

# Verformungsinduzierte Martensitevolution zur lokalen Festigkeitssteigerung

Bernd-Arno Behrens, Sven Hübner, Kathrin Voges-Schwieger, Katrin Weilandt

**Plastische Verformungen führen bei metastabilen austenitischen Stählen zu lokaler Martensitbildung in den Umformbereichen. Die Ausbildung hochfester Martensitzonen kann zur Herstellung belastungsangepasster Bauteile genutzt werden. In einem Teilprojekt des Sonderforschungsbereiches 675 werden die Anwendungsmöglichkeiten der gezielt eingebrachten Martensitstrukturfelder analysiert.**

Der Effekt der verformungsinduzierten Martensitbildung bei metastabilen austenitischen Stählen wird bereits seit den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts sowohl experimentell als auch theoretisch untersucht [1, 6]. Dennoch konnte diese umformprozessbedingte Martensitevolution bisher noch nicht gezielt für technische Anwendungen genutzt werden. Am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Leibniz Universität Hannover wird dieser Umwandlungsmechanismus untersucht, um in einem Bauteil neben austenitisch duktilen auch martensitisch hochfeste Zonen lokal einzubringen.

Ziel des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten SFB 675 „Erzeugung hochfester metallischer Strukturen und Verbindungen durch gezieltes Einstellen lokaler Eigenschaften“, ist den lokalen Werkstoffbeanspruchungen mit einer lokalen Eigenschaftsanpassung zu begegnen. Hierzu werden verschiedenste Mechanismen in Blech- sowie Massivbauteilen untersucht, die einen beanspruchungsgerechten und dabei lebensdaueroptimierenden Effekt haben können. Zu den untersuchten Effekten zählen u.a. die Martensiterzeugung, der Bake-Hardening-Effekt, die Realisierung von Sandwichbauweisen sowie die Einflüsse verschiedener Fügeprozesse. Im Bereich der Blechumformung wird die verformungsinduzierte Martensitbildung in metastabilen austenitischen Stählen am Beispiel des Edelstahl 1.4301 und des TRIP700 untersucht. Bei diesen Stählen kann

durch Umformen eine Umwandlung von Austenit in Martensit, das eine höhere Festigkeit aufweist, erreicht werden (Bild 2) [3; 10].

## Strukturfelder geben Bauteilen Sicherheit

Ein mögliches Anwendungsgebiet für die untersuchte Technologie liegt im Bereich der passiven Sicherheit. Sie ist ein wichtiger Aspekt im Fahrzeugdesign und ein ausschlaggebender Punkt für den verstärkten Einsatz hochfester Stähle aus denen, bereits jetzt eine steigende Anzahl an crashrelevanten Bauteilen gefertigt werden. Die Materialfestigkeit zu steigern ohne die Formbarkeit negativ zu beeinflussen ist die Herausforderung bei der Entwicklung dieser Bauteile.

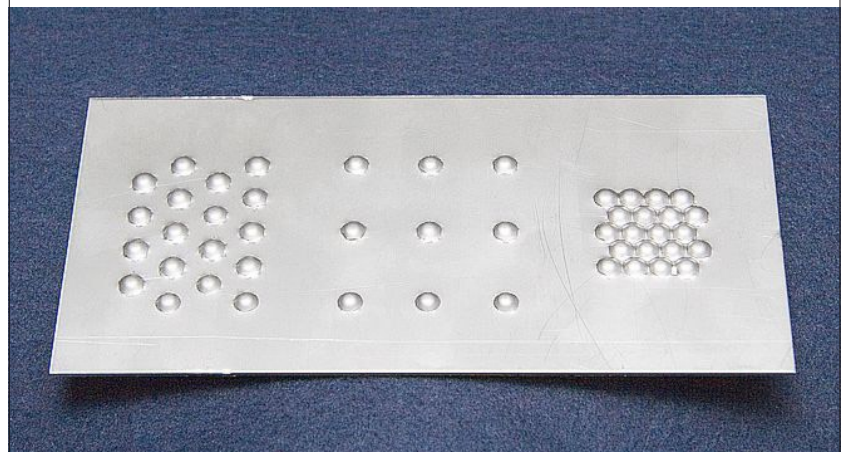
Einige hochfeste Stähle nutzen die Duktilität der austenitischen Phase

