

# Zur Fließflächenentwicklung bei großen Scherdeformationen

N. Wellerdick-Wojtasik, D. Besdo

*Die Entwicklung der  $\sigma$ - $\tau$  Fließfläche in Abhängigkeit einer vorherigen Scherdeformation wird dokumentiert. Die Vordeformation wird durch eine Torsionsmaschine bis zu einer Scherung von  $\gamma = 1.5$  realisiert. Bei der anschließenden Fließflächenmessung durch eine Zug/Druck-Torsionsmaschine weisen die gemessenen Flächen eine Formempfindlichkeit auf, die weniger durch die Vordeformation als durch die Mehrpunktabtastung bei der Fließflächenmessung hervorgerufen wird.*

## 1 Einleitung

Die idealisierte Modellvorstellung des isotropen Materials findet sich in der Praxis eher selten oder nie realisiert. Der Grund dafür ist die Tatsache, daß alle Halbzeuge oder Werkstücke infolge ihrer Herstellung eine Textur aufweisen. Metallische Werkstoffe sind kristallin und der kleinste Baustein eines Kristallgitters, die Elementarzelle, ist i.a. anisotrop. Maßgebend für das Verhalten des Kristalls infolge einer äußeren Beanspruchung ist die Orientierung des Kristallgitters. Dieses Verhalten überträgt sich auf den Poly- oder Vielkristall, der aus vielen Körnern unterschiedlicher Gitterorientierung besteht. Bei isotropem Material ist jede Orientierung mit der gleichen Häufigkeit vertreten, wodurch sich die lokale Anisotropie der einzelnen Körner zu einem quasi-isotropen Materialverhalten mittelt. Bei plastischen Umformvorgängen und Wärmebehandlungen kann diese Verteilung zerstört werden, d.h. nach dem Prozeß sind u.U. bestimmte Orientierungen besonders häufig vertreten. Das Material hat eine Textur.

Die plastischen Materialeigenschaften werden außer durch Fließkurven auch durch Fließortkurven dargestellt. Dazu werden für einen ebenen Spannungszustand alle Spannungspunkte verbunden, die eine plastische Verformung bewirken können. Alle möglichen Materialzustände liegen im Innern oder auf dieser Fließortkurve. Im räumlichen Fall ist diese Begrenzung durch die Fließfläche gegeben. Die Fließortkurve, die durch einen Schnitt durch diese dreidimensionale Hüllfläche entsteht, wird in experimentell orientierten Arbeiten häufig bereits als Fließfläche bezeichnet, obwohl sie eher eine ihrer Darstellungen ist. In den folgenden Ausführungen wird diese Vorgehensweise übernommen und ebenfalls die Bezeichnung Fließfläche verwendet.

Die Verfestigung, die während einer plastischen Deformation entsteht, wird oft nach den in Bild 1 dargestellten Verfestigungsarten klassifiziert.

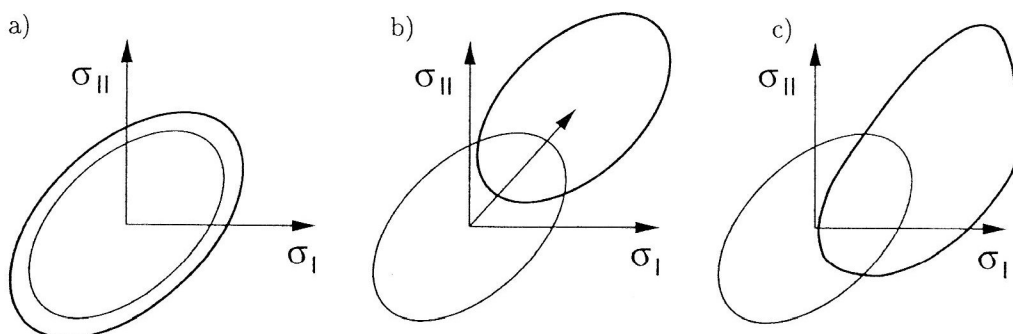


Bild 1. Klassifizierung der Verfestigung anhand der Fließflächen: a) isotrope Verfestigung, b) kinematische Verfestigung, c) allgemeine (Distorsions-) Verfestigung

Die isotrope Verfestigung bewirkt eine reine Größenänderung der Fläche, während die kinematische Verfestigung durch eine translatorische Verschiebung der Fläche charakterisiert wird. Im allgemeinen überlagern sich jedoch beide Verfestigungsarten und weitere Effekte kommen hinzu, die eine Ge-

staltänderung der Fläche bewirken. In diesem Zusammenhang wird von einer Distorsionsverfestigung gesprochen. Meistens wird die Textur des Materials für diese Distorsionsverfestigung verantwortlich gemacht. Viele Autoren begründen daher die Verwendung von Texturmodellen damit, daß mit diesen die Distorsionsverfestigung des Materials besser als mit phänomenologischen Materialmodellen beschrieben werden kann. Teilziel der vorgestellten Untersuchungen war deshalb, herauszufinden, inwieweit diese Argumentation gerechtfertigt ist. Vor der Fließflächenmessung war es deshalb notwendig, im Probenmaterial eine ausgeprägte Textur zu erzeugen. Da dazu i.a. große Verformungen notwendig sind, welche mit dem Zugversuch nicht realisiert werden können, wurde der Torsionsversuch ausgewählt. Dieser läßt große Formänderungen zu und führt im Material zu einer Schertextur.

## 2 Realisierung der Scherdeformation

Für die Untersuchungen wurde die nichtaushärtbare Aluminiumlegierung AlMg3 verwendet. Die Probengeometrie ist in Bild 2 dargestellt. Mit dem Verhältnis von Innen- zu Außenradius  $r_i/r_a = 0.857$ , kann diese Probe als dünnwandig bezeichnet werden. Bei Messungen von Fließkurven mit dem Torsionsversuch werden i.a. wesentlich kürzere Proben verwendet, vgl. Pöhlandt (1977). Aufgrund der nachfolgenden Fließflächenmessung war die Probengeometrie für den Torsionsversuch jedoch vorgegeben, so daß die Problematik bestand an diesen dünnwandigen Proben eine große Torsionsverformung zu realisieren. Die dazu verwendete Torsionsmaschine, detailliert beschrieben von W.-Wojtasik (1997), ist in Bild 2 dargestellt. Die Antriebseinheit von der Firma BAUER besteht aus einem Frequenzumrichter, einem vierpoligen Asynchronmotor mit Tachogenerator und einem fünfstufigen Stirnradgetriebe. Um bei geringen Motordrehzahlen eine ausreichende Kühlung zu gewährleisten, ist am Motor ein Fremdlüfter montiert. Aufgrund einer hohen Getriebeuntersetzung steht an der Arbeitswelle ein maximales Torsionsmoment von ca. 10 kNm zur Verfügung. Die hintere Probeneinspannung ist auf einer Linearführung montiert, so daß die Probe näherungsweise frei von axialen Kräften tordiert werden kann. Als Meßgrößen werden das Drehmoment, der Verdrehwinkel und die Längenänderung der Probe erfaßt, womit die Maschine geeignet ist Fließkurven im Torsionsversuch aufzunehmen.

