

Kugelstrahlumformen, Neuere Technologische und Theoretische Entwicklungen

Kopp, R. Prof. Dr.-Ing.

Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen

Intzestr. 10

5100 Aachen

Bundesrepublik Deutschland

ABSTRACT

Shot-peenforming and shape-punch-forming combined with elastic prestraining are methods to form large integrally stiffened panels with very different wall thicknesses. A theoretical model based on the plastic flow of material shows how to calculate the curvature.

KEYWORDS

Shape of tools, elastic prestraining, forming strategy, curvature of sheet parts, modeling, forming process control.

EINLEITUNG

Das Kugelstrahlen zum Zwecke des Umformens (KSU) als auch das Formstempelumformverfahren (FSU), ein dem Prinzip nach dem Kugelstrahlen verwandtes Verfahren, haben in den letzten Jahren in der Bundesrepublik Deutschland zunehmend Anwendung bei der Herstellung der Bauteile der Luft- und Raumfahrtindustrie gefunden. Ergebnisse beim Kugelstrahlumformprozeß bezüglich Werkstofffluß und Umformzone, Formänderungsgeschwindigkeiten, Formänderungen und Spannungen sowie Kraftbedarf, Temperaturen und Eigenspannungen in Abhängigkeit von der Anzahl der Kugelstöße wurden schon auf der ersten ICSP (Kopp, 1982) behandelt. Ebenso konnten wesentliche Einflußgrößen zur Erzeugung der Geometrie von Blechen mittels dieses Verfahrens aufgezeigt werden (Hornauer, 1982). Die Beeinflussung der Geometrie des Bauteiles

durch Steuerung des örtlichen Stoffflusses ist nun ein weiterer wesentlicher Gesichtspunkt, um die Genauigkeit des Verfahrens zu erhöhen, die Eigenschaften des Verfahrens voll zu nutzen (Einsparung von Vor- und Nacharbeiten sowie von Spannvorrichtungen) und wenn möglich, auch die mechanischen Eigenschaften zu verbessern.

Daher wurde in den letzten Jahren am Institut für Bildsamer Formgebung der RWTH Aachen hauptsächlich an der Erkenntnis dieser Zusammenhänge gearbeitet. Versuchsergebnisse sowie elementare Modelle werden dargestellt. Das Ziel der Forschungsarbeit ist, durch Kenntnis der örtlichen Vorgänge beim Kugelstrahlumformen und Formstempelumformen die integrale Wirkung auf das ganze Bauteil und die erzielbare Geometrie vorausberechnen zu können. Des Weiteren ist eine adaptive Steuerung des Umformprozesses zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit des Verfahrens geplant.

BEEINFLUSSUNG DES WERSTOFFFLUSSES

Die wesentlichen Verfahrensparameter zur Beeinflussung der plastischen Formänderungen sind: elastisches Vorspannen des Bauteiles, Wahl von Umformwerkzeugen mit geeigneter Wirkfläche sowie die Auswahl der für das Bauteil richtigen Umformstrategie.

Im folgenden werden einige Ergebnisse diskutiert.

Vorspannung

Viele gekrümmte Bauteile in der Luft- und Raumfahrt weisen lediglich in einer Richtung eine Krümmung auf. Um die beim Kugelstrahlumformen vom Prinzip her notwendigerweise entstehende Krümmung in der zweiten Richtung zu unterdrücken, kann das Bauteil z.B. in der gewünschten Krümmungsrichtung elastisch vorgespannt werden. Dadurch entsteht der in Bild 1 dargestellte Spannungszustand. Die Spannung in x-Richtung ergibt sich durch die Querkontraktion. Dadurch würde sich das Bauteil in x-Richtung nach oben durchwölben (antiklastischer Effekt). Durch die Vorspannkräfte F_V wird dies verhindert, wodurch jedoch an der konvexen Oberfläche in x-Richtung Zugspannungen entstehen. Beim Eindringen einer Kugel in ein so vorgespanntes Bauteil ergibt sich dann ein elliptischer Abdruck mit der großen Hauptachse in y-Richtung. In einem gekrümmten Bauteil ohne Vorspannung müßte die große Ellipsenhalbachse um 90° verdreht liegen. Die Abhängigkeit der Ellipsenform von der Vorspannung $\sigma_{V,y}$ (Bild 1) zeigt Bild 2, und die Abhängigkeit des