um die Formbarkeit zu verbessern. Außerdem behalten diese Stähle, selbst nach der Hauptformgebung, einen Teil ihrer Verformbarkeit. Insbesondere durch die Strukturierung austenitischer Stähle, also der partiellen martensitischen Verstärkung crashgefährdeter Bereiche, kann gezielt die Sicherheit erhöht werden.

Durch die Untersuchungen am IFUM, soll ein definiertes Einknicken des Bauteils im Crashfall ermöglicht werden. Dies geschieht durch das Einstellen lokaler Werkstoffeigenschaften in metastabilen austenitischen Stählen mittels partieller Strukturfelder. Beispielbauteile für die hier betrachteten Untersuchungen sind z.B. Längs- und Querträger zur Crashenergieaufnahme im Automobilbereich. Neben dem metastabilen austenitischen Edelstahl 1.4301 werden TRIP-Stähle (Transformation Induced Plasticity) mit 5 bis 15%

**Bild 1**

Strukturfelder in verschiedenen Anordnungen (Werkstoff 1.4301)



Restaustenit für die Untersuchungen verwendet. In Bild 1 sind unterschiedliche Ansätze zur Realisierung geeigneter Strukturfelder dargestellt.

### Martensitevolution in metastabilen austenitischen Stählen

Die verformungsinduzierte Martensitbildung in Chrom-Nickel-Stählen wird durch die Metastabilität des Gefüges und damit der Legierungselemente ermöglicht. Der in diesem Projekt untersuchte Edelstahl 1.4301 zeigt eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit und befindet sich bei Raumtemperatur in einem metastabilen  $\gamma$ -Phasen-zustand [4].

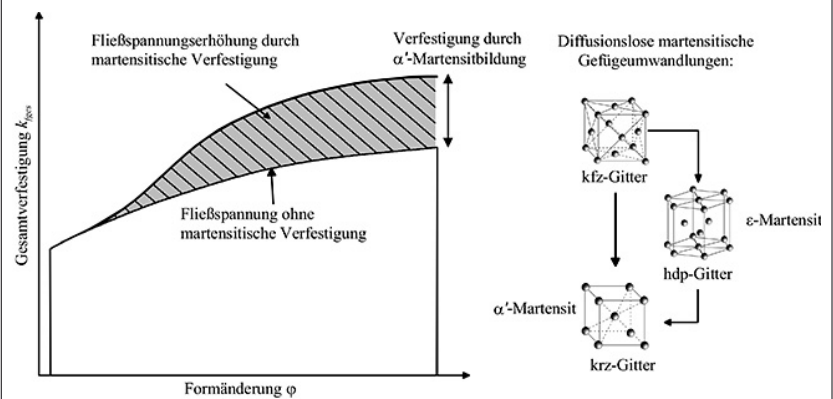
Der ebenfalls hier untersuchte Werkstoff TRIP700 gehört zur Gruppe der hochfesten Stähle. Seine Gefügezusammensetzung besteht aus Bainit, Ferrit und metastabilen Restaustenit. Die Restaustenit-Stabilisierung wird primär durch die Legierungselemente Kohlenstoff und Mangan erzielt.

Bei beiden Stählen wird durch die plastische Verformung des Kristallgitters das kubisch raumzentrierte Atomgitter des metastabilen austenitischen Stahls in kubisch flächenzentrierten  $\alpha'$ -Martensit umgewandelt. Dieser liegt aufgrund der verformungsinduzierten Martensitevolution in den ausgestreckten Blechbereichen in einem tetragonal verzerrten Gitter vor. Charakteristisch für die Martensitevolution infolge plastischer Verformung wie z.B. des Tiefziehziehens ist das Auftreten von Ferromagnetismus in der umgewandelten  $\alpha'$ -Phase. Bauteilbereiche die während des Tiefziehens keine Verformungen erfahren wie z.B. der Bodenbereich eines tiefgezogenen Rundnapfes, weisen keinen Magnetismus auf [7].