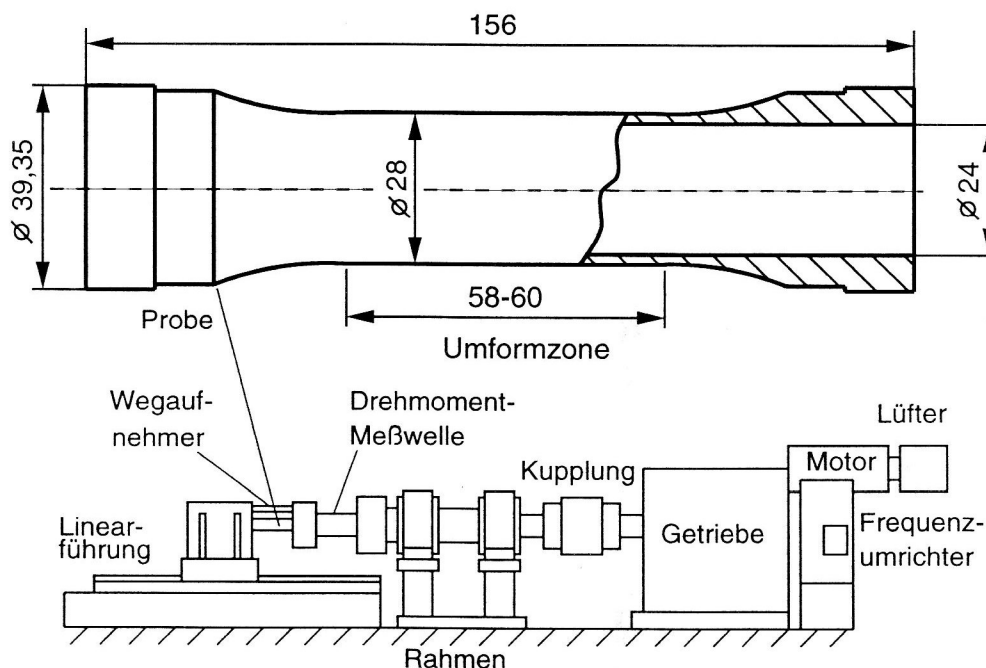


Bild 2. Skizze der verwendeten Probengeometrie und der Torsionsmaschine zur Realisierung großer Scherdeformationen bei freier Längenänderung

Bei Hohlproben ist die maximal erreichbare Scherdeformation meistens nicht durch einen Bruch der Probe bestimmt, sondern durch das sogenannte Drillknicken. Dabei bildet die Probe spiralförmige Dellen aus, die, sobald sie aufgetreten sind, schnell wachsen und die Probe unbrauchbar machen. Dieses Ausbeulen der Proben kann durch Einführen eines geschmierten Stahlkernes teilweise verhindert werden. Dann besteht jedoch die Gefahr, daß sich die Probe auf dem Stahlkern festzieht und sich die Verformung

stark lokalisiert, so daß schnell Brüche eintreten. Will man eine möglichst homogene Verformung über der Probenlänge erzielen, ist vielmehr auf eine hohe Präzision bei der Probenherstellung zu achten. CNC gefertigte Proben sind i.a. weiter verformbar als manuell gefertigte. Mit Proben hoher Präzision war es möglich, Scherdeformationen bis zu einem Wert von ca.  $\gamma = \tan \chi = 1.5$  zu realisieren, wobei  $\chi$  den Winkel zwischen einer verdrillten und einer achsparallelen Mantellinie beschreibt.

Bild 3 zeigt einige Meßergebnisse, die bei der Vordeformation ermittelt wurden. Das zur Verformung benötigte Drehmoment und die Längenänderung einiger Proben sind jeweils über dem Verdrehwinkel aufgetragen. Die Meßdaten sind ungeglättet, d.h. die zum Teil sichtbaren Stufen sind auf die A/D-Wandlung zurückzuführen. Die Drehmomentkurven weisen einen hohen Grad an Reproduzierbarkeit auf und sind im Rahmen der Meßgenauigkeit deckungsgleich. Beim Momentenverlauf folgt auf den steilen Anstieg im elastischen Bereich die Plastifizierung mit einem weiteren ausgeprägten Momentenanstieg bis zu einem Verdrehwinkel von etwa 30 Grad. Die darauffolgende Verformung ist nur noch mit einem vergleichsweise verschwindenden Momentenanstieg verbunden. Der Hauptanteil der Verfestigung findet also bereits bei relativ kleinen Verformungsgraden statt. Bei der Längenänderung ist zunächst festzustellen, daß alle Proben länger werden und die Reproduzierbarkeit der Messungen nur bis zu einem Verdrehwinkel von etwa 100 Grad befriedigend ist. In diesem Bereich kann die Abhängigkeit der Längenänderung vom Verdrehwinkel näherungsweise als linear bezeichnet werden. Wird vor der Verformung ein Stahlkern in die Probe eingeführt, hat dies nur einen sehr geringen Einfluß auf die Torsionsmomentenkurve, während die Längenänderung mit zunehmender Verformung geringer wird und von denen der anderen Proben abweicht. Daraus folgt, daß bei einer Fließkurvenaufnahme der Stahlkern das Ergebnis nicht wesentlich verfälschen würde. Auf die Berechnung der Fließkurven wurde verzichtet. Die grundsätzliche Vorgehensweise wird beispielsweise von Pöhlandt (1984) beschrieben.