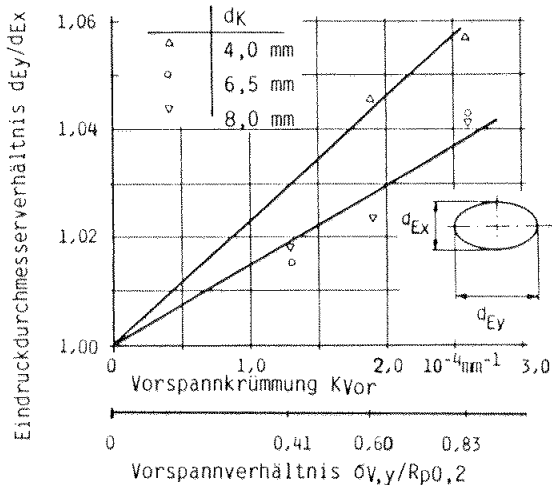
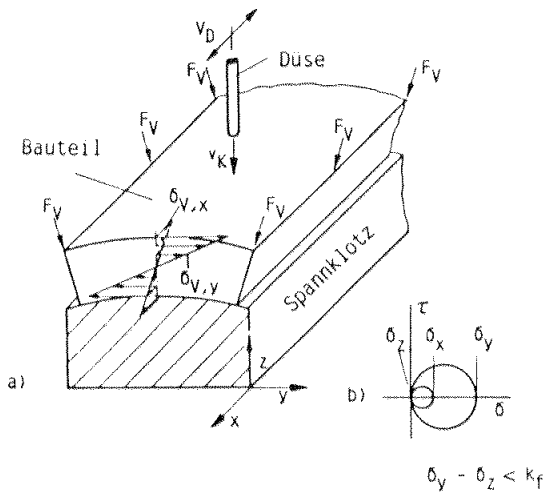


Bild 1: Vorspannprinzip zur Beeinflussung des örtlichen Stoffflusses (a) und Mohrsche Spannungskreise in konvexer Oberfläche (b)

Bild 2: Eindruckdurchmesser Verhältnis in Abhängigkeit der Vorspannung (Parameter: Kugeldurchmesser d_K)

Werkstoff 7075 T 76
 Geometrie Verhältnis $l_y/l_x = 1,2$
 Blechdicke $s = 3,9 \text{ mm}$

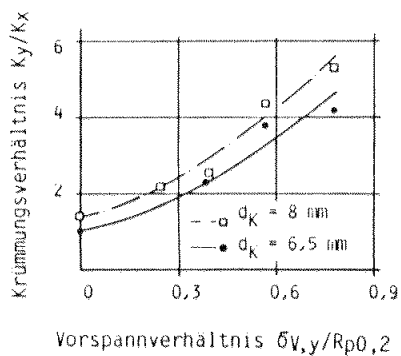


Bild 3: Krümmungsverhältnis K_y/K_x in Abhängigkeit der Vorspannung in y-Richtung für zwei unterschiedliche Kugeldurchmesser (Variation von Kugelgeschwindigkeit und Masse/Fläche)

