

Experimentelle Ermittlung und Modellierung dynamischer Fließortkurven an Blechwerkstoffen

Norman Herzig, Shawky Abdel-Malek, Lothar W. Meyer

Nordmetall GmbH, Hauptstraße 16, D-09221 Adorf/Erzgebirge, Germany

www.nordmetall.net, norman.herzig@nordmetall.net

Abstract:

Für eine genaue Bestimmung von Fließortkurven, ist die Ermittlung der Fließspannung bei verschiedenen Spannungszuständen notwendig. Neben dem Zugversuch und der Messung von r -Werten finden dabei auch Druckversuche an kleinen Würfelproben in der Blechebene Anwendung. Das Scherspannungsverhalten wird im Miyauchi-Test gemessen. Ein biaxialer Zug/Zug-Zustand kann mit dem Schichtstauchversuch realisiert werden. Bei den Druck-, Scher- und Schichtstauch-Versuchen werden große Verformungen erreicht und der gesamte Bereich des Zugversuchs bis zur Einschnürung abgedeckt. Diese vier Versuche werden nicht nur quasistatisch, sondern auch quasidynamisch in einer Hydropulsmaschine sowie schlagdynamisch in einem Fallwerk bzw. Rotationsschlagwerk mit präzisen Kraft- und Weg-Messeinrichtungen durchgeführt, so dass die Abhängigkeit der Fließspannung von der Geschwindigkeit genau erfasst wird. Die experimentell ermittelten Daten werden für den Aufbau und die Darstellung von Fließortkurven benötigt. Die Abhängigkeit der Fließspannung von der Temperatur, Geschwindigkeit und Verformung werden mit den konstitutiven Gleichungen beschrieben. Letztlich werden die Möglichkeiten der Ermittlung von Grenzformänderungsschaubildern (forming limit diagram FLD) kurz beschrieben. Diese lassen sich durch Bulge-Versuche nach Nakajima mit verschieden taillierten Probenformen ermitteln.

Keywords:

Experimentelle Fließortkurve, konstitutive Gleichung, Hochgeschwindigkeit, Mini-Druckversuche, Fallwerk, Rotationsschlagwerk, Miyauchi-Test, Nakajima-test.

1 Einleitung

Steigende Anforderungen an die Simulationsgenauigkeit von Umform- und Crash-Vorgängen führen dazu, dass der Einsatz von quasistatischen Werkstoffkennwerten aus einachsigen Spannungszuständen nicht oder nur in einem sehr begrenzten Umfang möglich ist. Der Bedarf an Werkstoffkennwerten bei großen Verformungen und hohen Dehnraten nimmt ständig zu. Um dabei den anisotropen Eigenschaften von Blechwerkstoffen gerecht zu werden, muss das relevante Werkstoffverhalten in unterschiedlichen Versuchen untersucht werden, um die Fließspannung unter verschiedenen Spannungszuständen zu ermitteln und eine genaue Fließortkurve zu beschreiben. Dabei ist der Einfluss der Vorformungsgeschwindigkeit explizit in der experimentellen Ermittlung der Werkstoffkennwerte zu beachten.

Neben dem Zugversuch und der Messung von r -Werten kommen dabei auch Druckversuche an kleinen Würfelproben in der Blechebene zur Anwendung. Scherspannungen werden im Miyauchi-Test gemessen. Ein biaxialer Zug/Zug-Zustand kann mit dem Schichtstauchversuch realisiert werden. Bei den Druck-, Scher- und Schichtstauch-Versuchen werden große Verformungen erreicht und der gesamte Bereich des Zugversuchs bis zur Einschnürung abgedeckt. Diese vier Versuche werden nicht nur quasistatisch, sondern auch quasidynamisch in einer Hydropulsmaschine sowie schlagdynamisch in einem Fallwerk bzw. Rotationsschlagwerk mit präzisen Kraft- und Weg-Messungen durchgeführt, so dass die Abhängigkeit der Fließspannung von der Geschwindigkeit erfasst wird. Unter Verwendung der unter verschiedenen Spannungszuständen und Verformungsgeschwindigkeiten ermittelten Werkstoffkennwerte lassen sich die Modellparameter der für die numerische Simulation verwendeten konstitutiven Gleichungen identifizieren. Zur Ermittlung des Grenzformänderungsschaubildes (forming limit diagram FLD) werden Bulge-Versuche nach Nakajima mit verschiedenen taillierten Probenformen durchgeführt. Die Messung der Verformung in Blechebene erfolgt durch das berührungslos arbeitende Grauwertkorrelationssystem ARAMIS der Fa. GOM, auch bei erhöhten Geschwindigkeiten.

Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die Möglichkeiten der experimentellen Ermittlung von Werkstoffkennwerten für die Beschreibung von Fließortkurven für die numerische Simulation von Umform- und Crashvorgängen, wie sie in der Fa. NORDMETALL üblich sind. Fa. Nordmetall GmbH in Adorf/Erzg. ist eine Ausgründung aus dem Lehrstuhl "Werkstoffe des Maschinenbaus" der TU Chemnitz von Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Lothar W. Meyer. Dabei werden im Speziellen die Möglichkeiten der schlagdynamischen Prüfung von Werkstoffen bei hohen Dehnungsgeschwindigkeiten erläutert.

2 Experimentelle Ermittlung der Fließortkurve

Zum Beschreiben des plastischen Verhaltens metallischer Werkstoffe werden zwei Arten von Informationen benötigt: eine Fließkurve zum Beschreiben der Werkstoffverfestigung bei fortlaufender plastischer Verformung und eine Fließortkurve zum Beschreiben des Beginns des Fließens in Abhängigkeit des Spannungszustands. D.h., während bei Fließkurven das mechanische Werkstoffverhalten bei großen plastischen Verformungen und konstanten Spannungsverhältnissen erfasst wird, wird bei Fließortkurven der Übergang vom elastischen zum elastisch-plastischen Werkstoffverhalten in Abhängigkeit des Spannungszustandes beschrieben. Für isotrope Werkstoffe wird häufig der Ansatz nach von Mises verwendet. Das von Mises-Kriterium beruht auf der Gestaltänderungs-Energie-Hypothese, nach der das plastische Fließen einsetzt, wenn die elastische Verformungsenergie pro Volumen einen kritischen, materialabhängigen Wert erreicht.

