening in den Werkstoff einachsige Vordehnungen durch Zugversuche und mehrachsige Vordehnungen durch Marciniakversuche in verschiedenen Größenordnungen eingebracht. Zur Bestimmung des Bake-Hardening-Verhaltens unter mehrachsiger Beanspruchung wurde eine umfassende Versuchsmatrix zur Variation von maßgeblich das Bake-Hardening-Verhalten beeinflussenden Parametern aufgestellt. Während der Durchführung von Modellversuchen anhand einer einfachen Bauteilgeometrie wurden so systematisch Parameterkombinationen variiert (Ziehtiefe = Vordehnung, Ofentemperaturen, Haltezeit).

Bei der Untersuchung wird für jeden Werkstoff nach dem im Bild 7 dargestellten Versuchsplan vorgegangen.

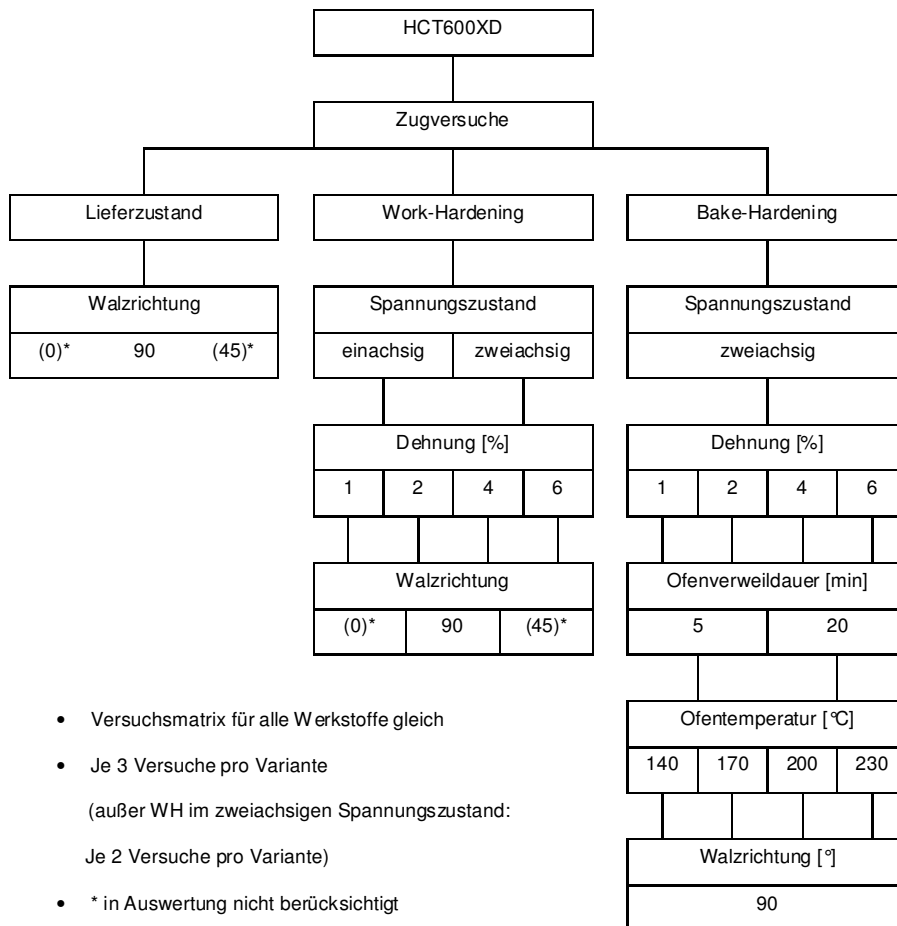


Bild 7: Versuchsplan, beispielhaft

In den Bildern 8 und 9 sind die Kaltverfestigungen der Werkstoffe durch die Streckgrenzenerhöhung bei der entsprechenden Dehnung dargestellt. Gut erkennbar ist hierbei, dass ein mehrachsiger Vorverformungszustand teilweise deutlich die Steigerung der erreichten Streckgrenzen im Vergleich zu einem einachsigen Vorverformungszustand der Werkstoffe bedingt.

