

## Manuscript No. G 02 #12

*Reimund Neugebauer, Hans Bräunlich, Wolfgang Heidl, Detlef Michael*

# Erweiterte Ansätze und Methoden zur Identifikation des plastomechanischen Materialverhaltens von Blechwerkstoffen

**keywords:** Blechprüfung, Prüfverfahren, konventioneller Zugversuch, Maxi-Bulge-Test, Zug-Druck-Versuch für Blechwerkstoffe, Identifikation von Materialparametern

**Abstract:** Neben dem konventionellen Zugversuch liefern neue Prüfverfahren wie der Maxi-Bulge-Test und der Zug-Druck-Versuch für Blechwerkstoffe detaillierte Daten und Kennwerte zum Materialverhalten bei Fließbeginn, oberhalb der Gleichmaßdehnung und in Abhängigkeit von der Anisotropie der Werkstoffe. Die Ermittlung der Materialparameter stellt für sich eine inverse Aufgabe dar, die durch ein nichtlineares Optimierungsproblem approximiert werden kann, das die bestmögliche Anpassung von gemessenen und berechneten lokalen bzw. globalen mechanischen Größen ermöglicht. Damit werden die Grundlagen für eine bessere und kostengünstigere Prozessauslegung und Methodenplanung geschaffen.

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Reimund Neugebauer, Institutsleiter  
Dr.-Ing. Hans Bräunlich, Hauptabteilungsleiter Umformtechnik  
Dr.-Ing. Wolfgang Heidl, wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Dr.rer.nat. Detlef Michael, wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Fraunhofer Institut Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz/Deutschland

## Einleitung

Bei der Simulation von Blechumformprozessen taucht die Forderung nach dem Einsatz von Methoden auf, die eine realistische und reproduzierbare Abbildung des Werkstoff- und Umformverhaltens zulassen. Zur Optimierung von Umformprozessen und zur realitätsnahen Berechnung sind geeignete Materialgesetze, welche die Abhängigkeit des elastisch-plastischen Materialverhaltens von der Deformationsgeschichte und der plastischen Anisotropie des Werkstoffverhaltens berücksichtigen, notwendig. Ein weiterer grundlegender Aspekt ist, dass eine große Anzahl von teilweise auch physikalisch begründeten phänomenologischen Ansätzen zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Metallen im elastisch-plastischen Bereich vorliegt, die darin enthaltenen Materialparameter und auch Evolutionsgleichungen jedoch nur in wenigen Fällen bekannt sind.

Dem Rechnung tragend, wird ein erweitertes Konzept zur reproduzierbaren und detaillierteren Ermittlung von Werkstoffparametern vorgestellt [1]. Ein Hauptanliegen ist neben der Charakterisierung des Materialverhaltens über einen großen Beanspruchungsbereich, insbesondere die nachhaltige Verbesserung der Abbildungs- und Aussagegenauigkeit in der FE-Simulation. Neben den üblicherweise ermittelten Kennwerten zum

isotropen Verfestigungsverhalten sind Kennwerte zur Charakterisierung nahezu der gesamten Komplexität des elastisch-plastischen Materialverhaltens von Blechwerkstoffen zu ermitteln. Durch die Synergie unterschiedlicher Prüfversuche unter Einsatz multikriterieller nichtlinearer Optimierungsverfahren [2] kann diese anspruchsvolle Aufgabenstellung einer verwertbaren Lösung zugeführt werden.

### **Ausgangspunkte zur Materialbeschreibung**

Bei der theoretischen Beschreibung des Deformationsverhaltens metallischer Werkstoffe werden die Fließorte mit einer Fließfunktion im Spannungsraum beschrieben, und das plastische Fließen wird mit einer Fließregel (Normalenregel) bestimmt. Die bekanntesten und heute noch überwiegend verwendeten isotropen Fließfunktionen sind die nach Tresca und nach von Mises. Die bekannteste anisotrope Fließfunktion geht auf Hill zurück. Insbesondere zur verbesserten Beschreibung des komplexen Fließverhaltens von Aluminium und anderen NE-Werkstoffen wurden z.B. von Barlat und Karafillis und Boyce allgemeinere anisotrope Fließfunktionen formuliert. Allen genannten Fließfunktionen ist gemeinsam, dass die Modellparameter im Prinzip näherungsweise aus den  $r$ -Werten einachsiger Zugversuche mit unterschiedlichen Probenorientierungen gewonnen werden können [3].