Für anisotrope Werkstoffe gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Ansätze zur Ermittlung von Fließortkurven:

- a) Kristallplastisch: Durch die Bestimmung der kristallographischen Texturen und der „orientation distribution function ODF“, mit Hilfe dieser bei der Anwendung der Taylor-Theorie eine Fließortkurve berechnet werden kann.
- b) Phänomenologisch: Durch die Bestimmung mechanischer Kennwerte und die Berechnung der Fließortkurve nach einem phänomenologischen Fließkriterium.

Im ebenen Spannungszustand wird das Fließkriterium als eine Ellipse dargestellt, die durch die Anisotropie verzerrt sein kann. Häufig werden zu ihrer Beurteilung lediglich einachsige Zugversuche herangezogen, mit denen aus mathematischen und mechanischen Zusammenhängen ein Fließkörper berechnet wird. Aufgrund der Abhängigkeit des plastischen Fließens von Metallen vom Spannungszustand im Werkstoff kann dieser Ansatz jedoch deutlich vom realen Werkstoffverhalten abweichen.

Bild 1 zeigt die unterschiedlichen Spannungszustände, welche für eine eindeutige Beschreibung der Fließortkurve im σ_1 - σ_2 -Raum notwendig sind. Um eine Fließortkurve experimentell sicher zu

bestimmen, muss das Werkstoffverhalten entsprechend den real vorliegenden Spannungszuständen experimentell ermittelt werden. Treten dabei hohe Verformungsgeschwindigkeiten auf, so kann sich die Fließortkurve erweitern (isotrope Verfestigung) oder verschieben (kinematische Verfestigung). Im Folgenden werden die bei NORDMETALL vorhandenen Prüfverfahren zum Realisieren der verschiedenen Spannungszustände und unterschiedlichen Geschwindigkeiten erläutert.

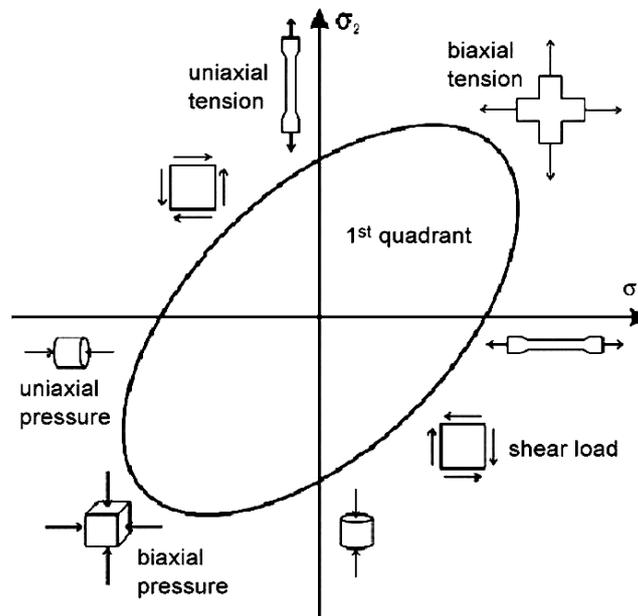


Bild 1: Fließortkurve im σ - σ -Raum mit den Spannungszuständen für eine eindeutige experimentelle Beschreibung [1]

2.1 Zugversuch

Der Zugversuch ist der wichtigste Versuch in der mechanischen Werkstoffprüfung. Dabei werden die einachsigen Fließspannungen im ersten Quadranten der Fließortkurve bestimmt. Darüber hinaus werden anhand der Zugproben auch die Anisotropie-Werte (r -Werte) ermittelt, die für die Berechnung von Fließkriterien benötigt werden. Zur Ermittlung des Einflusses der Dehnraten werden die Zugversuche bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt. Quasistatische Zugversuche können mit konventionellen mechanischen Prüfmaschinen vorgenommen werden. An servohydraulischen Maschinen werden Versuche bis zu $\dot{\epsilon} = 20 \text{ s}^{-1}$ realisiert. Für höheren Dehnraten kommen prinzipiell zwei Versuchseinrichtungen in Frage: der Split-Hopkinsonaufbau und das Rotationsschlagwerk. Obwohl der Split-Hopkinsonaufbau bei der Durchführung von Druckversuchen sehr befriedigende Ergebnisse aufweist, kann bei Hopkinson-Zugversuchen infolge der Probengröße und der auftretenden Signalstörungen aus Wellenreflexionen am Impedanzsprung zwischen Probe und Stange das gewünschte Werkstoffverhalten durch Störungen bis zur Unkenntlichkeit verdeckt sein. Bei NORDMETALL wird aus diesem Grund das Rotationsschlagwerk für die Zugversuche bei höheren Dehnraten $\dot{\epsilon} = 10^2 \text{ s}^{-1} - 5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ eingesetzt.

Das Rotationsschlagwerk [2], Bild 2, besteht aus einer Schwungscheibe, die mit einem Elektromotor bis zu einer Umfangsgeschwindigkeit von 50 m/s beschleunigt werden kann. Die Schwungscheibe enthält eine zweiarmige Schlagkralle, die während der Beschleunigungsphase eingezogen ist und erst bei der gewünschten Nenngeschwindigkeit über einen elektromagnetischen Schalter entriegelt und durch die wirkende Zentrifugalkraft innerhalb einer Umdrehung ausgeklinkt wird. Die ausgefahrene Kralle trifft auf das Joch, das an der vor der Scheibe angeordneten Probe angeschraubt ist, und verformt die Probe bis zum Bruch. Die Überschussenergie der Scheibe ist so groß, dass die Änderung der Dehngeschwindigkeit während des Versuchs vernachlässigt werden kann. Die Probe wird exakt in der Achse der Messlänge ohne das Auftreten eines Biegemomentes belastet. Dadurch sind schwingungsarme Messungen bei Schlaggeschwindigkeiten bis 40 m/s möglich. Infolge der hohen gespeicherten Energie bleibt die Verformungsgeschwindigkeit während des Versuchs nahezu konstant und selbst hochduktilen und hochfesten Werkstoffe können bei höchsten Geschwindigkeiten bis zum Bruch geprüft werden.