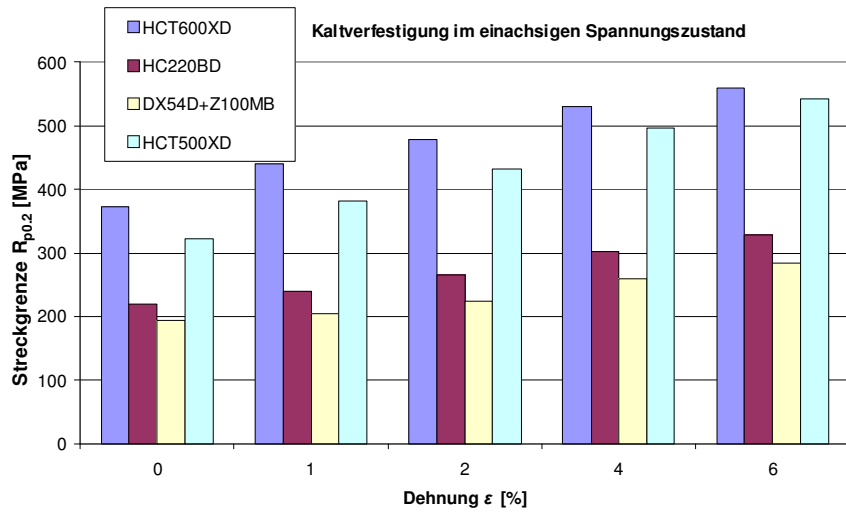


Bild 8: Kaltverfestigung verdeutlicht durch die Streckgrenzenerhöhung einachsrig

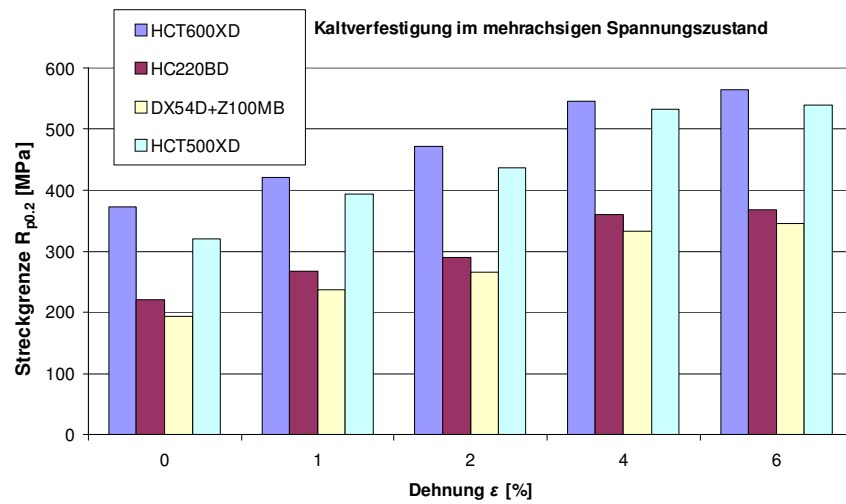


Bild 9: Kaltverfestigung verdeutlicht durch die Streckgrenzenerhöhung mehrachsrig

Zur Herstellung von stilisierten Bauteilen mit einem mehrachsigen Vorverformungszustand wurden in einem modularen Umformwerkzeug auf einer hydraulischen High-Speed Tryoutumformpresse der Firma Dieffenbacher (vgl. Bild 10) sogenannte Marciniaknäpfe hergestellt.