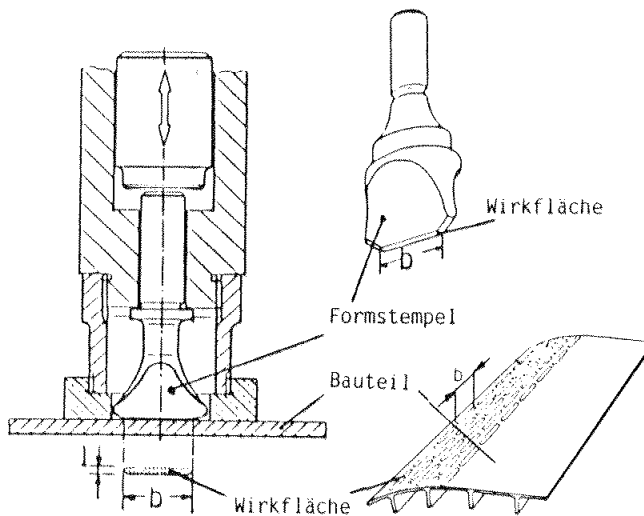


Bild 4: Formstempelumformverfahren

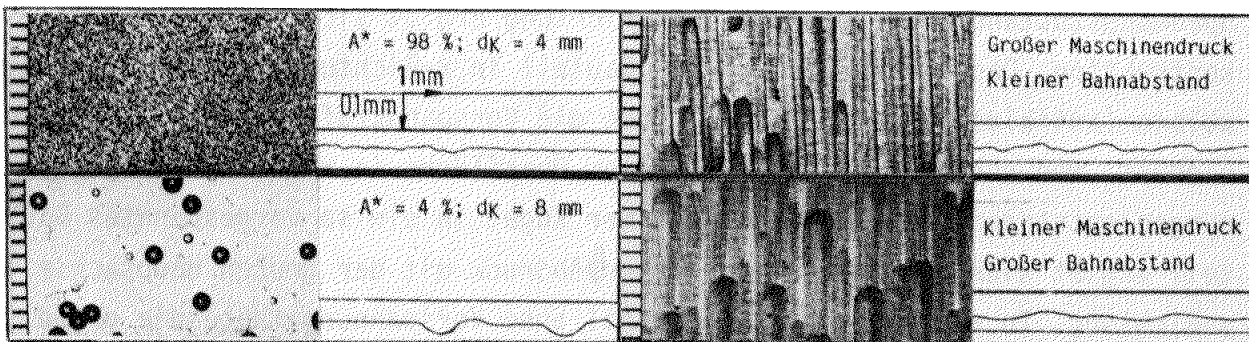


Bild 5: Oberflächenstruktur von kugelstrahlunggeformten und formstempelumgeformten Bauteilen

Krümmungsverhältnisses K_y/K_x geht aus Bild 3 hervor.

Werkzeuggeometrie

Bei dickwandigen Bauteilen und Bauteilen mit stufenförmigen Wandstärkenprofilen müssen aufgrund sehr großer Spannkkräfte oder infolge des durch den Trägheitsmomentensprung entstehenden Krümmungsgradienten teure Vorspanneinrichtungen geschaffen werden, um das Krümmungsverhältnis K_y/K_x in den gewünschten Grenzen zu halten. Eine Alternative kann das sogenannte Formstempelumformverfahren sein.

Wie aus den Bereichen der Umformverfahren Schmieden oder Walzen bekannt, beeinflussen die Geometrieverhältnisse von Werkzeug und Werkstück die Fließwiderstände und damit den örtlichen Stofffluß. Nach demselben Prinzip arbeitet das Formstempelumformverfahren (FSU) (Bild 4). Durch den Impulsaustausch eines druckluftgetriebenen Bolzens mit dem Formstempel, der in bestimmten Bahnen über das Bauteil geführt wird, lassen sich ohne Vorspannung die gewünschten einachsig gekrümmten Formen erreichen. Jedoch auch komplexere Geometrien können hergestellt werden. Bild 5 zeigt einen Vergleich von Oberflächen nach der KSU- und FSU-Behandlung.

Umformstrategie

Schon früher wurde der Einfluß des Strahlweges auf die Bauteilgeometrie qualitativ diskutiert. Im folgenden sind einige in der Zwischenzeit ermittelte quantitative Ergebnisse dargestellt. Hieraus wird deutlich, daß die Umformstrategie, also der Weg der Strahldüse oder des Formstempels, gezielt zur Steuerung des Krümmungsverhältnisses K_y/K_x herangezogen werden kann. Wird z.B. ein Bauteil durch Strahlen örtlich einmalig stark oder mehrmalig schwach umgeformt, so zeigen sich klare Krümmungsunterschiede (Bild 6). Es ist also nicht nur die Behandlungsart, sondern auch die Reihenfolge der Strahloperationen von Bedeutung. Dies gilt auch für die Reihenfolge bei der Kombination dieser Verfahren.

MODELL ZUR BERECHNUNG DER UMFORMPARAMETER DER IMPULS- UMFORMVERFAHREN KSU/FSU

Die folgenden Erläuterungen beziehen sich auf die elementaren Modellvorstellungen beim KSU- und FSU-Verfahren.