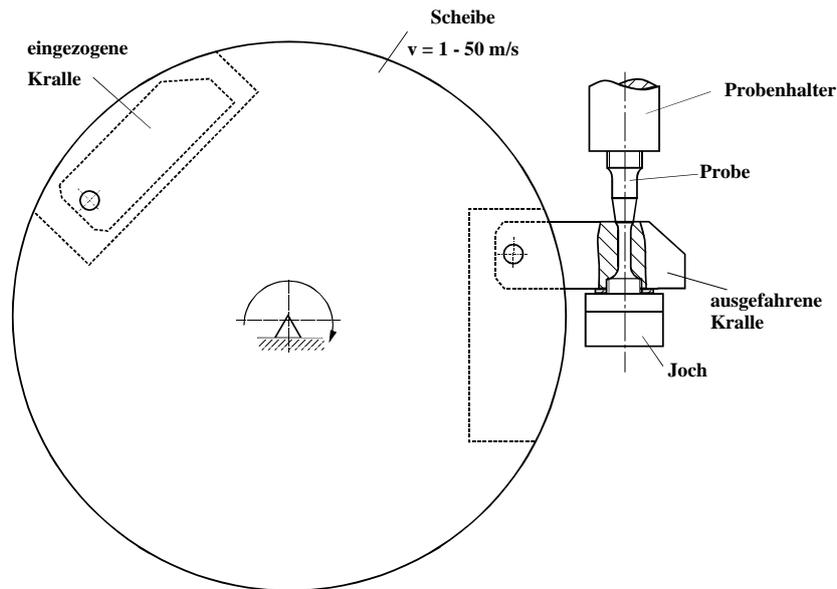


Bild 2: Schematischer Aufbau des Rotationsschlagwerkes

Die Kraftmessung erfolgt direkt an der Probe unmittelbar neben der Messlänge mittels zweier auf der Spannfläche applizierten Dehnungsmessstreifen (DMS). Für jeden geprüften Werkstoff wird ein Kalibrierungsversuch bei $\dot{\varepsilon} = 0,001 \text{ s}^{-1}$ mit derselben Konfiguration der dynamischen Belastung durchgeführt, um den Kalibrierfaktor der Spannung zu ermitteln. Unter der Annahme, dass der E-Modul unabhängig von der Geschwindigkeit ist, wird die Spannung aus den DMS-Signalen und der Querschnittsfläche berechnet. Die Dehnungsmessung erfolgt bis ca. $\varepsilon = 3\%$ mit den auf der Messlänge applizierten DMS. Die hohen Verformungen werden mit einem elektro-optischen Extensometer der Firma Zimmer (Bandbreite 400 kHz) gemessen. Die DMS, die für die Kraftmessung bzw. für die Dehnungsmessung vorgesehen sind, werden in einer Messbrücke nach Wheatstone geschaltet. Die Signale werden in einem Messverstärker mit einer hohen Bandbreite von 1 MHz verstärkt. Am Ende der Messkette werden die Signale mit einem Digitalspeicheroszilloskop weiter bearbeitet.

In Bild 3 sind typische Messsignale für einen unlegierten Stahl gezieht. Dabei ist deutlich der Bereich der Lüdersdehnung am Anfang der Fließkurve zu erkennen. Im weiteren Verlauf zeigt sich jedoch ein absolut glatter Verlauf der dynamischen Fließkurve, auch bei hohen Temperaturen, was auf eine sehr hohe Qualität der Kraftmessung schließen lässt.

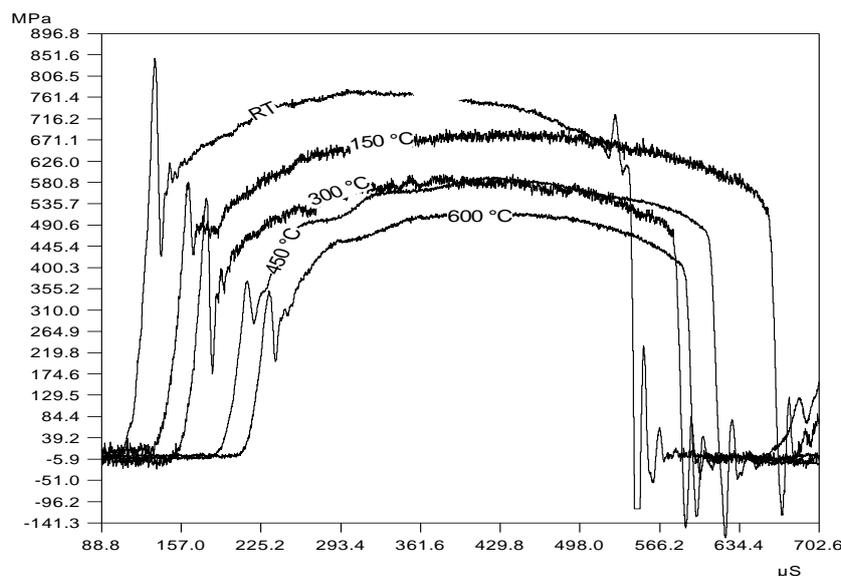


Bild 3: Spannungs-Dehnungsdiagramm für einen unlegierten Stahl mit ausgeprägter Streckgrenze bei 10 m/s Abzugsgeschwindigkeit / Dehnrade 1000 s^{-1} bei verschiedenen Temperaturen.

Um Zugversuche auch über den Gleichmaßdehnungsbereich hinaus auswerten zu können, werden bei der Fa. NORDMETALL auch schlagdynamische Zugversuche mit einer Hochgeschwindigkeits-Verformungsfeldmessung durchgeführt. Dadurch ist es möglich, reibungsfreie Fließkurven auch weit über den Einschnürbereich hinaus bis unmittelbar vor dem Bruch zu ermitteln.

2.2 Druckversuch

Im Zugversuch tritt nach der Gleichmaßdehnung, d.h. bei beginnender Einschnürung, ein mehrachsiger Spannungszustand auf und führt zu einer Instabilität. Ein bedeutender Vorteil des Druckversuchs ist die ausbleibende Instabilität. Dadurch sind höhere Verformungen möglich. Nachteilig ist, dass Reibung an den Stirnflächen der Probe auftritt und die wahre Spannung für höhere Umformgrade überschätzt werden kann. Die Reibung wird im Druckversuch durch eine Schmierung an den Stirnflächen der Probe reduziert.

Eine besondere Herausforderung stellt der Druckversuch an die Prüfung von Feinblechen dar, weil die geringe Dicke des Materials eine Standardprobengeometrie für Druckproben nicht zulässt. Bei der Druckprüfung tritt das Problem des Knickens auf, wenn das Verhältnis zu Breite und Höhe der Probe ungünstig ist. Eine Möglichkeit besteht darin, die Probe auf eine Größe zu skalieren, welche mit der Blechdicke übereinstimmt. Dabei können jedoch sogenannte Skalierungseffekte auftreten, bei der sowohl die veränderten tribologischen Verhältnisse, die Mikrostruktur sowie die Fertigungshistorie der Proben einen erheblichen Einfluss auf das Fließspannungsverhalten haben können [3].