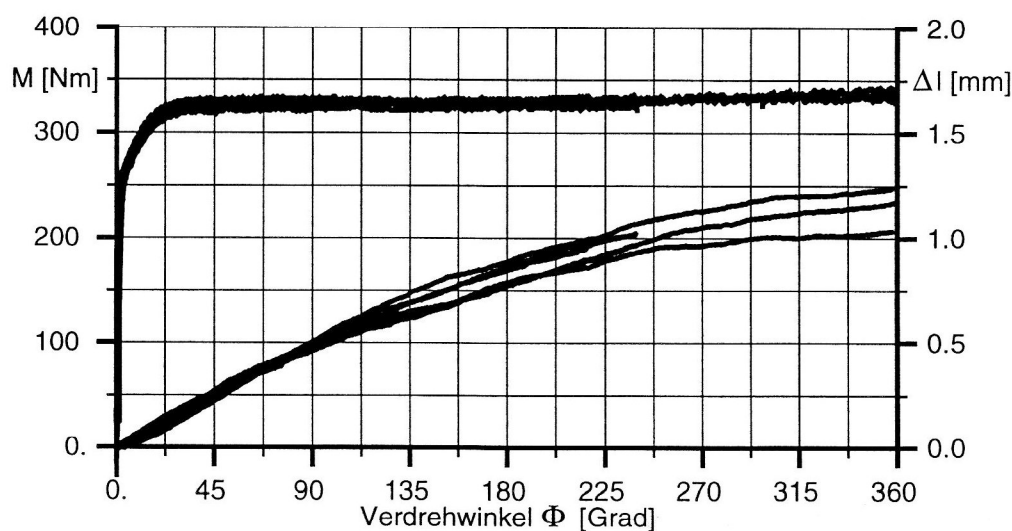


Bild 3. Torsionsmoment und Längenänderung einiger Proben in Abhängigkeit des Verdrehwinkels

### 3 Fließflächenmessung

Die Messung der Fließflächen erfolgte am Institut für Stahlbau der Technischen Universität Braunschweig. Bei der verwendeten Maschine handelt es sich um eine Zug/Druck-Prüfmaschine, die nachträglich um eine Torsionseinrichtung erweitert wurde. Eine baugleiche Maschine wird von Gieseke (1995) beschrieben. Die Maschine wurde dehnungsgesteuert betrieben, d.h. die Sollwerte der Regelung waren die Dehnungsinkremente  $\Delta\epsilon$  und  $\Delta\gamma$ .

In Abschnitt 1 wurde der Begriff Fließfläche als Menge aller Fließpunkte einer Spannungsebene definiert, ohne jedoch den Begriff Fließpunkt näher zu spezifizieren. Viele metallische Werkstoffe zeigen einen kontinuierlichen Übergang vom elastischen zum plastischen Werkstoffverhalten und der Fließpunkt muß durch eine Definition festgelegt werden. Die gängigen Definitionen findet man z.B. bei Michno u. Findley (1976), wobei die am häufigsten verwendete Methode die Offset-Definition ist. Hierbei wird die Probe verformt, bis eine bleibende plastische Verformung definierter Größe, der Offset, eingetreten ist. Die zugehörige Spannung wird als Fließspannung definiert. Die Auswertung der Versuche basiert auf einer

additiven Zerlegung der Dehnungsinkremente in einen plastischen und einen elastischen Anteil

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_{el} + \Delta \varepsilon_{pl} \quad \Delta \gamma = \Delta \gamma_{el} + \Delta \gamma_{pl} \quad (1)$$

Da die Gesamtdehnungsinkremente durch die Maschine vorgegeben werden, können die plastischen Anteile aus

$$\Delta \varepsilon_{pl} = \Delta \varepsilon - \frac{\Delta \sigma}{E} \quad \text{und} \quad \Delta \gamma_{pl} = \Delta \gamma - \frac{\Delta \tau}{G} \quad (2)$$

berechnet werden, wenn der Elastizitätsmodul  $E$  und der Schubmodul  $G$  bekannt sind. Die Spannungszuwächse  $\Delta \sigma$  und  $\Delta \tau$  werden aus der korrespondierenden Laständerung und der Geometrie der Probe berechnet. Die Komponenten des inkrementellen plastischen Verzerrungstensors werden mit der Querkontraktionszahl für plastisches Fließen  $\nu = 0.5$  zu

$$\Delta \varepsilon_{ij}^{pl} = \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon_{pl} & \Delta \gamma_{pl} & 0 \\ \Delta \gamma_{pl} & -0.5 \Delta \varepsilon_{pl} & 0 \\ 0 & 0 & -0.5 \Delta \varepsilon_{pl} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Auf Basis dieser Tensorkomponenten wird als Vergleichswert ein plastisches Dehnungsinkrement nach v.Mises ermittelt

$$\Delta \varepsilon_{pl}^{vM} = \sqrt{\Delta \varepsilon_{pl}^2 + \frac{1}{3} \Delta \gamma_{pl}^2} \quad (4)$$

Sobald die Bedingung

$$\sum \Delta \varepsilon_{pl}^{vM} \geq \varepsilon_{off} \quad (5)$$

erfüllt ist, ist der Fließpunkt erreicht und die zugehörige Spannung wird als Fließspannung registriert. Die verwendeten Offsets liegen zwischen 0.0015% und 0.1%. Bei dieser Definition wird die Probe zur Aufnahme des Fließpunktes plastisch verformt, woraus bereits eine Änderung der mechanischen Eigenschaften resultiert. Folglich müßte für jeden zu messenden Fließpunkt eine neue Probe verwendet werden, um den Einfluß der vorherigen Messung zu eliminieren. Ein solches Vorgehen ist bereits aus Kostengründen nicht sinnvoll. Deshalb wird i.a. versucht den Offset, und damit den Einfluß vorheriger Messungen, so klein wie möglich zu halten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde mit jeder Probe eine Fließfläche gemessen, welche durch jeweils 16 Punkte charakterisiert wurde. Der verwendete Abtastpfad ist in Bild 4 dargestellt.

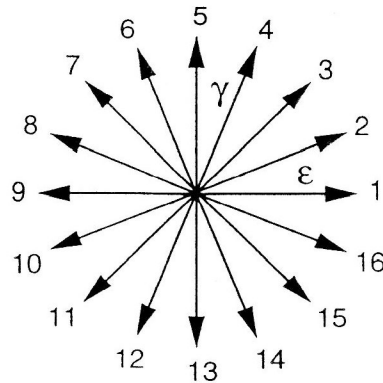


Bild 4. Abtastpfad der Fließflächenmessung

Der Abtastpfad beginnt mit reinem Zug und tastet die Ebene gegen den Uhrzeigersinn ab.