Neben einer Fließfunktion zur Beschreibung der ursprünglichen Fließorte müssen für ein Materialmodell auch Annahmen zur Entwicklung der Fließfunktion infolge Materialverfestigung getroffen werden. Isotrope Verfestigungsmodelle gehen davon aus, dass eine Materialverfestigung sich in jeder Richtung gleichermaßen auswirkt. Zusätzlich zeigt sich bei einem Wechsel der Belastungsrichtung in vielen Fällen ein ausgeprägter Bauschinger-Effekt. Ein mehrachsiges anisotropes Verfestigungsmodell zur Berücksichtigung dieses Phänomens wurde zuerst von Armstrong und Frederick vorgeschlagen und später von Chaboche erweitert.

Dieser Zugang ist auch in Finite-Element-Programmen, die für die Prozessauslegung und Werkzeugoptimierung eingesetzt werden, implementiert. Das Materialverhalten wird dort im Kontext der phänomenologischen Plastomechanik beschrieben. Folglich erscheint es als zwingend, das Materialverhalten auch in diesem Kontext zu identifizieren.

### **Prüfverfahren**

#### **Zug-Druck-Prüfversuch**

Zug-Druck-Prüfversuche für Blechwerkstoffe gehören noch nicht zu den Standardprüfverfahren der Blechprüfung, etabliert sind derartige Prüfversuche vorrangig für Massivwerkstoffe. Eine Analyse der

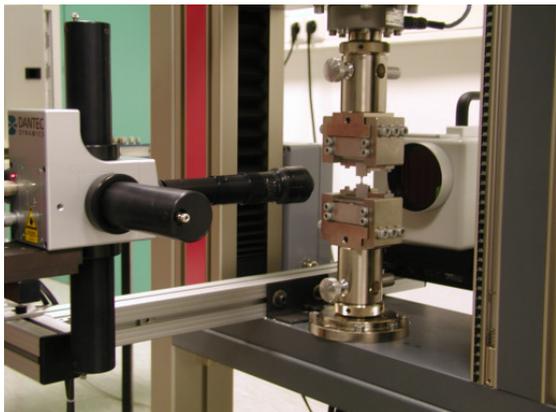
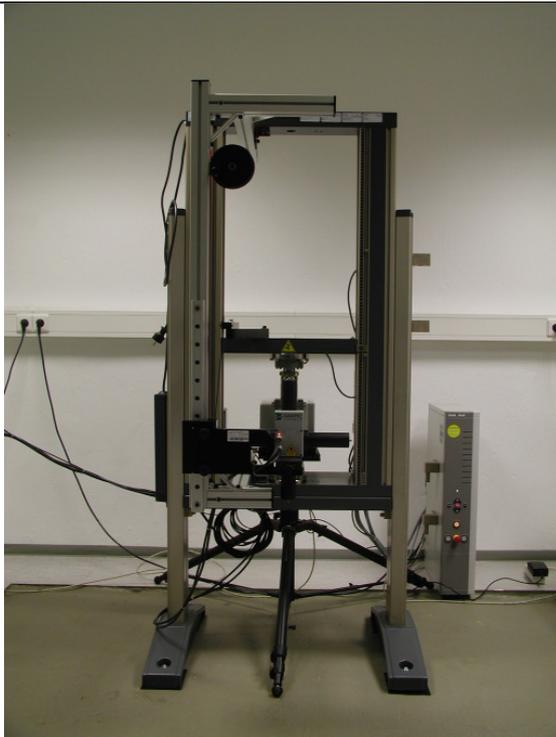