Bei der verformungsinduzierten Martensitumwandlung ist neben der Umwandlung in  $\alpha'$ -Martensit auch eine Transformation in  $\epsilon$ -Martensit möglich. Charakteristisch für dieses Gefüge ist das hdp-Kristallgitter (hexagonal dichtesten Packung), welches sich durch Paramagnetismus auszeichnet. Im Vergleich zum  $\alpha'$ -Martensit weist der  $\epsilon$ -Martensit keine so hohe Festigkeit und Härte auf. Der  $\epsilon$ -Martensit kann sich jedoch bei weiterer Verformung in  $\alpha'$ -Martensit umwandeln. Das so entstandene Gefüge weist jedoch keine ebenso hohe Festigkeit

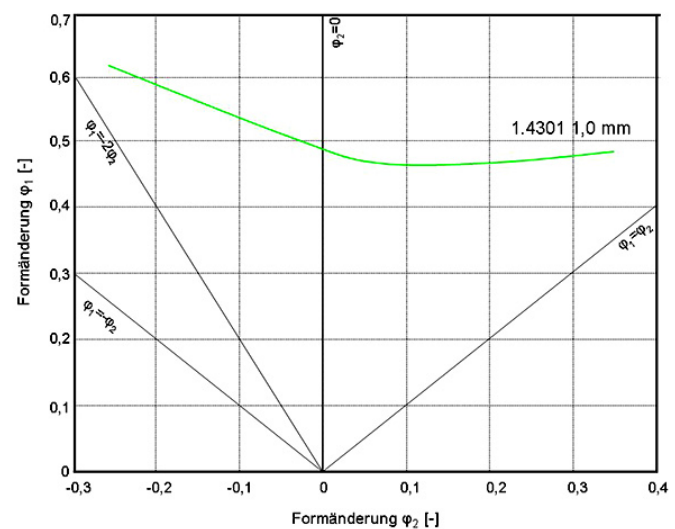
**Bild 2**

Kaltverfestigung metastabiler austenitischer Stähle, nach [8]



**Bild 3**

Grenzformänderungsschaubild für den Werkstoff 1.4301



wie direkt in  $\alpha'$ -Martensit umgewandelt Gefüge auf [8; 9].

Die verformungsinduzierte Martensitevolution ist abhängig von der Temperatur, dem Umformgrad und der Umformgeschwindigkeit. Während große Umformgrade die Materialausstreckung günstig beeinflussen und damit die Martensitevolution verstärken, verhindern Temperaturen oberhalb von ca.  $T = 80^\circ\text{C}$  die Martensitbildung während des Umformprozesses. Temperaturen im Bereich von ca.  $T = 20^\circ\text{C}$  bis  $T = -5^\circ\text{C}$  unterstützen hingegen den Umwandlungsmechanismus.

### Die Martensitevolution beim Tiefziehprozess

Zunächst wurden zur Beschreibung der verformungsinduzierten Martensitbildung, Werkstoffcharakterisierungen wie Marciniak-, Nakajima- und Zugversuche für die betrachteten Stäh-

le 1.4301 und TRIP700 durchgeführt. Die so erhaltenen Werkstoffdaten bilden die Ausgangsbasis für die FE-Simulation der Martensitausbildung in Umformprozessen. Im Zugversuch zeigt der Edelstahl eine erwartungsgemäß hervorragende Umformbarkeit. Der hochfeste TRIP700 zeichnet sich durch eine sehr hohe Festigkeit bei gleichzeitig guter Umformbarkeit aus. Hierbei wird aufgrund der auftretenden lokalen Verfestigung die Gleichmaßdehnung zu höheren Dehnungswerten verschoben [11].