Zur Auswertung von Gleichung (2) müssen die elastischen Konstanten  $E$  und  $G$  möglichst genau bekannt sein. Da diese vorab nur in ihrer Größenordnung bekannt sind, für die Auswertung jedoch möglichst genaue Werte benötigt werden, müssen die Moduln mit einer Regressionsgeraden durch die ersten Meßpunkte berechnet werden. Eine exakte Bestimmung dieser Größen ist bei dem hier verwendeten Offset-Kriterium besonders wichtig, da kleine Fehler das Meßergebnis, d.h. die Fließspannung, in hohem Maß

verfälschen können. Am Beispiel des  $E$ -Moduls läßt sich dies recht einfach verdeutlichen. Ist  $E_W$  der wahre  $E$ -Modul, der nicht bekannt ist, und  $E_M$  der gemessene  $E$ -Modul, folgt für die Offset-Fließspannung  $\sigma_F$ , wenn

$$\begin{aligned} E_M > E_W &\Rightarrow \sigma_{FM} < \sigma_{FW} \\ &\text{bzw., wenn} \\ E_M < E_W &\Rightarrow \sigma_{FM} > \sigma_{FW} \end{aligned} \quad (6)$$

Die Differenz  $\Delta\sigma$  zwischen der gemessenen Fließspannung  $\sigma_{FM}$  und der wahren Offset-Fließspannung  $\sigma_{FW}$  ist umso größer, je größer die Steigung der  $\sigma(\varepsilon)$ -Kurve in der relevanten Umgebung ist, vgl. Bild 5. Das bedeutet, daß kleine Meßfehler bei den elastischen Moduln u.U. große Meßfehler für die Fließspannung zur Folge haben können, wenn die Offset-Dehnung  $\varepsilon_{off}$  sehr klein gewählt wird. Im skizzierten Extremfall wird die Fließspannung im elastischen Bereich ermittelt. Kleine Offset haben somit bei einer Mehrpunktabtastung den Vorteil der geringeren Beeinflussung des Probenmaterials, aber den Nachteil einer erhöhten Fehleranfälligkeit. Bei großen Offset ist die Fehlergefahr zwar gering, jedoch die Beeinflussung der Probe groß. Man muß folglich in beiden Fällen mit einer Verfälschung der Ergebnisse rechnen.

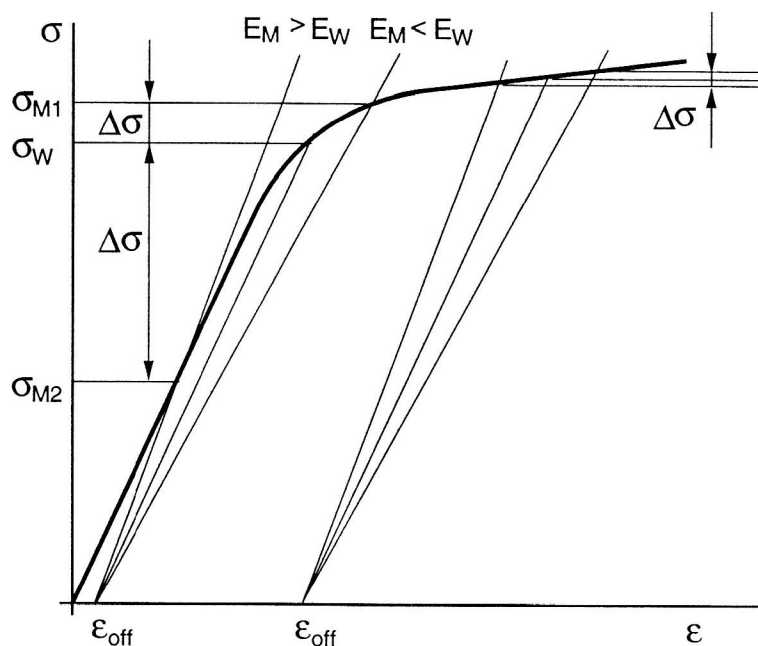


Bild 5. Einfluß des ermittelten  $E$ -Moduls auf die ermittelte Fließspannung

Da die Moduln aus Meßdaten der Kraftmeßdose und des Extensometers nach einer A/D-Wandlung mit der vorgegebenen Probengeometrie berechnet werden, liegen viele potentielle Fehlerquellen vor. Selbst wenn man davon ausgeht, daß Spannungen und Dehnungen korrekt gemessen werden, bleibt das Problem, wieviele Meßpunkte  $N$  zur Bestimmung von  $E$  und  $G$  herangezogen werden. Bei einer Inkrementgröße von  $\Delta\varepsilon_{vM} = 0.004\%$  wurde  $N = 20$  gesetzt. Trägt man den errechneten  $E$ -Modul über der Anzahl  $N$  der zur Berechnung verwendeten Meßpunkte auf, so können die in den Bildern 6 und 7 dargestellten Effekte beobachtet werden. Während bei der unverformten Probe bei drei aufeinanderfolgenden Belastungen für  $N = 20$  jeweils der gleiche Werte berechnet wird, erkennt man daß bei einer anderen Wahl von  $N$  dies nicht so gewesen wäre. Bild 7 zeigt die entsprechenden Werte für drei bis zu  $\gamma = 1.5$  vordeforimierte Proben mit jeweils zwei Belastungen. Hier erkennt man besonders bei einer Probe Abweichungen die den gesamten Meßbereich über bestehen bleiben. Der Eindruck, daß dieser Effekt auch vom Vorverformungsgrad abhängig ist trägt jedoch, da auch bei unverformten Proben in Abhängigkeit von  $N$  z.T. erhebliche Unterschiede berechnet wurden.