Bereits bei der ersten ICSP wurde das Grundmodell vorgestellt. Dieses Modell beruht auf einer Verknüpfung der Stoßkraft aus der Hertzschen Theorie mit der Umformkraft aus der Plastomechanik. Dabei ergibt sich eine Korrelation zwischen der Geometrie der Wirkfläche zwischen Werkzeug (Kugel, Formstempel) und Werkstück und den prozeßrelevanten Parametern (Bild 7). In Bild 8 sind weitere Annahmen bezüglich der Tiefe der plastischen Zone zusammengestellt. Mit diesen Erkenntnissen können nun für verschiedene Randbedingungen Geschwindigkeitsfelder entwickelt werden, mit denen die örtliche Formänderungsverteilung ermittelt und letztlich die Krümmung des gesamten Bauteiles vorausbestimmt werden kann. In den Bildern 9 bis 11 sind die Geschwindigkeitsfelder für die Fälle "abgeplattete Kugel in spannungsfreiem Werkstoff" (Bild 9), "abgeplattete Kugel in spannungsbehaftetem Werkstoff" (Bild 10), "abgeplatteter Zylinder in spannungsfreiem Werkstoff" (Bild 11), "abgeplatteter Zylinder in spannungsbehaftetem Werkstoff" (analog Bild 10) sowie die Gleichungen für die Formänderungsgeschwindigkeiten dargestellt.

In den Bildern 12 und 13 sind die zugehörigen Formänderungsverteilungen gezeigt.

Für den Fall "Kugel in spannungsfreiem Werkstoff" ist ein Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten wiedergegeben (Bild 14). Hierbei zeigt die unterhalb der Kugelmitte erzeugte radiale Dehnungsverteilung mit den vom Modell errechneten eine gute Übereinstimmung bis auf den randnahen Oberflächenbereich. Hierauf wurde schon bei der 1. ICSP eingegangen. Darüberhinaus wurde in der Zwischenzeit die radiale Dehnungsverteilung im gesamten plastischen Bereich experimentell ermittelt (Bild 15). Dieser Dehnungsverlauf wird im Modell durch einen Korrekturfaktor berücksichtigt, wie weiter unten gezeigt wird. Eine genauere örtliche Vorausberechnung dieses Umformprozesses sowie die Wirkung auf das Bauteil wird in Zukunft mit Hilfe der finiten Elemente durchgeführt.

Aufbauend auf den Erkenntnissen innerhalb der einzelnen plastischen Zonen läßt sich die Krümmung des gesamten Bauteiles anhand folgender Modellvorstellung für unterschiedliche Werkzeuggeometrien vorausbestimmen:

Jeder Werkzeugeindruck plastifiziert einen kleinen Bereich des Bleches und erzeugt eine charakteristische Dehnungsverteilung, z.B. ϵ_{rp1} (Bild 16a). Das Modell zur Berechnung der Bauteilkrümmung setzt nun voraus, daß die Wirkung dieser Dehnungsverteilung ϵ_{rp1} auf die Krümmung gleich sein soll wie die Wirkung einer in der gesamten Bauteiloberflächenschicht gleich-

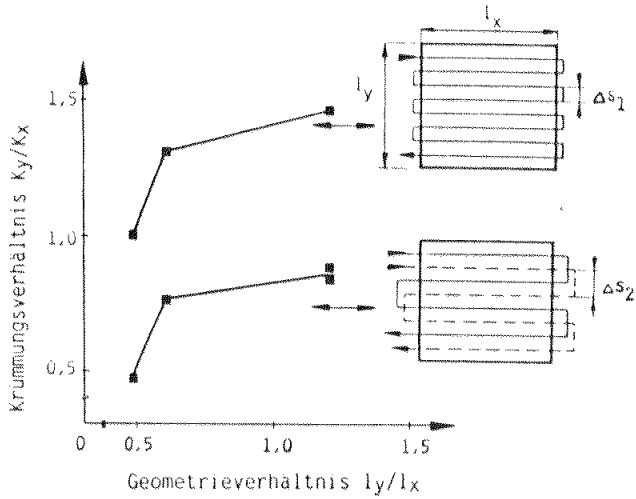
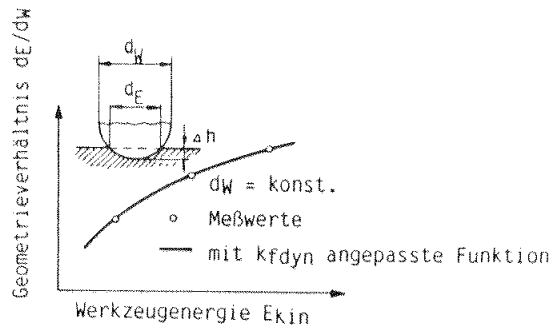