Die quasistatischen Druckversuche werden mit einer Spezialvorrichtung in einer Universal-Prüfmaschine durchgeführt. Die Kraftmessung erfolgt mit der Kraftmessdose in der Maschine. Die Verformung wird mit einem induktiven Weg-Messsystem unmittelbar neben der Probe gemessen, Bild 4. Dadurch werden Steifigkeitseinflüsse der Prüfeinrichtung auf das Messsignal auf ein Minimum begrenzt.

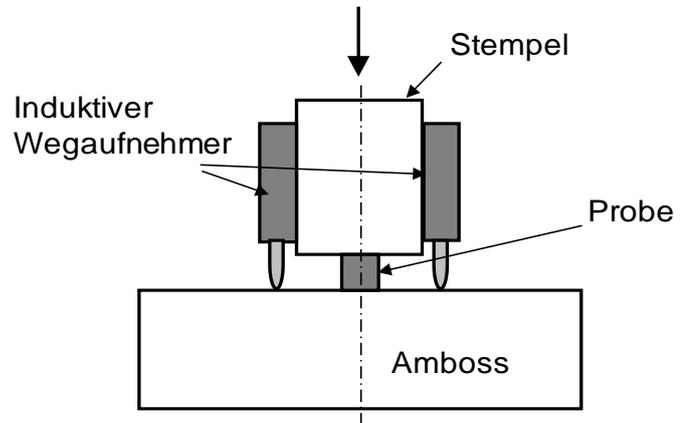
Druckversuche bei $\dot{\epsilon} = 100 \text{ s}^{-1} - 500 \text{ s}^{-1}$ werden in einem Fallwerk durchgeführt. Das Fallwerk, Bild 5, ist eine Eigenentwicklung der Fa. NORDMETALL GmbH. Es besteht aus einem Amboss, einem Rahmen und einem Fallgewicht mit einer definierten Masse. Das Fallgewicht wird mit speziellen Kugellagern präzise im Rahmen geführt. Die Probe wird auf dem Amboss justiert und danach durch den am Fallgewicht befestigten Druckstempel schlagartig belastet. Die Druckkräfte können während des Versuches durch die am Stempel applizierten Dehnungsmessstreifen gemessen und mit Hilfe eines digitalen Speicheroszilloskopes mit hoher Bandbreite erfasst werden. Die Verschiebungsmessung des Fallwegs erfolgt mit einem optischen System der Fa. Heidenhain durch die Abtastung eines Messlineals in der Nähe der Prüfkörper. Es steht eine erheblich höhere Fallenergie zur Verfügung, als zur maximalen Verformung der Probe benötigt wird. Damit bleibt die Geschwindigkeit beim Versuch nahezu konstant. Eine steife Begrenzungsvorrichtung ermöglicht es, beim Erreichen gewünschter Verformungen zu stoppen, ohne die Proben zum zweiten Mal zu belasten.

Druckversuche bei $\dot{\epsilon} = 10^3 \text{ s}^{-1} - 10^4 \text{ s}^{-1}$ werden im Split-Hopkinsonaufbau durchgeführt. Der Split-Hopkinsonaufbau besteht aus insgesamt vier vollkommen fluchtend angeordneten Stäben, die in ihren Lagern frei gleiten können, Bild 6. Ein Projektil oder Stoßstab schlägt gegen einen Eingangsstab und erzeugt eine elastische Druckwelle. Die Druckwelle läuft in den Eingangsstab und erreicht die Probe, die sich zwischen dem Eingangsstab und dem Ausgangsstab befindet. Weil die Amplitude der einlaufenden Druckwelle größer ist als die Fließspannung des Probewerkstoffes, unterliegt die Probe einer plastischen Verformung. Die Spannung wird mit den am Ausgangsstab applizierten DMS gemessen.

Durch eine entsprechende Skalierung der Prüfeinrichtung ist es gelungen, selbst kleinste Druckproben ($\leq \varnothing 1 \text{ mm}$) schlagdynamisch zu verformen und ungestörte Fließkurven zu ermitteln [3]. Diese Versuchsaufbauten finden heute für die Charakterisierung von Automobil-Feinblechen verbreitete Anwendung.