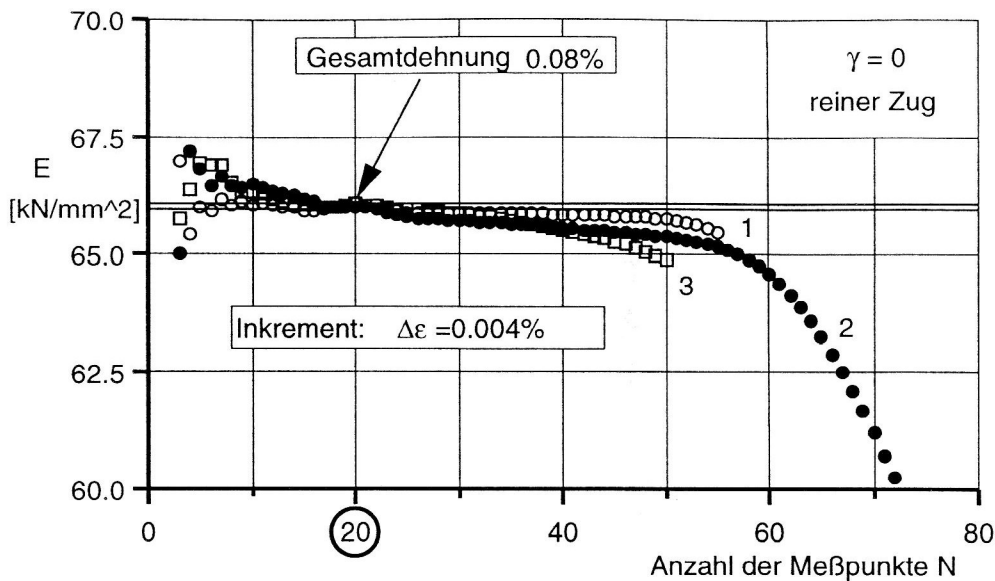


Bild 6. Einfluß des ermittelten  $E$ -Moduls auf die ermittelte Fließspannung, ( $\gamma = 0.0$ )

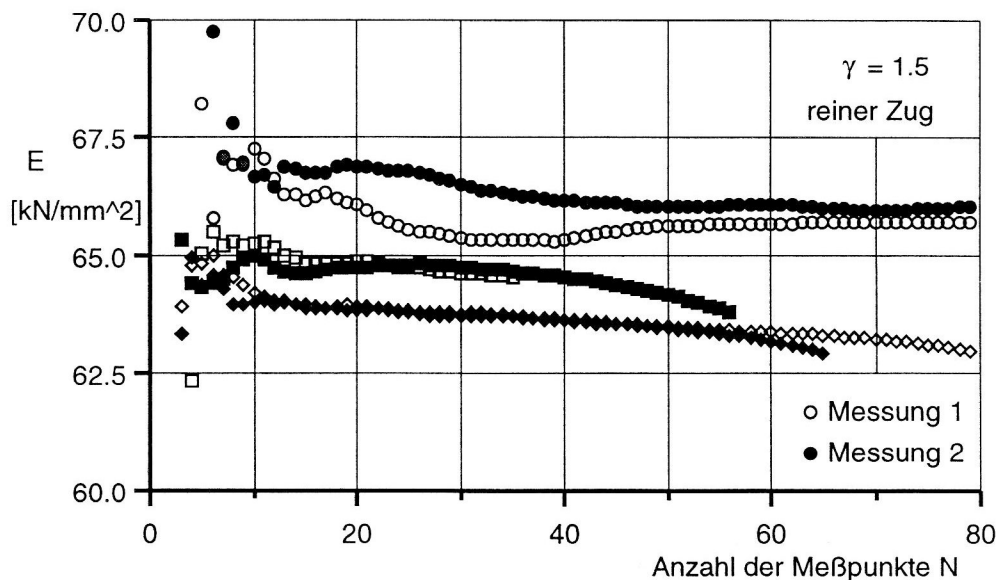


Bild 7. Einfluß des ermittelten  $E$ -Moduls auf die ermittelte Fließspannung, ( $\gamma = 1.5$ )

#### 4 Meßergebnisse

Die mit der Offset-Methode gemessene Fließspannung wächst mit steigendem Offset. Aus dieser Tatsache resultiert eine Vergrößerung der Fließfläche mit zunehmendem Offset, wie es in Bild 8 dargestellt ist. Die vier abgebildeten Fließflächen sind an verschiedenen Proben mit verschiedenen Offsets gemessen worden. Bei dem kleinsten verwendeten Offset weist die Fließfläche ein Achsenverhältnis auf, wie es die v. Mises Fließbedingung für isotropes Material beschreibt. Mit größer werdendem Offset verkleinert sich das Achsenverhältnis  $\sigma/\tau$  bis bei einem Offset von  $\varepsilon_{off} = 0.1\%$  ein spiralförmiges Aufweiten der Fließfläche zu erkennen ist. Die Ursache dafür ist der Abtastpfad. Die bei den Messungen verwendeten Offset-Dehnungen können folgendermaßen beurteilt werden:

Der kleinste Offset  $\varepsilon_{off} = 0.0015\%$  stellt die untere Grenze dar. Kleinere Offsets sind im Rahmen der Maschinengenauigkeit nicht sinnvoll und führen i.a. dazu, daß ein Großteil der 16 gemessenen Fließspannungen Ausreißer sind. Die Ursache ist die vorab genannte Problematik bei der Messung des  $E$ -Moduls. Der kleinste verwendbare Offset ist aber nicht nur durch die Maschine und ihre Meßgenauigkeit bestimmt, sondern auch vom Verformungsgrad der Probe abhängig. Während es bei den unverformten

Proben gelingt mit dem kleinen Offset zu messen, erweist er sich bei den vorverformten Proben als zu klein und damit unbrauchbar.

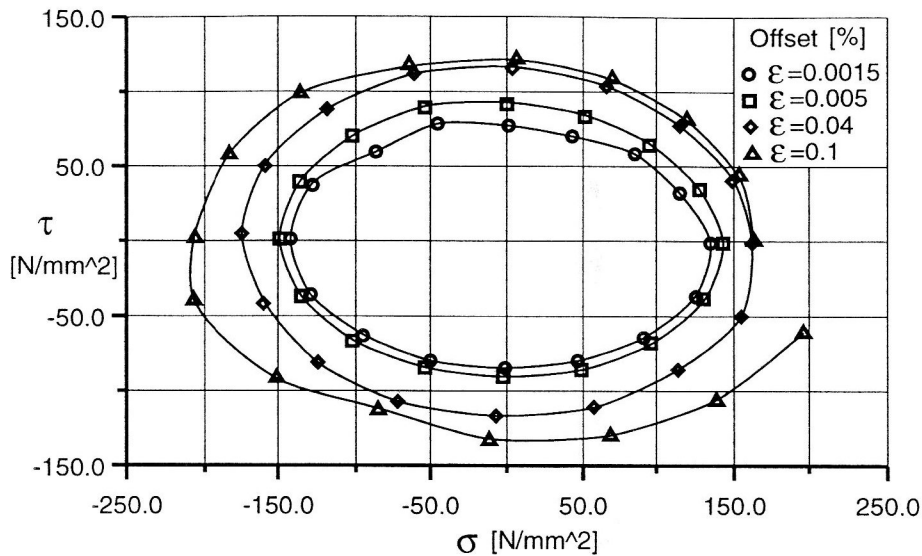


Bild 8. Fließflächen unverformter Proben in Abhängigkeit des Dehnungs-Offsets

Eine Verwendung einer Offset-Dehnung von  $\varepsilon_{off} = 0.005\%$  stellt einen guten Kompromiß dar. Sie ist bei isotropen und vordeformierten Proben hinreichend groß, um 16 Punkte der Fließfläche ohne nennenswerte Ausreißer messen zu können. Ferner ist sie relativ klein, so daß es zulässig sein dürfte, 16 Fließpunkte mit einer Probe zu messen.