Mit Hilfe des Marciniak- bzw. Nakajima-Versuchs ist die Erstellung des Grenzformänderungsschaubildes möglich. Mit Hilfe von sieben Probengeometrien können unterschiedliche Beanspruchungs- sowie Spannungszustände dargestellt werden. Es wird so die Abbildung des Versagens durch Einschnürungen oder das Auftreten von Reißern ermöglicht. In Bild 3 ist

das Grenzformänderungsschaubild des Edelstahl 1.4301 auf Basis des Nakajima-Versuches erstellt worden. Werkstoffversagen tritt in Folge von Dehnungszuständen oberhalb der Materialtoleranz auf. Ab dieser Toleranzgrenze treten Instabilitätszustände der Grenzformänderung des Blechwerkstoffs ein.

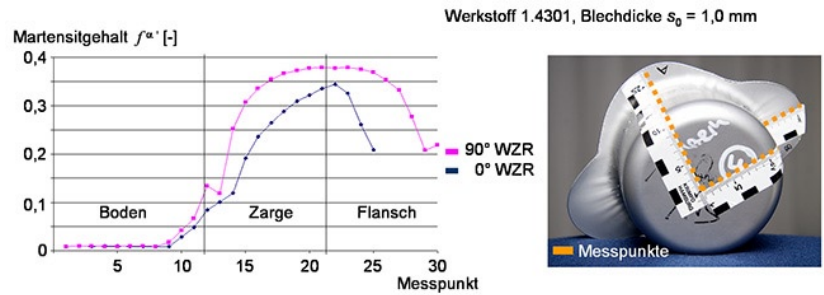
Erste Versuche zur grundlegenden Untersuchung des Martensitbildungmechanismus in tiefgezogenen Blechen wurden am Beispiel eines Rundnapfes mit einem Durchmesser von  $d = 100$  mm bei einer Ziehtiefe von  $h = 60$  mm durchgeführt. Untersucht wurden die Blechdicken  $s_0 = 1,0$  mm und  $s_0 = 0,8$  mm des Werkstoffes 1.4301. Durch die Wahl eines rotations-symmetrischen Bauteils wird der Geometrieinfluss reduziert. Der Martensitgehalt wird zerstörungsfrei durch die Messung des Ferritgehaltes nach dem Umformprozess ermittelt. Hierzu werden die ausgewählten Messpunkte des Rundnapfes mit dem Ferritscope MP3C vermessen. Das erzielte Messergebnis wird entsprechend der vorliegenden Blechdicke am Messpunkt kalibriert, um abschließend den Ferrit in den Martensitgehalt umzurechnen.

Um eine Aussage bezüglich des Anisotropieinflusses auf die Martensitbildung zu erhalten, wurden die betrachteten Blechdicken des 1.4301 jeweils entlang der 90°- sowie 0°-Walzrichtung (WZR) analysiert (Bild 4). Die Nöpfe wurden beginnend in der Mitte des Bodens bis zum Flansch vermessen. Der Abstand zwischen zwei Messpunkten beträgt jeweils 5 mm. Deutlich zu erkennen ist die Abhängigkeit der Martensitevolution von der Ausstreckung des Materials. Eine maximale Martensitkonzentration kann im Übergangsbereich zwischen Zarge und Flansch beobachtet werden. Sichtbar wird ebenfalls die Abhängigkeit der Gitterstrukturumwandlung von der Werkstoffanisotropie, bedingt durch die Walzrichtung.