Pressendaten

Stößelkraft:	10.000 kN
Ziehkissenkraft:	5.000 kN
Ziehkissenhub:	300 mm
Stößelhub:	1.000 mm
Werkzeugeinbauhöhe:	1.500 mm
Tisch/ Stößelgröße:	2.500 mm x 1.300 mm
Umformgeschwindigkeit:	1 - 500 mm/s
Gewicht:	122 t

Besondere Merkmale

- Voll regelbare Ziehgeschwindigkeiten von 1 mm/s bis 500 mm/s
- Nachbildung verschiedener Pressenkinematiken (mechanische Pressen)
- Eignung zum Warmumformen bis 1000 °C
- aktives und passives Ziehen
- vorbeschleunigtes Ziehkissen
- umfangreiche Analyse- und Diagnosesoftware
- genaueste Steuerung durch digitale Verknüpfung der kompletten Sensorik

Bild 10: High-Speed Tryoutumformpresse Dieffenbacher bei der SZMF

Die gewählte Marciniaknapfgeometrie hat einen Durchmesser 300 mm, das Nachfließen des Werkstoffes in den Bereich innerhalb des Ziehringes wird durch eine Klemmung des Materials im Flansch verhindert. Die so erzeugten Näpfe weisen im Bauteilboden eine reine Streckziehbeanspruchung auf. Im Nachgang wurden aus dem Bodenbereich die entsprechenden Zugproben entnommen (Bodenbereich entspricht im Belastungsfall Streckziehen einem Außenhautbauteil im Kfz). Der Aufbau des Werkzeuges ist im Bild 11 dargestellt.



Bild 11: Umformvorgang am modularen Tiefziehwerkzeug

Im Werkzeug ist ein optisches Messsystem der Fa. GOM (ARAMIS) integriert. Durch den Einsatz dieses Messsystems können online die in den Werkstoff induzierten Dehnungen sowie deren Verteilung im erfassbaren Bauteilbereich bestimmt werden. Die Ergebnisse können durch Vergleichsmessungen mit dem ARGUS System der Fa. GOM verifiziert werden. Somit ist es möglich, im hohen Maße reproduzierbare Ergebnisse zu erlangen da alle Näpfe unter identischen Bedingungen hergestellt werden können. Einer geforderten Dehnung im Bodenbereich des Napfes ist klar eine erforderliche Ziehtiefe zugeordnet.

Um eine Referenzziehtiefe bezüglich der benötigten Dehnung des Bauteils zu erlangen wurde ein entsprechender Versuch durchgeführt. Dabei betrug die Ziehgeschwindigkeit 1,5 mm/s, es wurde eine Ziehkraft von 7.000 kN sowie eine Niederhalterkraft von 5.000 kN eingestellt.

1. Ziehen eines Blechs bis zu einer Ziehtiefe von ca. 60 mm
2. Aufnahme der stochastisch berasterten Blechoberfläche mit ARAMIS System
3. Auswertung der Bildfolge, Darstellung der Vergleichsformänderung, Abgleich mit Z-Koordinate (Bild12)
4. Übertrag der ermittelten Ziehtiefe in Presse, Abgleich mit zuvor empirisch ermittelter Blechnullposition, Durchführung der Umformoperation
5. Referenzvermessung des Bauteils mit ARGUS System

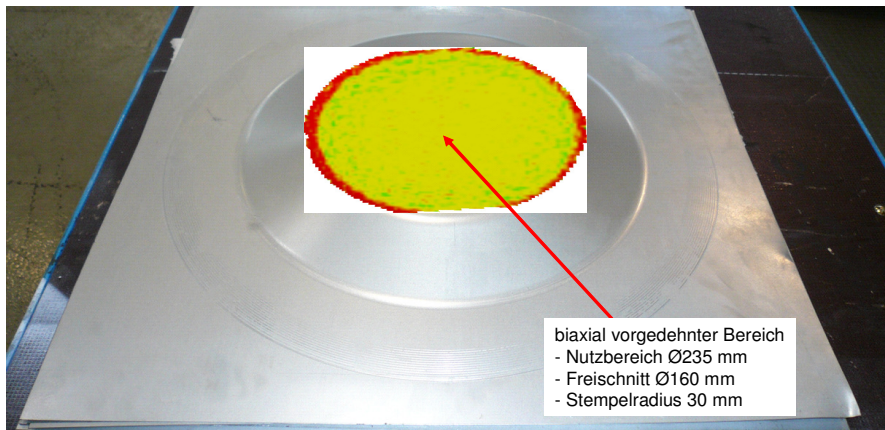


Bild 12: umgeformte Platinen - Fertigteile

Um den Temperatureinfluss zu simulieren wurden die hergestellten Napfgeometrien in einem Hochtemperaturkammerofen der Firma Nabertherm nach den in Bild 7 zusammengestellten Strategien wärmebehandelt. Auch aus den Bodenbereichen der wärmebehandelten Näpfe wurden systematisch Zugproben entnommen.