a) Spezial-Druckvorrichtung



b) Versuchsordnung

Bild 4: Spezialvorrichtung und Versuchsordnung für Miniatur-Druckproben

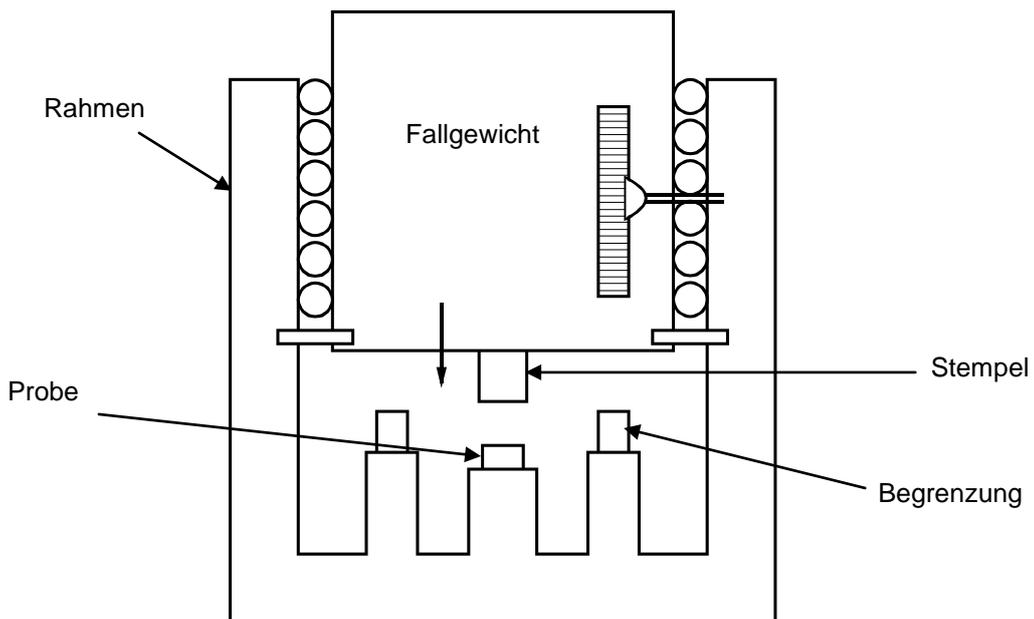


Bild 5: Schematische Darstellung des Fallwerks

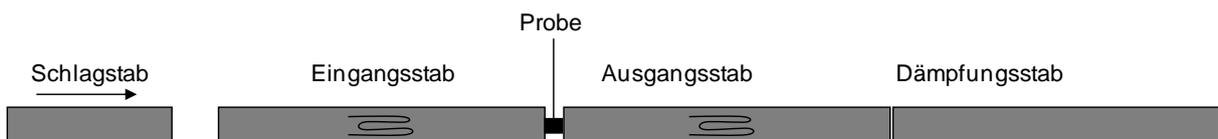


Bild 6: Split-Hopkinsonaufbau

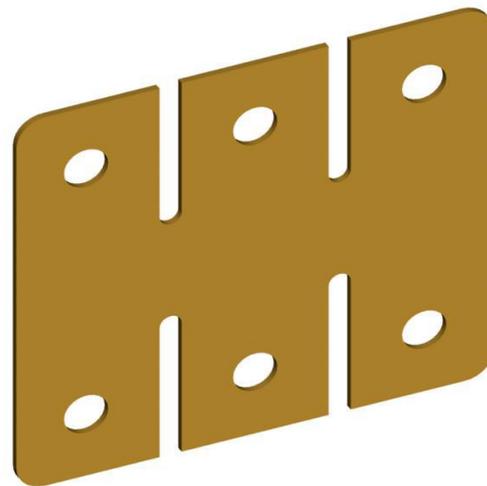
2.3 Scherversuch

In vielen Umformprozessen spielen Scherverformungen eines Werkstoffs eine dominierende Rolle. Werden die Scherspannung dabei auf der Hauptspannungsebene definiert, setzen sie sich aus zwei Normalspannungen zusammen. Zur Ermittlung der Scherfließspannung für Blechwerkstoffe werden in der Literatur zwei Versuche vorgeschlagen: der ebene Torsionsversuch nach Marciniak [4] und der Scherzugversuch nach Miyauchi [5]. Aufgrund der relativ einfachen Realisierbarkeit und der einfachen Adaption der Vorrichtung in verschiedenen Prüfeinrichtungen wurde bei der Fa. NORDMETALL der Scherversuch nach Miyauchi eingeführt. Durch die Adaption sowohl in Universalprüfmaschinen wie auch in Spezialprüfeinrichtungen (z.B. Fallwerksaufbauten) kann das Scherspannungs-Scherdehnungsverhalten von Feinblechen über einen weiten Bereich von Dehnungsgeschwindigkeiten bis $\geq 10^2 \text{ s}^{-1}$ untersucht werden.

Beim Scherversuch nach Miyauchi werden flache, rechteckige Proben mit zwei Scherzonen verwendet. Würde lediglich eine Scherzone zur Anwendung kommen, müssten die Klemmkräfte der Probe und die Anforderungen an die Parallelführung extrem hoch sein, um die Biegung in der Scherzone der Probe während des Versuchs gering zu halten. Dies ist technisch sehr schwierig realisierbar und unsicher. In Bild 7 sind die Einspannvorrichtung und Probenform abgebildet. Die Probe wird in der Vorrichtung derart verspannt, dass ein Verschieben der Probe verhindert wird. Der innere Steg wird durch den Stempel in der Prüfmaschine mit der Kraft F nach unten verschoben, die zwei äußeren Stege sind fest eingespannt. Dadurch entsteht eine Scherverformung zwischen dem inneren und äußeren Steg. Das Verformungsfeld wird mit einem 2D-Aramis-System analysiert, Bild 8. Bei NORDMETALL wird der Miyauchi-Scherversuch in einem weiten Bereich der Geschwindigkeit bis zu $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ ($\dot{\gamma} = 4 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$) durchgeführt. Die Versuche bei langsamen und mittleren Geschwindigkeiten werden in einer Universal-Prüfmaschine bzw. servo-hydraulischer Prüfmaschine durchgeführt. Bei höheren Geschwindigkeiten kommt ein Fallwerk (Bild 5) zum Einsatz. Die Scherdehnungen in der Scherzone der Probe werden dabei durch das Verformungsfeldmessverfahren ARAMIS der Fa. GOM gemessen. Bei schlagdynamischen Prüfungen finden dabei Hochgeschwindigkeitskameras Anwendung.



a) Einspannvorrichtung



b) Probenform

Bild 7: Vorrichtung und Probenform für den Scherversuch nach Miyauchi

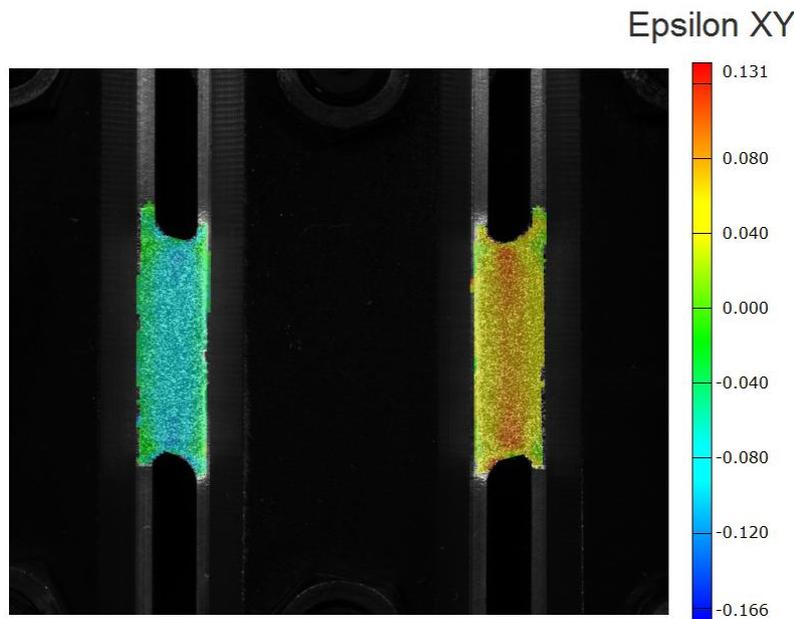


Bild 8: Verformungsfelder einer Scherprobe (mit ARAMIS-System gemessen)

2.4 Schichtstauchversuch

Die Bestimmung von Fließkurven unter Zug-Zug-Beanspruchung ermöglicht die Beschreibung des ersten Quadranten der Fließortkurve im ebenen Spannungsraum. Dazu stehen verschiedene experimentelle Methoden zur Verfügung: der Kreuzzugversuch, der hydraulische Tiefungsversuch (Bulge test) und der Schichtstauchversuch. Ein wichtiger Vorteil des Schichtstauchversuchs gegenüber den anderen Methoden ist die Ermittlung von biaxialen Fließspannungskurven auch bei höheren Geschwindigkeiten.