Bild 1: Zug-Druck-Prüfeinrichtung mit Messsystem

verfügbaren Prüfmöglichkeiten führte zu dem Ergebnis, dass eine verifizierte Prüfvorrichtung für Bleche erforderlich ist [4, 5], die Messdaten sowohl im Zug-Bereich als auch im Druck-Bereich, aber auch bei Lastrichtungswechsel (zyklische Versuche) liefert. Als Messsystem wurden deshalb ein elektronisches Laser-Speckle-Interferometer (ESPI) als Dehnungsmesssystem und eine Thermographiekamera zur Detektierung des Fließbeginns ausgewählt (Bild 1). Somit ist eine ortsauflösende Dehnungsmessung der beiden Komponenten in der Blechebene verfügbar, die Nutzung des Joule-Thomson-Effekts erlaubt eine objektive Bestimmung des Fließbeginns. Mit diesen Versuchsaufbauten kann sowohl das isotrope als auch das kinematische Verfestigungsverhalten aufgeklärt werden. Da bei der umformtechnischen Herstellung von Blechformteilen (Karosserieteile) der gesamte Spannungsbereich (Streckziehen, Tiefziehen, kombinierte bzw. überlagerte Streckzieh-

und Tiefziehbeanspruchung) vorzufinden ist, ist es wünschenswert, das Fließverhalten an möglichst vielen Punkten im Spannungsraum experimentell abzusichern, dem tragen die vorgestellten Versuche Rechnung.

#### Maxi-Bulge-Test

Aus der alleinigen Anwendung der Zug-Druck-Prüfung sind ausschließlich Aussagen für Spannungen bis maximal von der Größenordnung von  $R_{p0,2}$  möglich. Durch die Synergie mit dem einachsigen Zugversuch ist eine Extrapolation des Fließverhaltens bis zur Gleichmaßdehnung  $A_g$  und mittels des Maxi-Bulge-Tests (MBT) auch weit darüber hinaus möglich.



Bild 2: MBT-Werkzeug im eingebauten Zustand und umgeformte MBT-Probe

Der konventionelle hydraulische Tiefungsversuch mit einem Matrizendurchmesser von 100 mm bringt auf Grund einer Reihe von verfahrensbedingten und auswertungsbedingten Nachteilen nicht die erwarteten Ergebnisse bei der Fließkurvenermittlung. Deshalb wurde von den Autoren ein neuer Prüfversuch in Form eines sogenannten „Maxi-Bulge-Tests“ konzipiert und aufgebaut [1, 3, 4], um die Kennwertermittlung entscheidend bezüglich Aussagegehalt und Reproduzierbarkeit zu verbessern. Das Oberwerkzeug besteht aus einer Kopfplatte, 8 massiven Säulen und dem Ziehring (Bild 2). Im Unterwerkzeug sind die Befüllöffnung und ein Drucksensor angeordnet. Der Druckaufbau erfolgt mit einem separaten Hydraulik-Aggregat mit einem maximalen Systemdruck von 250 bar. Die In-Prozess-Druckmessung erfolgt mit einem schnellen Drucksensor.

Die Fließspannungen und der Vergleichsumformgrad ergeben sich aus den Beziehungen:

$$k_f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{2} \left( \frac{r_0 + r_{90}}{r_0 + r_{90} + r_0 r_{90}} \right)} \cdot p \left( \frac{R_1}{s_1} + 1 \right) \quad (1)$$

$$\varphi_v = \sqrt{\frac{2}{3} \left( \frac{r_0 + r_{90} + r_0 r_{90}}{r_0 + r_{90}} \right)} \cdot \left| \ln \frac{s_1}{s_0} \right|$$

Das MBT-Werkzeug wird in eine Hydroforming-Presse SHP 50000 eingebaut, mit der es möglich ist, in Abhängigkeit vom zu prüfenden Werkstoff extrem hohe erforderliche Haltekräfte bis zu 50000 kN aufzubringen. Mittels eines an der Kopfplatte befestigten Kamerasystems, bestehend aus vier Kameras, erfolgt die In-Prozess-Messung der Formänderungen und der Krümmungen im Pol der Bulge-Probe. Für die Maxi-Bulge-Tests wird vorzugsweise ein Ziehring mit einem Innendurchmesser von 500 mm eingesetzt. Die Steuerung des gesamten Prüfablaufs erfolgt über einen übergeordneten Rechner, der eine synchrone Datenaufnahme gewährleistet.