Bild 6: Kugelstrahlumformung von Blechen mit gleicher Strahlmittelmenge pro Fläche jedoch mit örtlich unterschiedlicher Reihenfolge der Strahlbahnen



$$dE/dW = f(E_{kin}, E, v, k_{fdyn}, k_w/k_f)$$

Bild 7: Berechnung des Verhältnisses Abdruckdurchmesser d_E zu Werkzeugdurchmesser d_W anhand einer an Versuchswerte (mit einem Werkzeugdurchmesser) angepassten Funktion

Werkzeug	Kugel		Zylinder	
	= 0	> 0	= 0	> 0
Vorspannung	= 0	> 0	= 0	> 0
Umformzone (idealisiert)	Zylinder	elliptischer Zylinder	Rechteck	Rechteck
Geschwindigkeitsfeld	axialsymmetrisch	elliptischer Zylinder	eben	eben; $\dot{\epsilon}_y = f(\sigma_y)$
Tiefe der plast. Zone	$h_0 = d_E$	$\frac{d_E}{\sqrt{2}} < h_0 < d_E$ $h_0 = f(d_{Ey}, d_{Ex})$	$h_0 = \frac{d_E}{\sqrt{2}}$	$h_0 = \frac{d_E}{\sqrt{2}} \cdot f(\sigma_y)$

Bild 8: Annahmen für das Modell bei verschiedenen Umformbedingungen

Annahme: Umformzone = Zylinder

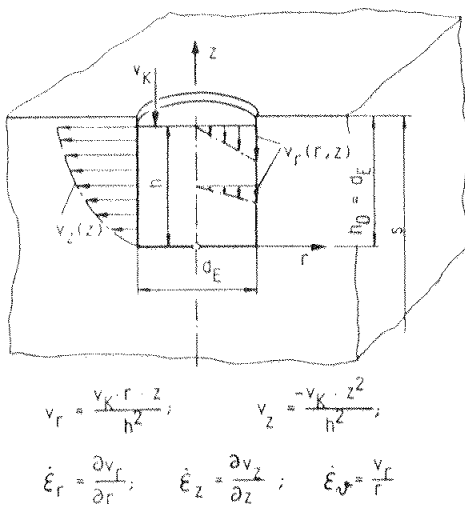


Bild 9: Axialsymmetrische Geschwindigkeitsverteilung innerhalb der Umformzone

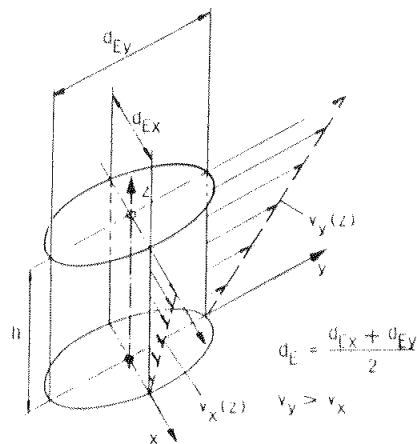
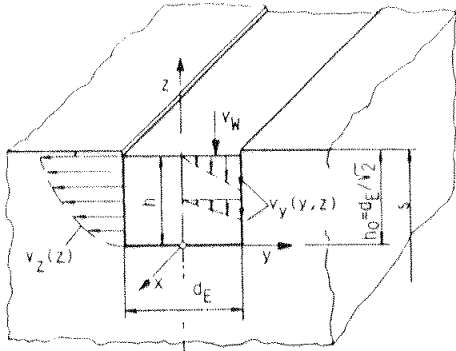


Bild 10: Elliptische Geschwindigkeitsverteilung erzeugt durch Vorspannen eines Werkstückes

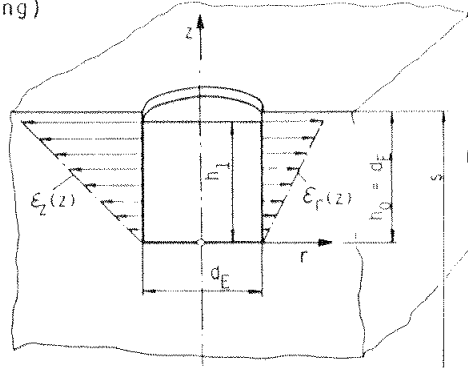
Annahme: Umformzone = Rechteck (ebene Umformung)



$$v_x = 0; \quad v_y = \frac{2v_K}{h^2} \cdot z \cdot y; \quad v_z = -\frac{v_K}{h^2} \cdot z^2$$

$$\dot{\epsilon}_x = 0; \quad \dot{\epsilon}_y = \frac{\partial v_y}{\partial y}; \quad \dot{\epsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z}$$