Die verwendete Probe im Schichtstauchversuch besteht aus mehreren Lagen von Blechronden, die übereinander gestapelt sind und in Blechdickenrichtung gestaucht werden. Die Anzahl der Ronden ist von der Blechdicke abhängig. Es wird ein Probenverhältnis (Durchmesser/Höhe) von 1/1 und ein Durchmesser von ca. 25 mm verwendet, um eine hohe Genauigkeit beim Messen der Verformung zu erreichen. Die einzelnen Ronden sind so auszurichten, dass die relative Lage zur Walzrichtung aller übereinander gestapelten Proben gleich ist. Die Prüfung erfolgte zwischen zwei Druckplatten, die mit MoS₂ geschmiert wurden, um die Reibung an den Stirnflächen zu verringern. Während des Versuches wird der Durchmesser der mittleren Scheiben der Probe aufgezeichnet. Die Aufweitung wurde in jeweils 0° und 90° zur Walzrichtung gemessen. Durch ein System von zwei Kameras und einem Schwarz-Weiß-Kontrast zwischen Probe und Hintergrund ist es gelungen, die Aufweitung in 0° und 90° zu bestimmen. Mit einer selbst entwickelten Prüfsoftware und Auswertesequenz ist die Bestimmung des aktuellen Durchmessers einzelner Schichten möglich. Die Bestimmung der Fließspannung k_f ergibt sich aus der Stempelkraft F und der mittleren Aufweitung aller Schichten der Probe in 0° und 90° Richtung (d_0 und d_{90}) relativ zum Anfangsdurchmesser d_{start} . Der Umformgrad ergibt sich aus Summe der Dehnungen der Probe in 0 und 90° Richtung. Im Bild 9 ist eine unverformte und verformte Probe dargestellt. Im Bild 10 ist eine im Schichtstauchversuch ermittelte biaxiale Fließkurve im Vergleich mit einer einachsigen Fließkurve aus dem Zugversuch dargestellt.

Der Schichtstauchversuch wird bis einer Geschwindigkeit von $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ im Fallwerk durchgeführt. Hierbei werden zwei Hochgeschwindigkeitskameras (Redlake HG 100 K) eingesetzt.

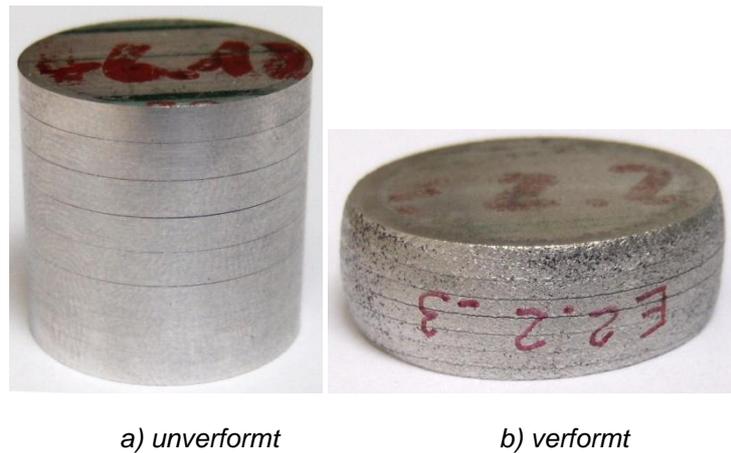


Bild 9: Schichtstauchprobe

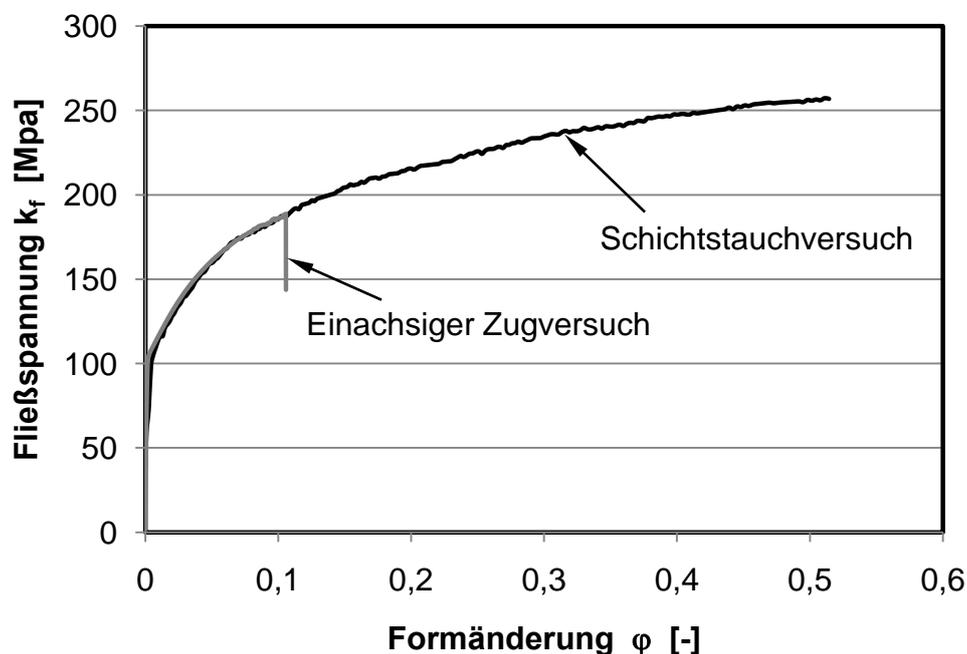


Bild 10: Biaxiale Fließkurve im Vergleich zu einer einachsigen Fließkurve für eine Aluminiumlegierung

3 Modellierung des plastischen Fließens

Zur Modellierung des Werkstoffverhaltens müssen die Randbedingungen, die das Werkstoffverhalten beeinflussen, berücksichtigt werden. Im Speziellen müssen die Einflüsse der Verformung, der Verformungsgeschwindigkeit und der Temperatur beachtet werden. Da das plastische Werkstoffverhalten durch zwei Kurvenarten (Fließkurve und Fließortkurve) beschrieben werden muss, werden die Einflüsse von Temperatur und Geschwindigkeit nur beim Modellieren der Fließkurve berücksichtigt.