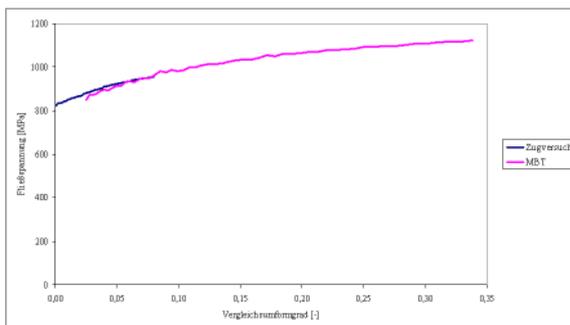


Bild 3: Fließkurvenvergleich hochfester Stahl

Die mit dem MBT mögliche Ermittlung tatsächlicher Verfestigungsverläufe oberhalb der Gleichmaßdehnung (Bild 3) bildet eine wesentliche belastbare Grundlage für eine realitätsnahe Prozessoptimierung mit Hilfe numerischer Simulationstechniken.

### Auswertestrategien

Die Identifikation von Materialparametern ist ein inverses Problem, da die noch unbekannt Parameter auf der Ebene der Beschreibung des realen Materialverhaltens ursächlich für die konkrete Gestalt von Spannungs- und Verzerrungsfeldern sind. Lediglich diese Wirkungen können (zudem nur indirekt, z.B. in Form von Kraft-Verschiebungskurven) gemessen werden. Ein nichtlineares Optimierungsproblem approximiert diese inverse Aufgabe, so dass eine bestmögliche Anpassung von gemessenen und berechneten lokalen bzw. globalen mechanischen Größen erreicht wird [3][5].

$$\Phi(p) \rightarrow \min., \nabla\Phi(p) = 0, |\nabla\nabla\Phi(p)| > 0 \quad (2)$$

Bei der Parameteridentifikation werden ausschließlich Experimente an Proben mit einem homogenen oder nahezu homogenen Spannungszustand ausgewertet. Sie bieten den Vorteil, dass aus gemessenen globalen Größen unmittelbar innere Beanspruchungen wie die lokalen Spannungen und Dehnungen berechnet und als Vergleichsgröße in der zu minimierenden Zielfunktion des zu lösenden Optimierungsproblems verwendet werden können.

Somit wird es möglich, insbesondere Aussagen zu folgenden Fragestellungen zu treffen.

- Welche Materialmodelle sind für die ausgewählten Blechwerkstoffe geeignet?
- Welche Prüfverfahren sollen / müssen dafür genutzt werden?
- Wie ist eine Qualifizierung des Genauigkeitsgrades für die einzelnen Kennwerte und Prüfverfahren möglich?

### Literatur

- [1] W. Heidl, D. Michael: Neuartige Prüfmethode wertet Materialmodelle auf. IWU Chemnitz, Jahresbericht 2005, 36-37.
- [2] U. Benedix: Parameterschätzung für elastisch-plastische Deformationsgesetze bei Berücksichtigung lokaler und globaler Vergleichsgrößen. Dissertation, TU-Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, 2000.
- [3] R. Neugebauer, W. Heidl, D. Michael, P. Gumbsch, W. Schmitt, A. Krasowsky: Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Materialmodellen zur Blechumformsimulation. EFB-Forschungsbericht Nr. 244, 2005.
- [4] R. Neugebauer, M. Putz, W. Heidl, D. Michael: Systematische, erweiterte Kennwertermittlung. 2nd International Conference on Accuracy in Forming Technology ICAFT 2006, Chemnitz 14.-15. Nov. 2006.
- [5] R. Neugebauer, W. Heidl, D. Michael: Identifikation des Materialverhaltens von Blechwerkstoffen des Automobilbaus mittels neuartiger Prüfverfahren und Auswertestrategien. Tagung Werkstoffprüfung 2006, Bad Neuenahr, 07.-08. Dez. 2006.