Bild 11: Ebene Geschwindigkeitsverteilung innerhalb der Umformzone



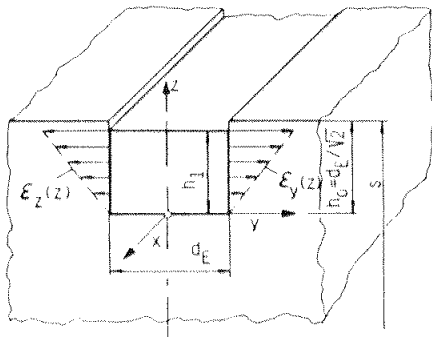
mit $dt = -\frac{dh}{v_K}$ und $\epsilon = \int_0^t \dot{\epsilon} dt = \int_{h_0}^{h_1} -\dot{\epsilon} \frac{dh}{v_K}$

folgt $\epsilon_r = \epsilon_y = z \cdot \left(\frac{1}{h_1} - \frac{1}{h_0}\right); \quad \epsilon_z = -2z \cdot \left(\frac{1}{h_1} - \frac{1}{h_0}\right)$

Bild 12: Berechnete axialsymmetrische Dehnungsverteilung innerhalb der Umformzone

Werkstück: Aluminium 7075 T 7351

Kugel: 100 Cr 6 ; $d_k = 18 \text{ mm}$



$$\epsilon_x = 0; \quad \epsilon_y = 2z \cdot \left(\frac{1}{h_1} - \frac{1}{h_0}\right); \quad \epsilon_z = -2z \cdot \left(\frac{1}{h_1} - \frac{1}{h_0}\right)$$

Bild 13: Berechnete ebene Dehnungsverteilung innerhalb der Umformzone

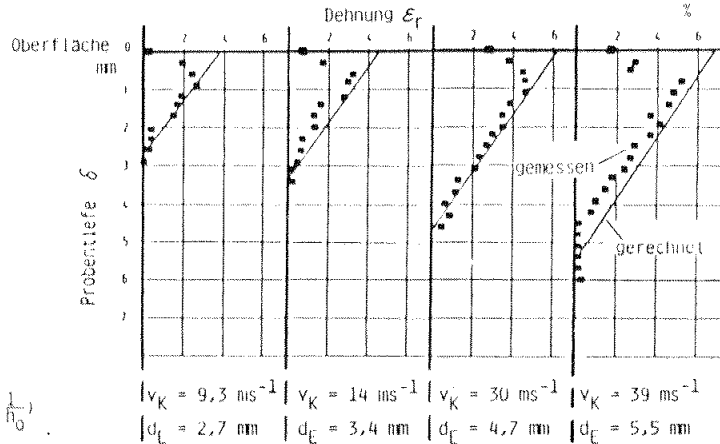
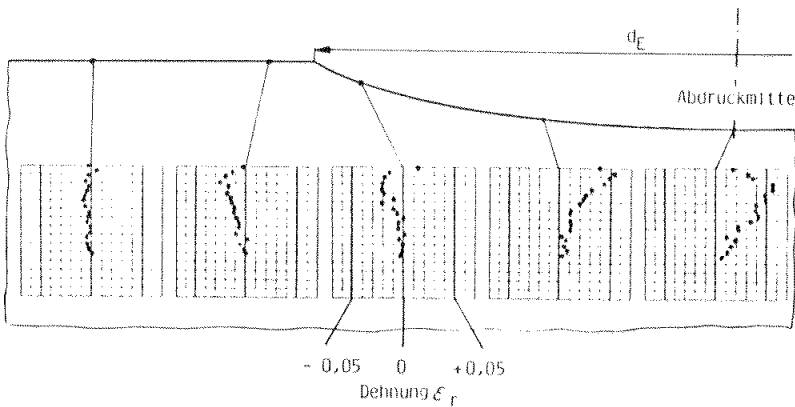