3.1 Modellierung der Fließortkurve

Das Verhalten isotroper Werkstoffe lässt sich mit dem von Mises Fließkriterium beschreiben. Für anisotrope Werkstoffe existiert in der Literatur eine Vielzahl von Modellen. Zur Anwendung dieser Modelle im Bereich der Blechumformung wird der dritte Spannungsanteil in Blechdickenrichtung vernachlässigt. Meistens werden diese Modelle durch die Ermittlung der Fließspannung und der senkrechten Anisotropie (r -Werte) im Zugversuch berechnet. Für eine genaue Beschreibung der Fließortkurve können die vorhandenen Modelle bzw. auch neu entwickelte Modelle an den aus den in

Abschnitt 2 beschriebenen Versuchen experimentell ermittelten Daten angepasst werden. Im Bild 11 ist ein Beispiel für die Anpassung des quadratischen Fließkriteriums Hill-48 an die experimentellen Ergebnisse von DC06 bei verschiedenen Geschwindigkeiten dargestellt. Es ist zu beachten, dass die quadratischen Fließkriterien den Bauschinger-Effekt nicht beschreiben können.

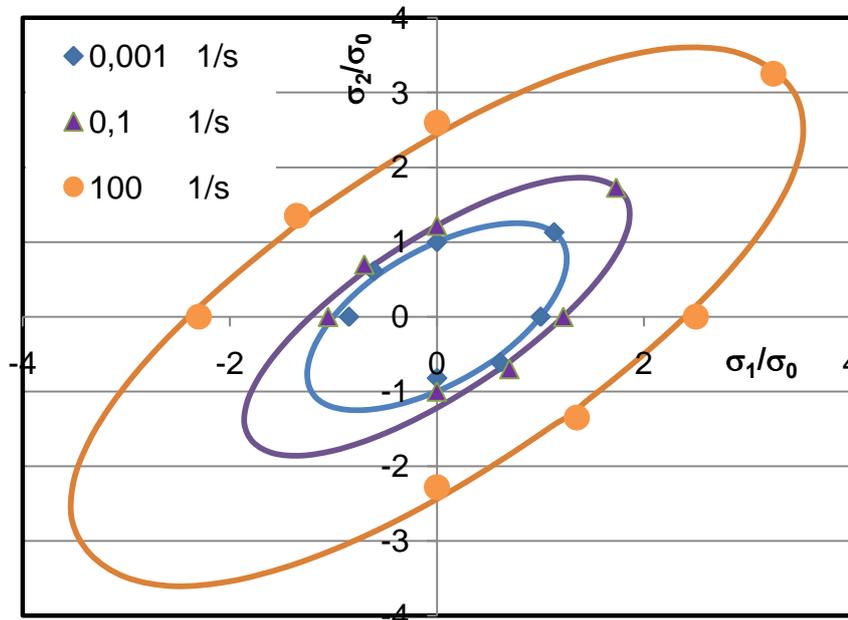


Bild 11: Modellierter Fließortkurve Hill-48 für die normierte 0,2%-Fließspannung bei verschiedenen Geschwindigkeiten am DC06 (σ_0 ist die einachsige Fließspannung bei $\dot{\epsilon} = 0,001$ 1/s)

Es zeigt sich im vorliegenden Fall, dass der Werkstoff bei höheren Verformungsgeschwindigkeiten eine isotrope Verfestigung zeigt, d.h. die Fließortkurve wird mit zunehmender Verformungsgeschwindigkeit aufgeweitet. Eine kinematische Verfestigung konnte hingegen nicht beobachtet werden.

3.2 Modellierung der Fließkurve

Um reale Verformungsprozesse mit Rechencodes simulieren zu können, ist eine zuverlässige konstitutive Gleichung erforderlich. Diese muss in der Lage sein, das Werkstoffverhalten in einem breiten Bereich von Verformungen, Verformungsgeschwindigkeiten und Temperaturen genau zu beschreiben. Dazu finden sich in der Literatur zahlreiche Modelle. Einige davon sind auf physikalischen Grundlagen aufgebaut, andere basieren auf experimentellen Erkenntnissen. Eine ausführliche Übersicht verschiedener Modelle ist bspw. in [6, 7] zu finden.

In Bild 12 ist ein Beispiel zwei verschiedener konstitutiven Modelle dargestellt. Obwohl das Johnson-Cook Modell (J-C) [9] in den Simulationen häufig Anwendung findet, wird durch das Modell lediglich eine lineare Abhängigkeit der Fließspannung von der logarithmischen Dehnrates $\log(\dot{\epsilon})$ abgebildet. Das führt dazu, dass die Fließspannung nur in einem engen Bereich der Geschwindigkeit mit diesem Modell wiedergegeben kann. Andernfalls ergibt sich eine große Abweichung zwischen berechneten und experimentellen Werten.

Das semiempirische Modell nach Zerilli-Armstrong (Z-A) [10] hingegen berücksichtigt bereits den physikalisch begründeten Effekt der thermischen Aktivierung von Versetzungsbewegungen. Daraus ergibt sich, dass durch das Z-A-Modell eine doppelt-logarithmische Abhängigkeit der Fließspannung von der Dehnrates beschrieben werden kann. Dies entspricht in vielen Fällen dem realen Werkstoffverhalten und führt letztlich zu einer deutlich besseren Übereinstimmung zwischen experimentell gemessenen und modellierten Daten (Bild 12).

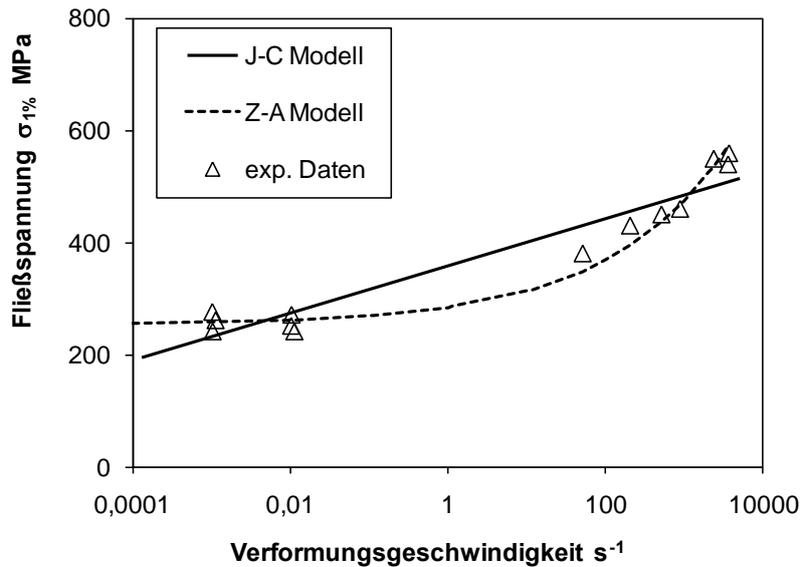


Bild 12: Vergleich konstitutiver Modelle für einen Tiefziehstahl bei RT

4 Grenzformänderungsschaubild

Eine Möglichkeit, die Umformgrenzen eines Werkstoffes zu bestimmen und die Machbarkeit einer Blechumformaufgabe vorherzusagen zu können, bietet das Grenzformänderungsschaubild (Forming Limit Diagram = FLD). Es trifft Aussagen zum Bereich der Sicherheit gegen Einschnürung des Materials und Rissbildung bei der Bearbeitung von Blechen, indem die größere Formänderung über der kleineren Formänderung in der Blechebene aufgetragen wird.