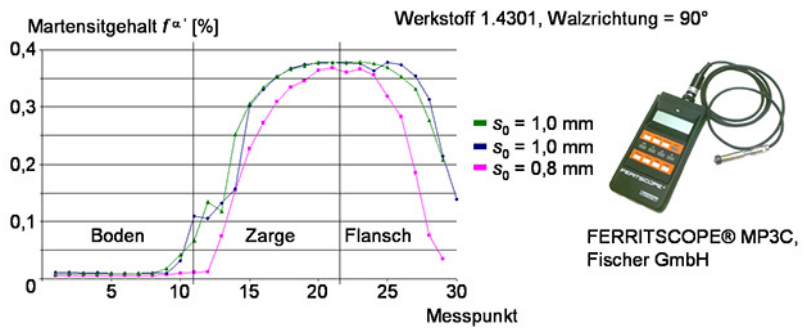
Bedingt durch die Materialanisotropie zeigen sich Unterschiede bezüglich des maximalen Martensitgehaltes.

Des Weiteren wurden vergleichende Blechdickenuntersuchungen des Edelstahl 1.4301 mit einer Walzrichtung von 90° bezüglich des Martensitgehaltes durchgeführt (Bild 5). Unterschiedliche Materialdicken von

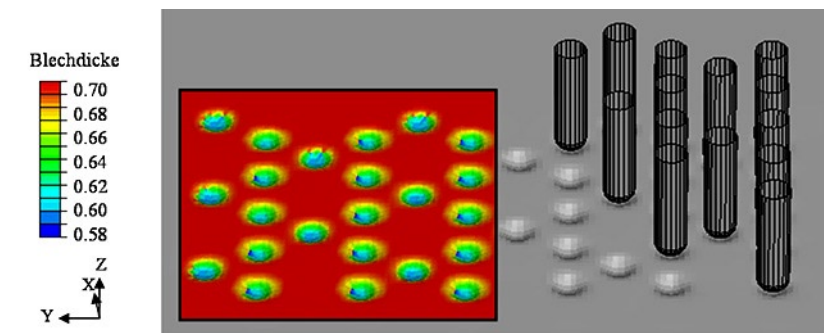
**Bild 4** Martensitgehalte der Walzrichtungen 0° und 90°



**Bild 5** Martensitgehalte in verschiedenen Blechdicken, Ferritscope MP 30



**Bild 6** Simulation der Blechdickenverteilung eines Strukturfeldes



$s_0 = 1,0$  mm und  $s_0 = 0,8$  mm zeigten keine bemerkenswerten Abweichungen im Verlauf der Martensitevolution. Vielmehr weisen die dargestellten Bereiche eine ähnliche Ausbildung des Martensitgehaltes und somit eine verwandte Tendenz auf.

**Strukturfeldoptimierung mittels Finite-Element-Simulation**

Auf diese Versuche aufbauend wurden in weiteren Untersuchungen Strukturen verschiedener Anordnungen in das Material 1.4301 eingebracht (Bild 1). Erste Versuche an Tiefziehbauteilen zeigten bei durch Neben-

formelemente teilstrukturierten Platinen eine Erhöhung des Beulwiderstandes im Vergleich zum unstrukturierten Zustand.

Diese Strukturfelder sind ein Ausblick auf die zukünftige Realisierung von umformtechnisch erzeugten Bereichen durch Nebenformelemente zur Festigkeits- und Steifigkeitserhöhung. Anhand der Strukturfelder wird die Streckziehfähigkeit des Materials deutlich. Die extreme Ausstreckung des Materials durch das Einbringen dieser Strukturen unterstützt die Martensitevolution besonders stark.

Die Eignung unterschiedlicher Strukturierungen wird mit Hilfe von

Simulationen auf Basis der Finite-Element-Methode (FEM) untersucht. Durch die Simulation von Blechumformvorgängen werden kritische Bauteilbereiche ohne kostenintensive Try-out-Prozesse detektiert.

Auf diese Weise können wichtige Ergebnisse für die anstehende Entwicklung und Konstruktion eines geeigneten Tiefziehwerkzeuges erzielt werden, das durch die Implementierung von Nebenformelementen die gezielte verformungsinduzierte lokale Martensitevolution im Tiefziehprozess unterstützt.