In den folgenden Bildern 13 und 14 sind am Beispiel des DX54D+Z100MB wesentlichen Ergebnisse bezogen auf den HC220BD dargestellt.

Bei geringeren Dehnungen zeigt sich deutlich der positive Einfluss der steigenden Temperatur auf die Erhöhung der Streckgrenze besonders bei längeren Ofenzeiten am Material HC220BD. Bei höheren Dehnungen wird der Streckgrenzewuchs ausschließlich über die Kaltverfestigung erreicht. Der Temperatureinfluss ist vernachlässigbar gering. Auch reduziert sich der Einfluss der Verweilzeit in der Wärmebehandlung. Um eine Einsparung an Energie zu erreichen empfiehlt sich somit die Einbringung von höheren Dehnungen speziell auch bei Außenhautbereichen. Diese kann durch den Einsatz entsprechend angepasster Umformtechnologien erfolgen, z.B. kombinierten Verfahren welche im ersten Umformschritt das Material Streckziehen und im zweiten Tiefziehen (z.B. aktives hydromechanisches Umformen).

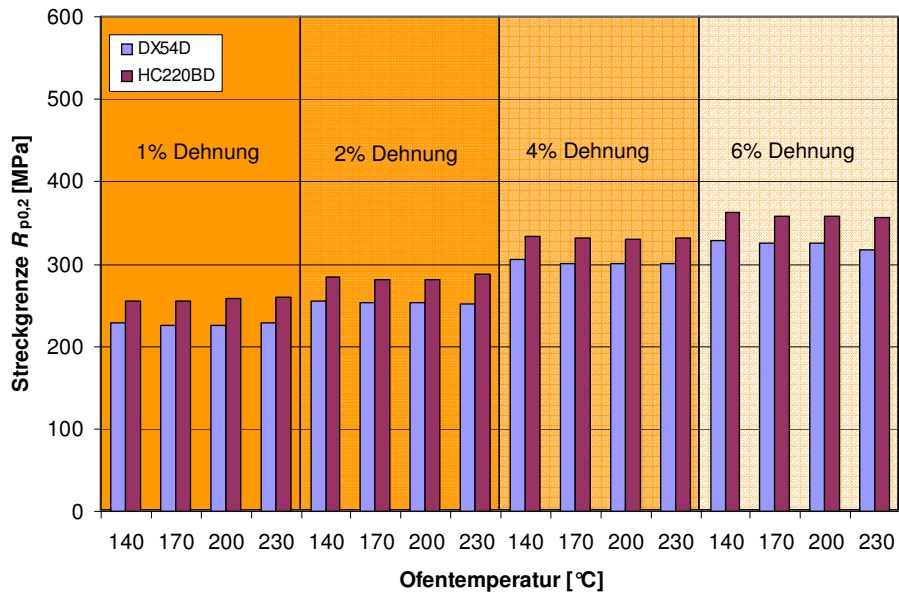


Bild 13: Vergleich DX54D+Z100MB und HC220BD bei 5min Ofenverweilzeit

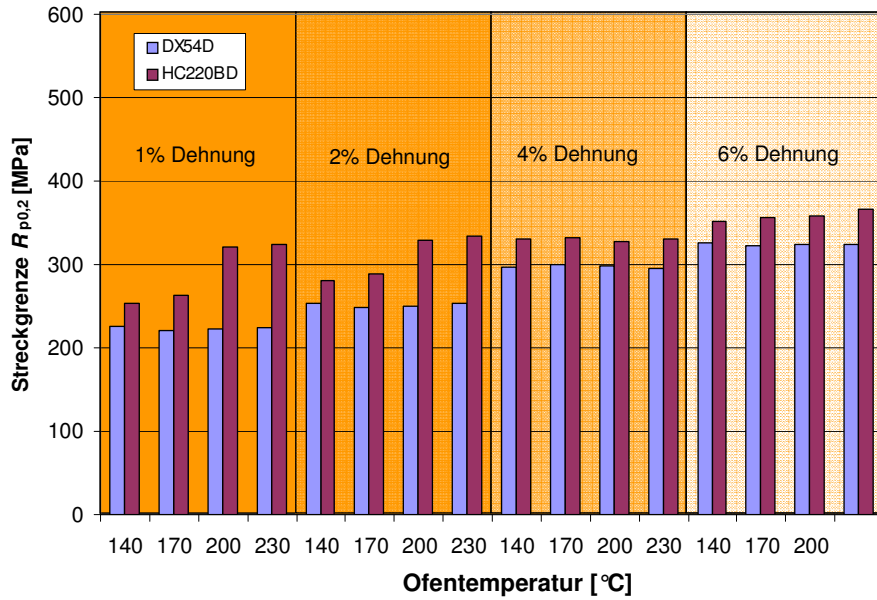


Bild 14: Vergleich DX54D+Z100MB und HC220BD bei 20min Ofenverweilzeit

4 Zusammenfassung

Geeignete und speziell ausgewählte Blechwerkstoffe, die neben dem Work-Hardening-Effekt auch einen erheblichen Bake-Hardening-Effekt zulassen, wurden exakt analysiert. Hierbei wurden sowohl Daten über den Fortschritt der Verfestigungseffekte als auch Materialdaten für die Simulation gewonnen.

Zur quantitativen Erfassung der mechanischen Materialeigenschaften, die sich während der Umformung und Wärmebehandlung einstellen werden folgende Messmethoden angewendet:

- Ermittlung wesentlicher mechanischer Kenngrößen
- Ermittlung der Fließkurve mittels Zugversuch und Maxibulgetest
- Ermittlung von Grenzformänderungskurven
- Ermittlung von Reibwerten im Renault-Test