Das Grenzformänderungsschaubild wird an taillierten Proben nach Nakajima [8] im Bulge-Test ermittelt. Zur Erzeugung verschiedener Dehnungszustände werden unterschiedlich taillierte Proben verwendet. Bei NORMMETALL wurde ein Versuchstand nur für den FLD-Bulge-Test gebaut. Der Versuchstand besteht aus einem servo-hydraulischen Zylinder und einem Halbkugel-Stempel, welcher auf dem Kolben befestigt wird. Der Stempel verformt die Probe von unten nach oben. Dabei ist die Probe in einer speziellen Vorrichtung geklemmt, sodass ein Nachfließen des Materials aus der Blechebene vom Rand her ausgeschlossen werden kann. Das Verformungsfeld wird mit Hilfe eines ARAMIS-Systems aufgenommen und ausgewertet. Ein Beispiel für die Ermittlung vom FLD-Diagramm ist im Bild 13 dargestellt.

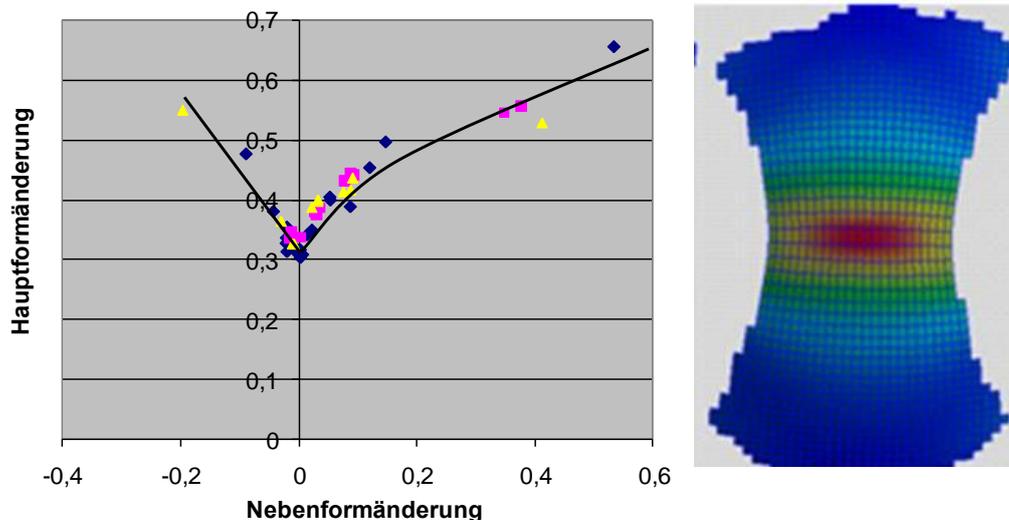


Bild 13: Experimentell ermitteltes Grenzformänderungsschaubild einer Aluminiumlegierung

Durch die Integration des Prüfaufbaus in einen Fallwerksaufbau sowie die Anwendung des ARAMIS-Systems in Verbindung mit Hochgeschwindigkeitskameras wird die Aufnahme von dynamischen Grenzformänderungsschaubildern ermöglicht.

5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurden verschiedene experimentelle Methoden vorgestellt, wie sie bei der Ermittlung von Fließortkurven an Automobil-Feinblechen notwendig sind. Ausgehend vom uniaxialen Zug- und Druckversuch wurden im Speziellen der Scherversuch nach Miyauchi und der Schichtstauchversuch vorgestellt. Dabei wurde der Schwerpunkt auf die experimentelle Ermittlung der Fließortkurve unter einer schlagdynamischen Belastung gelegt, wie sie in der Realität bei fast allen Umform- und Crashvorgängen vorherrscht. Es konnte gezeigt werden, dass die in der Fa. NORDMETALL zur Verfügung stehenden experimentellen Methoden hervorragend geeignet sind, diesen realen Belastungsbedingungen zu entsprechen und die notwendigen Werkstoffkennwerte für eine numerische Simulation m.H. von FE-Simulationsprogrammen bereit zu stellen.

6 Literatur

- [1] Pöhlandt K.: Materials Testing for the Metal Forming Industry, Springer-Verlag (1989).
- [2] Meyer, L. W.: Werkstoffverhalten hochfester Stähle unter einsinniger dynamischer Belastung. Dissertation, Universität Dortmund, 1982.
- [3] Herzig, N.: Erfassung und Beschreibung des skalierten Fließ-, Verfestigungs- und Versagensverhaltens ausgewählter metallischer Werkstoffe, Dissertation, TU Chemnitz, 2008.
- [4] ASM Handbook 14B: Metalworking, Sheet Forming, ASM International (2006)
- [5] Miyauchi K.: A proposal of a planar simple shear test in sheet metals, Sci. Papers I.P.C.R. 78(3) (1984)
- [6] Meyer, L. W.: Constitutive equations at high strain rate. In: Shock wave and high strain rate phenomena in materials, Eds.: Meyers, M. A.; Murr, L. E. and Staudhammer, K. P., Marcel Dekker, New York, 1992, p.657-673.
- [7] Abdel-Malek, S.: Verformungs- und Versagensverhalten ausgewählter niedrig legierter Stähle unter Variation von Temperatur, Verformungsgeschwindigkeit und Spannungszustand, Dissertation, TU Chemnitz, 2006.
- [8] DIN EN ISO 12004, Metallische Werkstoffe – Bleche und Bänder– Bestimmung der Grenzformänderungskurve, 2009, Beuth-Verlag.
- [9] Johnson, G.R.; Cook, W.H.: A constitutive model and data for metals subjected to various strains, high strain rates and high temperatures. Proc. 7th Int. Symp. Ball., The Hague, Netherlands, 1983, 541-547.
- [10] Zerilli, F.J.; Armstrong, R.W.: Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations. J. Appl. Phys. 61 (1987), 1816-1825.