Eine Herausforderung ist die Berücksichtigung der Martensitevolution in der Simulation. Am IFUM wurde mit Hilfe von numerischen und experimentellen Untersuchungen an dem metastabilen austenitischen CrNi-Stahl 1.4301 ein Werkstoffmodell entwickelt und validiert [12]. Dieses Modell berücksichtigt die Martensitbildung in Abhängigkeit von der Temperatur  $T$ , dem Umformgrad  $\varphi$  und des Spannungszustandes in Form des Quotienten der Hauptspannungen  $\sigma_1/\sigma_2$  und des Spannungstensors  $\underline{\Sigma}$ . Die Berechnung erfolgt inkrementell aber weitgehend zeitschrittunabhängig auf Basis folgender Gleichungen, wobei  $A, B, C, D, E, F, G, H$  werkstoffabhängige Konstanten sind.

$$\left(\frac{\partial f^\alpha}{\partial \varphi}(f^\alpha, T, \varphi)\right)_{\text{einachs}} = (1 - f^\alpha) \cdot \frac{C \cdot \varphi^{-1}}{1 - A \cdot e^{D + \frac{B}{T}} \cdot \varphi^{-C}}$$

$$\left(\frac{\partial f^\alpha}{\partial \varphi}(f^\alpha, T, \varphi, \underline{\Sigma})\right)_{\text{zweiachs}} = \left(\frac{\partial f^\alpha}{\partial \varphi}(f^\alpha, T, \varphi)\right)_{\text{einachs}} + E \cdot (1 + f^{\alpha'F}) \cdot \frac{e^{G-T}}{1 + e^{G-T}} \cdot \sqrt{\varphi} \cdot \left(1 + H \cdot \text{sigmoid}\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)\right)$$

Mit Hilfe dieses Modells, basierend auf dem Werkstoffmodell nach Tsuta et al. [13], kann die Martensitevolution sowohl für den einachsigen als auch für den zweiachsigen Spannungszustand beschrieben werden. Hierzu war es nötig ein numerisches Verfahren zu entwickeln, das einen Blechumformprozess thermisch-mechanisch stabil berechnet. Mit Hilfe der Finite-Differenzen-Methode (FDM) wird die Wärmeentwicklung in Blechstrukturen berechnet. Das Evolutionsmodell und ein entwickeltes Verfesti-

gungsgesetz wurden in die explizite FEM-Software Abaqus/Explicit implementiert [5]. Auf diese Weise ist es möglich, den Einfluss der Martensitbildung auf die Werkstückeigenschaften abzubilden [2; 12]. Die beschriebene FE-Simulation ist eine grundlegende Voraussetzung für die geplanten Untersuchungen an komplexen Strukturierungsgeometrien. In Bild 6 ist beispielhaft eine mögliche Stempelanordnung mit ihrer Blechdickenverteilung abgebildet.

### Belastungsangepasste Strukturen durch Martensitbildung

Die Realisierung von Bauteilen mit belastungsangepassten Eigenschaften durch Martensitevolution soll eine definierte Energieabsorption bei Impactbelastung lokal ermöglichen. Des Weiteren führt die Herstellung hochfester, belastungsangepasster Strukturen zu neuen Gestaltungs- und Produktionskonzepten. Im Rahmen des vorgestellten Projektes werden Grundlagenuntersuchungen zur Erzeugung partiell verfestigter martensitischer Bereiche durch Kaltumformung durchgeführt und die erzeugbaren Maximalhärten und -festigkeiten ermittelt. Es erfolgt die Aufstellung einer Prozesssystematik, um mit geeigneten Tiefziehwerk-

zeugen die gezielte umformtechnische Erzeugung von Martensit lokal zu realisieren. Ferner werden diese Strukturen im Fügeprozess untersucht. Begleitet werden diese Arbeiten von FEM-Simulationen der lokalen Temperaturen, mechanischen Spannungen und des Umformgrades zur Vorhersage der Martensitbildung. So soll es zukünftig möglich sein, durch die verformungsinduzierte Martensitbildung während des Umformprozesses, belastungsangepasste Bauteile zu erzeugen.