Bei der Offset-Dehnung von  $\varepsilon_{off} = 0.04\%$  wird die Probe bereits merklich plastisch verformt. Obwohl es kritisch sein müßte, 16 Punkte an einer Probe zu messen, sind kaum Einflüsse der Mehrpunktabtastung zu erkennen.

Wird der Offset weiter gesteigert, etwa auf  $\varepsilon_{off} = 0.1\%$ , wird die Fläche der Abtastreihenfolge entsprechend spiralförmig aufgeweitet und ist nicht geschlossen, oder kann nur durch Konstruktion eines konkaven Bereiches geschlossen werden. Hier wird deutlich, daß zur Beurteilung einer gemessenen Fließfläche nicht nur die verwendete Offset-Dehnung, sondern auch der Abtastpfad berücksichtigt werden muß. Je kleiner die Offset-Dehnung ist, desto geringer ist dabei der Einfluß des Abtastpfades.

In Bild 9 sind die 0,005%-Fließflächen von vier Proben mit unterschiedlichem Vorverformungsgrad abgebildet.

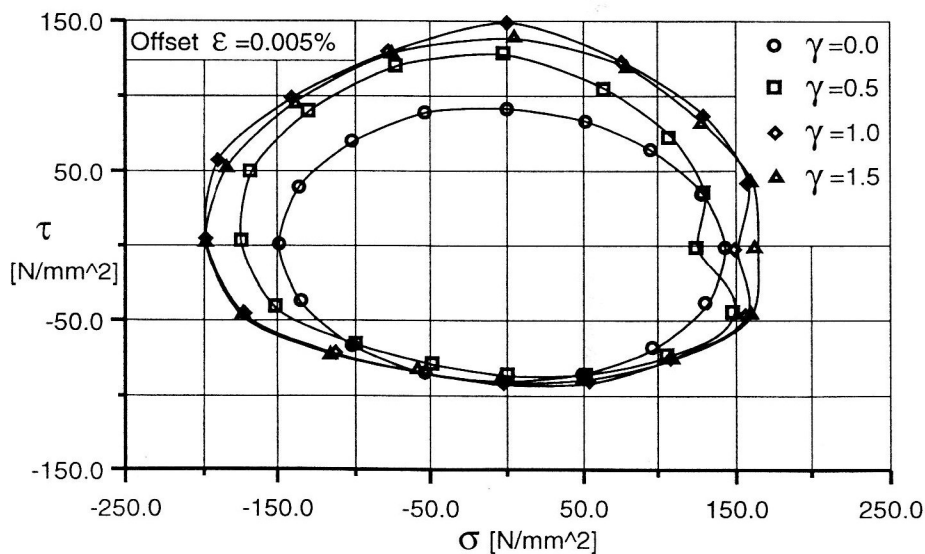


Bild 9.  $\varepsilon_{off} = 0.005\%$ -Fließflächen von Proben unterschiedlicher Vordeformation

Auffällig ist, daß die Fließflächen der vordeformierten Proben weder zur  $\sigma$  noch zur  $\tau$ -Achse symmetrisch sind. Die Größe der Fließfläche nimmt erwartungsgemäß mit steigender Vorverformung zu. Die Vordeformation verursacht eine ausgeprägte Ausbeulung in Vorbelastungsrichtung, während in der anderen Richtung eher ein Abplatten zu erkennen ist. Eine, im Hinblick auf die Theorie, interessante Erscheinung ist die ausgeprägte Delle, die im Bereich der ersten und letzten Meßpunkte auftritt. Die Fließflächen lassen sich nur durch Konstruktion eines konkaven Bereiches schließen, was theoretisch nicht zulässig ist. Weitere Messungen zeigten, daß es sich hierbei nicht um zufällige Ausreißer handelte, sondern daß sich derartige Dellen reproduzieren ließen. Eventuell liegt die Ursache allein im ersten Meßpunkt, denn bei diesem liegt nach der Torsion erstmalig eine andere Belastung vor. Im Material könnten dadurch Vorgänge ausgelöst werden, die nur bei ausgeprägten Belastungswechseln auftreten.

Steigert man den Offset um eine Zehnerpotenz, sieht das Ergebnis wie in Bild 10 dargestellt aus.

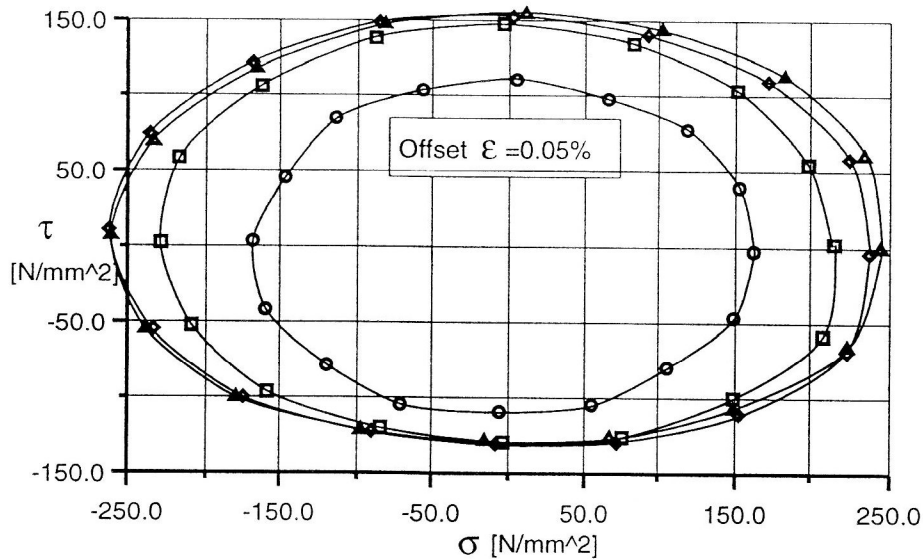


Bild 10.  $\varepsilon_{off} = 0.05\%$ -Fließflächen von Proben unterschiedlicher Vordeformation

Praktisch alle charakteristischen Merkmale der Messung mit dem kleineren Offset verschwinden. Man erkennt im wesentlichen Ellipsen, die leicht in Druck- und in Richtung der Vorbelastung verschoben sind. Das Ausbeulen, Abplatten und die Delle sind nicht mehr zu erkennen. Die Größe der Fließfläche nimmt wie bei der Messung mit dem kleinen Offset mit steigender Vorverformung zu.