Bild 14: Vergleich berechneter und gemessener radialer Dehnung unterhalb der Eindruckmitte



Probe: Aluminium 7075 T 7351;
 $d_E = 5,5 \text{ mm}$
 Kugel: 100 Cr 6 ; $d_k = 18 \text{ mm}$;
 $v_K = 39 \text{ ms}^{-1}$

Bild 15: Örtliche radiale Dehnungsverteilung an verschiedenen Stellen unterhalb eines Kugleindrucks

mäßig verteilten fiktiven Dehnung $\hat{\epsilon}_{rp1}$ (Bild 16b). Die Dehnungsverteilung $\hat{\epsilon}_{rp1}$ erhält man durch Multiplikation der Dehnungsverteilung ϵ_{rp1} eines Eindruckes mit dem Bedeckungsgrad A^* . Hierbei muß der sich tatsächlich verändernde Dehnungsverlauf ϵ_{rp1} in der plastischen Zone durch einen Korrekturfaktor berücksichtigt werden. Dieser Korrekturfaktor wird zur Zeit noch empirisch ermittelt. Bei Annahme ebener Querschnitte im Bauteil kann dann die bleibende Dehnung ϵ_{rb10} an der Bauteiloberfläche berechnet werden. Dabei geht man von der Vorstellung aus, daß das Bauteil zunächst aus einzelnen, entsprechend der plastischen Dehnungsverteilung unterschiedlich verlängerten Schichten besteht. Diese Schichten müssen entsprechend der Bedingung der ebenen Querschnitte über den ganzen Querschnitt des Bauteiles elastisch linear gedehnt bzw. gestaucht werden (Bild 16b).

Die Krümmung des Bleches läßt sich dann aus der Gleichung $R = (s-k)/\epsilon_{rb10}$ berechnen (Hornauer, 1982). Eine Gegenüberstellung gerechneter mit gemessenen Werten ist in Bild 17 zu sehen.

Eine weitere Verbesserung der Bauteiltoleranzen kann u.U. durch eine adaptive Regelung erreicht werden, die zur Zeit noch entwickelt wird. Eine Versuchseinrichtung und erste Ergebnisse zur Analyse der Zusammenhänge der elastischen und plastischen Vorgänge zeigt Bild 18. Auf diese Weise soll der Fertigungsablauf in Zukunft bei Integralteilen, wie in Bild 19 z.B. dargestellt, weiter optimiert werden.

Literatur

Hornauer, K.-P.:

Untersuchungen zur Umformung von Bauteilen durch Kugelstrahlen

Dr.-Ing. Diss. RWTH Aachen 1982

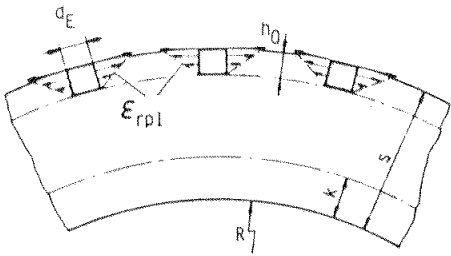
Kopp, R. u. K.-P. Hornauer:

Kugelstrahlumformen, ein flexibles Umformverfahren

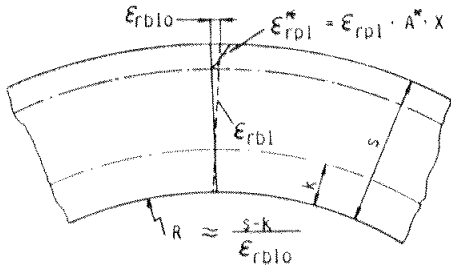
Paris, September 1981

In: First International Conference on Shot Peening, Pergamon Press

(Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt) 1982, S. 541/54



a) Radialdehnung in der plastischen Zone, berechnet nach dem starr-plastischen Modell



b) Lineare Radialdehnung über die gesamte Probendicke

Bild 16: Zur Umwandlung der starr-plastischen Dehnung in eine lineare Dehnungsverteilung über die gesamte Probendicke (für KSU und FSU)