### Literatur

- [1] Angel, T.: Formation of Martensite in Austenitic Stainless Steels; Journal of the Iron and Steel Institute, Mai 1954, S. 165-174
- [2] Behrens, B.-A., Doege, E., Springub, B.: Transformation induced martensite evolution in metal forming processes of stainless steels, steel research 7/2004, S. 475-482
- [3] Behrens, B.-A.; Hübner, S.; Sunderkötter, C.; Knigge, J.; Weilandt, K.; Voges-Schwieger, K.: Creation of high strength metallic structures and joints by setting up scaled local material properties. Trans Tech Publications, Switzerland, 2007
- [4] Cina, B.: Effect of cold work on the  $\alpha \rightarrow \chi$  transformation in some Fe-Ni-Cr alloys. Journal of the Iron and Steel Institute, 1954, S. 406-422.
- [5] Doege, E.; Ropers, C.: Berechnung der Wärmeleitung in dreidimensional geformten Blechen mit der Finite-Differenzen-Methode. Forschung im Ingenieurwesen 65, 1999, S.169-177
- [6] Eichelmann jr., G.H.; Hull, F.C.: The effect of composition on the temperature of spontaneous transformation of austenite to martensite in 18-8-type stainless steel; Trans. ASM 45, 1953, S. 77-95
- [7] Goodschild, D.; Roberts, W. T.; Wilson, D. V.: Mechanical behaviour of textured austenitic stainless steel. Journal of the Iron and Steel Institute, 1971, S. 283-290
- [8] Lindenberg, H.-U.; Kazmierski, O.; A. Otto: Kaltgewalztes Band aus nichtrostenden Edelmetallen und die Anwendungspotentiale, Stahl und Eisen, Vol. 5 2000, S. 37-42
- [9] Mangonon, P.; Thomas, G.: The martensite phases in 304 stainless steel. Metall. Trans. 1, 1970, S. 577-586
- [10] Palkowski, H. (Hrsg.), et.al.: Sonderforschungsbereich 675 – Erzeugung hochfester metallischer Strukturen und gezieltes Einstellen lokaler Eigenschaften. Erstantrag, TU Clausthal Universität Hannover, 2006
- [11] Röthler, B.: Möglichkeiten zur Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften von kaltgewalzten TRIP-Stählen, Dissertation, Technische Universität München, 2005
- [12] Springub, B.: Semi-analytische Betrachtung des Tiefziehens rotationsymmetrischer Bauteile unter Berücksichtigung der Martensitevolution; Dissertation, Universität Hannover; PZH-Verlag, 2006
- [13] Tsuta, T.; Cortes R.: Flow Stress and Phase Transformation Analyses in Austenitic Stainless Steel under Cold Working, Part 2, JSME International Journal, 1993

### Autoren

- Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens studierte Maschinenbau an der Universität Hannover und promovierte am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) in Hannover. Er war Leiter der Abteilung Umformtechnik bei der Salzgitter AG. Im Jahr 2002 ist sein Verantwortungsbereich auf die gesamte Anwendungstechnik des Konzerns erweitert worden. Seit Oktober 2003 ist er Leiter des IFUM der Leibniz Universität Hannover.
- Dr.-Ing. Sven Hübner studierte Bauingenieurwesen an der Universität Hannover und promovierte am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Fakultät Maschinenbau an der Universität Hannover. Seit 2003 leitet er die Abteilung Blechumformung am IFUM.
- Dipl.-Ing. Kathrin Voges-Schwieger studierte Maschinenbau an der Universität Hannover. Seit 2006 ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung Blechumformung am IFUM.
- Seit Abschluss des Mathematikstudiums im Jahr 2005 an der Universität Paderborn ist Dipl.-Math. Katrin Weilandt wissenschaftliche Mitarbeiterin am IFUM in der Abteilung Numerische Methoden.