- Ermittlung von Bake-Hardening Werten in Abhängigkeit von einer einachsigen Vordehnung, der Temperatur und deren Haltezeit im einachsigen Zugversuch
- Ermittlung von Bake-Hardening Werten in Abhängigkeit von einer biaxialen Vordehnung, der Temperatur und deren Haltezeit im einachsigen Zugversuch

Bei der Präzisierung des Versuchsprogramms wurde berücksichtigt, dass einige der aufgeführten Methoden eine minimale Probengröße erfordern und daher nicht für örtliche bzw. realprozessbegleitende Messungen geeignet sind. In folgenden Schritten werden Systematiken der Verfestigungseffekte dieser Werkstoffe, hinsichtlich der erzielbaren Bake-Hardening-Effekte, die die Festigkeitszunahme in Abhängigkeit von den Einflussgrößen (Material, Vordehnung, Temperatur, Haltezeit) beschreibt durchgeführt.

In der Praxis sollen die gewonnenen Festigkeitsreserven genutzt werden, um bei geringerem Materialeinsatz gleiche Bauteilstabilität gegenüber Beul- oder Crashbeanspruchung zu erreichen. Bisher vorliegende Untersuchungen bringen jedoch die material- und prozessbedingten Aspekte des Work- und Bake-Hardenings noch nicht mit den konkreten Belastungsanforderungen der Bauteile in Zusammenhang. Aus diesem Grund werden im weiteren Verlauf des Projekts Realbauteile aus den entsprechenden Versuchswerkstoffen hergestellt. Diese werden nach den bisher ermittelten optimalen Strategien erzeugt. In Abhängigkeit der spezifischen Werkstoffeigenschaften werden die Wärmebehandlung und der

Umformvorgang dahingehend spezialisiert, dass eine maximal mögliche Bauteileigenschaftsverbesserung erreicht wird. Die so erzeugten Realbauteile werden in weiterführenden Untersuchungen hinsichtlich ihres Bauteilverhaltens auch im Crashfall untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in entsprechende FE-Simulationsprogramme implementiert, so dass die bewusste Ausnutzung der untersuchten Verfestigungseffekte in Zukunft gewährleistet ist.