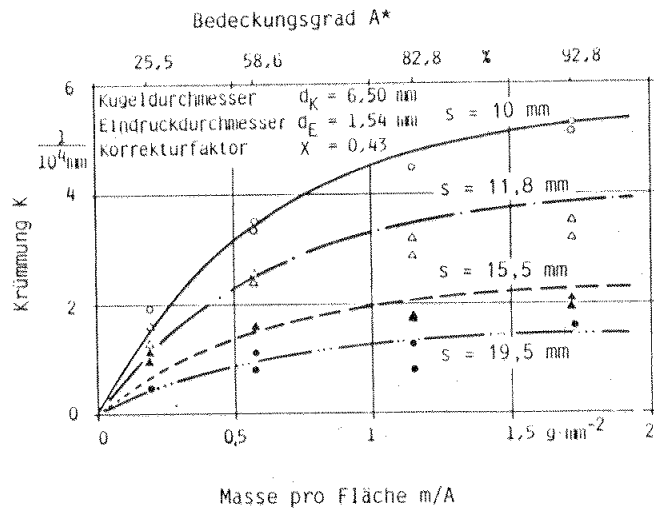


Bild 17: Axialsymmetrische Krümmung von Blechen im Vergleich mit Modellrechnungen als Funktion der Masse pro Fläche

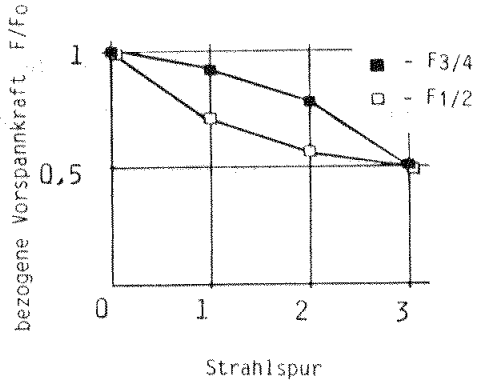
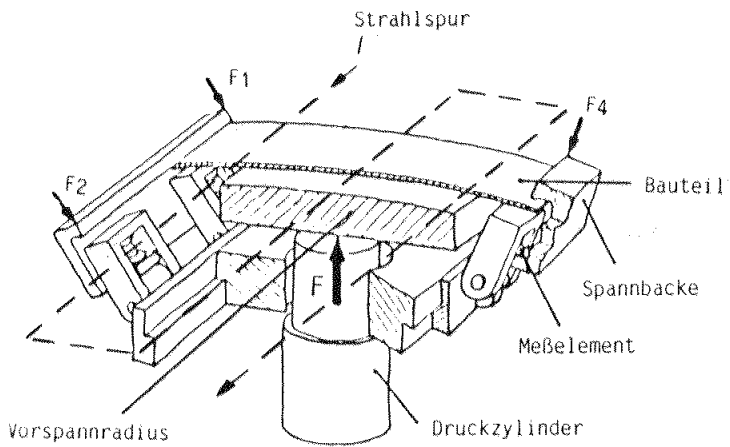


Bild 18: Überwachung der Vorspannkraften beim Impulsumformen (Prinzip)

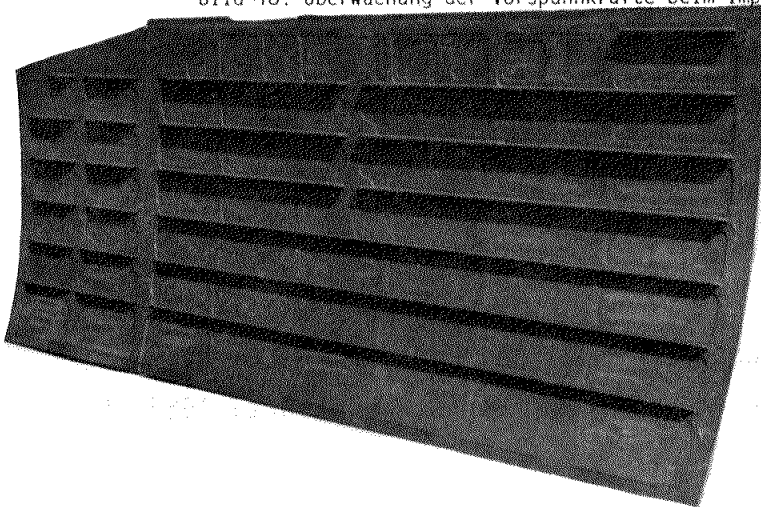


Bild 19: Seitenschale des Airbus A310 nach der Umformung