In Anbetracht dieser Ergebnisse fragt man sich zurecht, ob die mit dem kleinen Offset gemessene Distorsion der Fließfläche überhaupt eine praktische Relevanz hat. Mit einem Fließkriterium, das eine Ellipse mit isotroper und kinematischer Verfestigung beschreiben kann, dürfte die Materialmodellierung zumindest bei größeren plastischen Verformungen ausreichend genau sein. Will man dagegen sehr kleine plastische Verformungen möglichst exakt modellieren können, wird ein Kriterium benötigt, das zusätzlich die gemessene Distorsion modellieren kann.

Um den Einfluß des Abtastpfades zu untersuchen und insbesondere die Auswirkung der Messung auf das Materialverhalten zu studieren wurde folgendes Experiment durchgeführt: An einer Probe wurden drei Fließflächen, also  $3 \cdot 16$  Punkte, gemessen. Die erste Messung wurde in gewohnter Weise mit einem Offset von  $\varepsilon_{off} = 0.005\%$  durchgeführt. Bei der zweiten Messung wurde der Offset um eine Zehnerpotenz erhöht, auf  $\varepsilon_{off} = 0.05\%$ . Bei der dritten Messung wurde wieder der kleine Offset von  $\varepsilon_{off} = 0.005\%$  benutzt. Die Messungen erfolgten, ohne die Probe zwischendurch auszuspannen. Das Ergebnis dieser Messung ist in Bild 11 in Form der beiden  $\varepsilon_{off} = 0.005\%$ -Fließflächen präsentiert. Man erkennt, daß die Form und die Größe der Fließfläche im Rahmen der Meßgenauigkeit erhalten bleibt. Die einzige auffällige Veränderung ist die Verschiebung der Fließfläche in der Spannungsebene. Da sie leicht nach rechts unten verschoben ist, würde man dieses als kinematische Verfestigung bezeichnen. Die Richtung der Verschiebung entspricht im wesentlichen den letzten Abtastrichtungen der Messung mit dem großen Offset, die nicht dargestellt ist. Da der große Offset hier nur eine geringe Verschiebung bewirkt, dürfte der Einfluß des kleinen Offsets auf das Materialverhalten und somit auf die Fließfläche verschwindend gering sein. Eine Mehrpunktabtastung ist demnach zulässig.



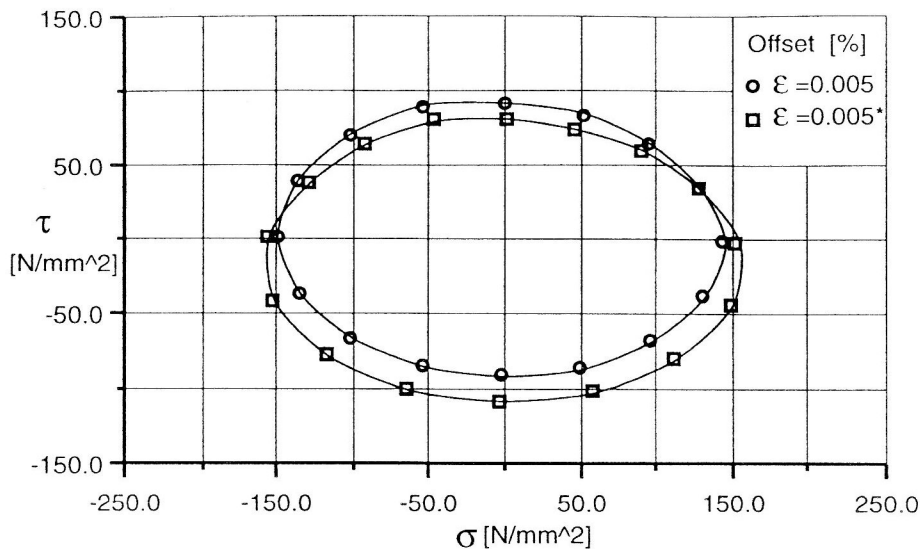


Bild 11. Fließflächen einer unverformten Probe vor und nach einer Messung mit großem Offset

Anders sieht es dagegen bei der vorverformten Probe aus. In Bild 12 ist eine gleichartige Messung dokumentiert. Die erste Messung mit einem kleinen Offset, die zweite mit dem großen und die dritte mit dem kleinen. Die erste gemessene Fließfläche weist die bereits beschriebenen charakteristischen Merkmale auf. Bei der zweiten Messung, mit dem großen Offset, verschwinden diese bis auf die leichte Verschiebung in Vorbelastungsrichtung. Die dritte Messung, wieder mit dem kleinen Offset, zeigt, daß kaum noch übereinstimmende Merkmale mit der ersten gemessenen Fläche vorliegen. Weder Form, noch Größe und Lage sind erhalten geblieben. In Übereinstimmung mit den vergleichbaren Messungen an der unverformten Probe, liegt eine leichte Verschiebung in Richtung der unteren Halbebene vor, die hier jedoch wesentlich stärker ausgeprägt ist. Die Fließflächen der vordeformierten Proben sind wesentlich empfindlicher, als die der unverformten Proben. Die charakteristischen Merkmale, verursacht durch die Vordeformation, verschwinden bereits bei kleinen plastischen Formänderungen wieder. Es stellt sich daher die Frage, inwieweit die Textur für die Distorsion der Fließfläche verantwortlich sein kann. Geht man davon aus, daß durch die kleinen plastischen Formänderungen während der Fließflächenmessung die Textur im Material nicht wesentlich geändert wird, so kann die Textur nicht die alleinige Ursache der Fließflächendistorsion sein. Hier sind wahrscheinlich weitere Vorgänge im Material mitverantwortlich.