Eine wirksame ressourcenschonende Umsetzung durch die bewusste Anwendung der untersuchten Effekte in der Automobilindustrie kann erreicht werden, wenn die reale Prozessführung anhand ausgewählter und im Projekt ermittelter Parameter (z.B. Werkstoffgüte, Blechdicke, Vorverformung) in Hinblick auf die vorgegebenen Festigkeitsanforderungen optimiert wird.

Literaturangaben

- [1] Kurosawa, M., Satoh, S., Obara, T., Tsunoyama, K.: *Age-Hardening Behaviour and Dent Resistance of Bake-Hardenable and Extra Deep-Drawn High Strength Steel*. Kawasaki Steel Technical Report, No. 18, 1988
- [2] Mizui, N., Okamoto, A., Tanioku, T.: *Recent Development in Bake-hardenable Sheet Steel for Automotive Body Panels*. In: *Stahl im Automobilbau*, Verlag Stahleisen, Düss. 1990
- [3] Krieger, M.: *Mechanical properties and bake hardening behaviour of cold rolled dual phase steels subjected to advanced galvanising process routes*. Diss. TU Clausthal 2007, *Materialwissenschaft u. Werkstofftechnik*, Band 3/01
- [4] Müller, Th.: *Der Bake-Hardening Effekt im ein- und mehrachsigen Spannungszustand*. *Beiträge zur Umformtechnik 59*, MATINFO DGM Informationsgesellschaft Verlag, 2007
- [5] Elsen, P.: *Bake-Hardening-Effekt bei Feinblechen*. VDI-Verlag, Reihe 5: *Grund- und Werkstoffen*, Nr. 314, Düsseldorf 1993
- [6] Abdalla, A.J., Hein, L.R.O., Pereira, M.S., Hashimoto, T.M.: *Mechanical Behaviour of Strain Aged Dual Phase Steels*. *Mat. Science and Techn.*, 15 (1999), 10, 1167-1170
- [7] Drewes, E.-J., Engl, B.: *Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Feinblechwerkstoffe*. VDI-Bericht, Bd. 797, 601-608, Düsseldorf 1990

- [8] Robertson L.T., Hilditch, T.B., Hodgson, P.D.: *The effect of prestrain and bake hardening on the low cycle fatigue properties of TRIP steel. Int. J. Fatigue, Vol. 30, iss. 4, 2008, pp. 587-594*
- [9] *Produktinformation Bake-Hardening-Stähle, Thyssen Krupp Stahl, August 2005*
- [10] *Bake-Hardening Stähle. Arcelor-Mittal, Auszug aus dem Europäischen Produktangebot, 2008*
- [11] *Produktmagazin der Salzgitter Flachstahl GmbH „5P“, Feuerverzinkte Dualphasenstähle, 1.Ausgabe*
- [12] *Sammlung Werkstoffdatenblätter bzw. Werkstoffprospekte zu höher- und hochfesten Mehrphasenstählen, Thyssen Krupp Stahl AG, Division Auto, Duisburg, August 2005*
- [13] *DIN EN ISO 6892, Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO/DIS 6892:2007); Deutsche Fassung prEN ISO 6892:2007, Vorgesehen als Ersatz für DIN EN 10002-1:2001-12*
- [14] *Neugebauer, R.; Heidl, W.; Michael, D.; Gumbsch, P.; Schmitt, W.; Krasowsky, A.: Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Materialmodellen zur Blechumformsimulation. EFB-Forschungsbericht Nr. 244, (2005)*
- [15] *DIN-EN-ISO 12004-2: Bestimmung der Grenzformänderungskurve – Teil 2. Oktober (2007)*