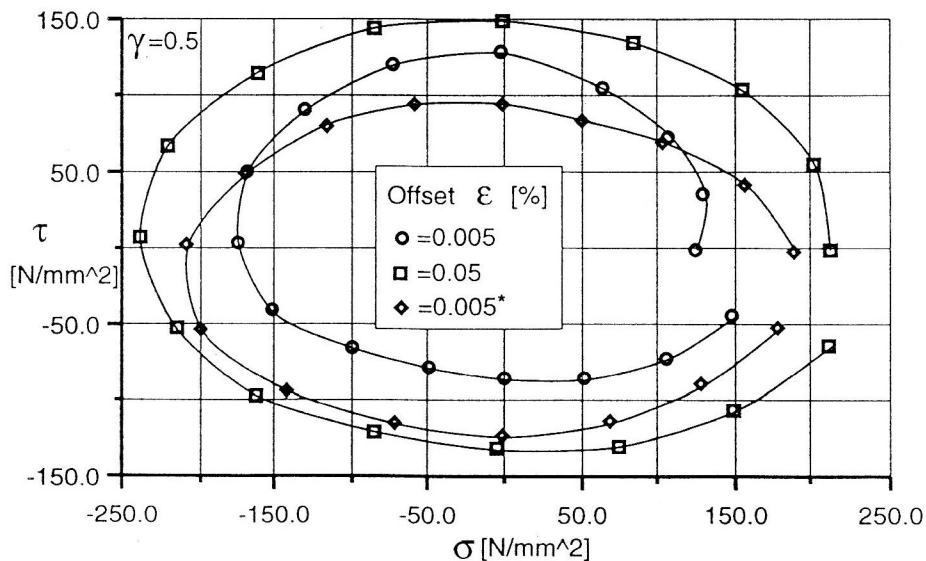


Bild 12. Fließflächen einer vordeformierten Probe vor und nach einer Messung mit großem Offset

## 5 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Die Messungen zeigen deutlich, wie kritisch mit dem Begriff der Fließfläche umgegangen werden muß. Der Übergang vom elastischen zum plastischen Materialverhalten vollzieht sich nicht abrupt, sondern kontinuierlich. Es existiert kein Punkt, der eindeutig den Beginn der plastischen Verformung definiert. Als Konsequenz gibt es keine eindeutigen Fließflächen, sondern beliebig viele, die jeweils durch unterschiedliche aber experimentell anwendbare Fließkriterien definiert sind. Selbst dann ist im Rahmen der Meßgenauigkeit und der Meßparameter ein Toleranzbereich vorhanden, der zu unterschiedlichen Fließflächen führen kann, vgl. Bild 13.

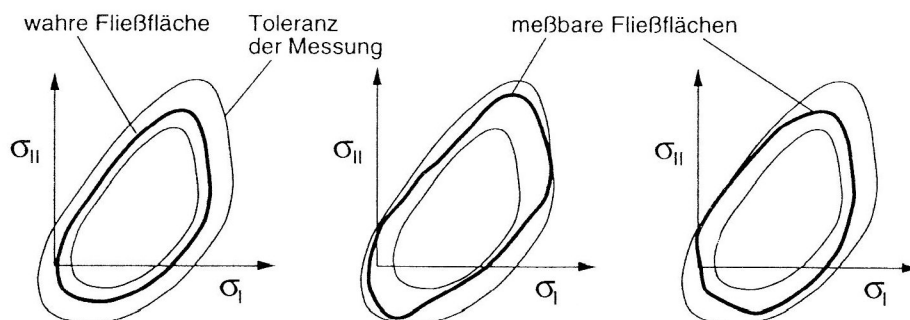


Bild 13. Schematische Darstellung möglicher Auswirkungen von Messungstoleranzen

Die Ergebnisse zeigen ferner, daß sich die Fließflächen bei unverformten Proben relativ einfach messen lassen und die Form der Fläche recht unempfindlich gegenüber der Messung ist. Anders verhält es sich dagegen bei den vordeformierten Proben. Die Messung gestaltet sich dadurch schwieriger, daß Ausreißer nicht so leicht zu erkennen sind, da die Form der Fläche vorab nicht bekannt ist. Darüber hinaus läßt sich eine ausgesprochene Formempfindlichkeit gegenüber den Meßparametern feststellen. Bereits durch die Messung wird die charakteristische Form, deren Ursache die vorherige Scherung ist, völlig verändert.

Bei der Berechnung von Fließflächen sollten folglich Verfahren bevorzugt werden, die möglichst viele Meßeinflüsse berücksichtigen, vgl. W.-Wojtasik u. Besdo (1998). Beispiele für solche Berechnungsmethoden, ausgehend von diskreten Orientierungsverteilungen, sind bei W.-Wojtasik (1997) zu finden.

### Danksagung

Unser Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. S. Dannemeyer für die Durchführung der Fließflächenmessungen.

### Literatur

1. Gieseke, W.: Fließflächen und Versetzungsstrukturen metallischer Werkstoffe nach plastischer Wechselbeanspruchung. Technische Universität Braunschweig, Dissertation 1995.
2. Michno, M.J.; Findley, W.F.: An Historical Perspective of Yield Surface Investigations of Metals. Int. Journal of Non-Linear Mech., 11, (1976), 59 – 82.
3. Pöhlandt, K.: Beitrag zur Optimierung der Probengestalt und zur Auswertung des Torsionsversuches. Technische Universität Braunschweig, Dissertation 1977.
4. Pöhlandt, K.: Vergleichende Betrachtung der Verfahren zur Prüfung der plastischen Eigenschaften metallischer Werkstoffe. Berichte aus dem Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart. Berlin: Springer 1984.
5. Wellerdick-Wojtasik, N.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Fließflächenentwicklung bei großen Scherdeformationen. Universität Hannover, Dissertation 1997.
6. Wellerdick-Wojtasik, N.; Besdo, D.: Numerische Simulation experimentell meßbarer Fließflächen mit Hilfe von Texturmodellen. ZAMM, erscheint 1998.

---

*Anschrift:* Dr.-Ing. Norbert Wellerdick-Wojtasik und Prof. Dr.-Ing. Dieter Besdo, Institut für Mechanik, Universität Hannover, Appelstraße 11, D-30167 Hannover