

KUGELSTRAHL-UMFORMEN, EIN FLEXIBLES UMFORMVERFAHREN

R. Kopp* und K.-P. Hornauer*

**Institut für Bildsame Formgebung, RWTH Aachen, Bundesrepublik Deutschland*

ABSTRACT

In shot-peenforming accelerated balls are shot on sheet structural parts, which change their form depending on jet intensity, jet direction, and the mechanical characteristics of balls and structural parts. This report shows relationships between these parameters. At first the plastic flow of material, plastic zone, strain, strain rate, stresses, residual stresses and forces are analyzed in case of peening with a single ball. Then some aspects of the residual stress and the relationship between the jet way and the form of the structural parts are given in case of shot-peening with two or more balls. A simple relationship between peening parameters and the change in average value of curvature of the structural parts is derived. At last a table of forms, which can be produced by shot-peenforming, is given. The aim of this report is to spread the knowledge of the shot-peenforming process in order to extend the applications of this interesting, flexible manufacturing process.

KEYWORDS

Analysis of plastic flow of material, plastic zone, strain rate, strain, stress, residual stress, calculation and control of curvature, table of forms.

EINLEITUNG

Während das Kugelstrahlen zur Verfestigung von Bauteil-Oberflächenschichten ein weit verbreitetes und bekanntes Verfahren ist, handelt es sich beim Umformen durch Kugel-

strahlen um ein weniger verbreitetes Fertigungsverfahren. Nahezu ausschließlich im Flugzeugbau angewendet beruht dieses Verfahren auf dem gleichen physikalischen Grundgedanken wie das Verfestigungsstrahlen, nur daß beim Kugelstrahl-Umformen die Intensitäten der Kugeln so groß sind, daß das Bauteil auch seine Makro-Geometrie verändert. Der Zusammenhang zwischen Strahlparametern (hauptsächlich Intensität, Strahlweg, mechanische Eigenschaften von Kugel und Bauteil) und Geometrie- und Eigenschaftsveränderung der Bauteile ist noch weitgehend unerforscht. Da aber die Kenntnis dieser Zusammenhänge für die weitere Entwicklung des Verfahrens von grundlegender Bedeutung ist, wird es immer notwendiger, sich mit den dabei auftretenden metallkundlichen und umformtechnischen Vorgängen zu beschäftigen. Im folgenden wird versucht, die umformtechnischen Zusammenhänge des Kugelstrahl-Umformen anhand einfacher Modellvorstellungen aufzuzeigen. Der Kugelstrahlumformprozeß kann in Anlehnung an Lange (1971) in 8 Einflußzonen eingeteilt werden (Bild 1):

- 1 Umformzone
- 2 Eigenschaften vor dem Umformen
- 3 Eigenschaften nach dem Umformen
- 4 Wirkfuge
- 5 Werkzeug (Strahlmittel)
- 6 Oberflächenreaktionen
- 7 Strahlanlage
- 8 Betrieb

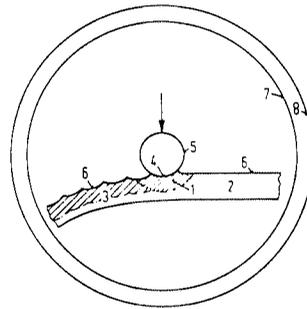


Bild 1: Einflußzonen beim Kugelstrahl-Umformen

Im folgenden sollen einige Zusammenhänge in den Bereichen 1 bis 5 näher behandelt werden. Der Kugelstrahlumformeffekt ergibt sich aus den lokalen Formänderungen beim Eindringen jeder einzelnen Kugel. Deshalb soll zunächst der Einzelstoß näher analysiert werden, danach zwei nebeneinanderliegende Kugeleindringvorgänge und flächenweise gestrahlte Bauteile, wobei die gestrahlten Flächen verschiedene Muster aufweisen können (Bild 2):

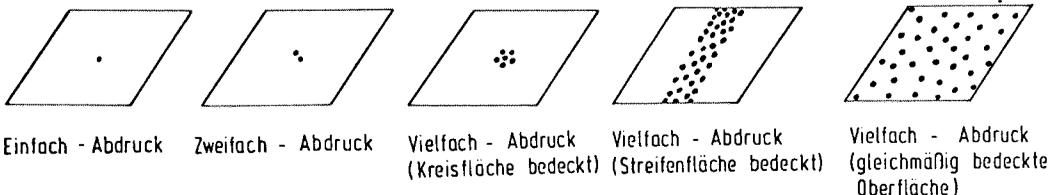
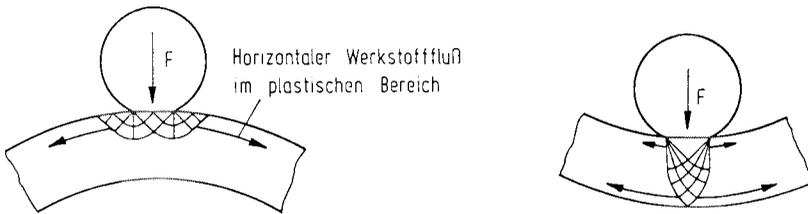


Bild 2: Grundmuster für das Kugelstrahl-Umformen

EINDRINGEN EINER KUGEL IN EINE PLATTE

Werkstofffluß und plastische Zone

Beim Kugelstrahlumformen werden Kugeln oder kugelähnliche Partikel nach dem Schleuderradprinzip, nach dem Strahlprinzip (Überdruck oder Unterdruck) oder nach dem Schwerkraftprinzip (freier Fall von Kugeln) beschleunigt gegen ein Bauteil gelenkt. Die vom Werkzeug abgegebene Energie bewirkt, daß die Kugel in das Bauteil eindringt und einen Bereich unterhalb des Abdruckes im Werkstück plastifiziert. Der in Strahlrichtung gestauchte Werkstoff wird aufgrund des Materialzusammenhangs quer dazu ausweichen. Je nach Tiefe der plastifizierten Zone und je nach Reibung zwischen Kugel und Bauteil wird der Werkstoff mehr an der Oberfläche der gestrahlten Seite oder über die ganze Bauteildicke quer zur Strahlrichtung abfließen, wodurch die in Bild 3a,b dargestellten Krümmungen entstehen können.



- a) Konvexe Umformung bei geringer Plastifizierung des Bauteiles b) Konkave Umformung bei starker Plastifizierung des Bauteiles

Bild 3: Mögliche Krümmungen beim Kugelstrahl-Umformenerläutert mit Hilfe der Gleitlinientheorie (schematische Skizze)

Im allgemeinen wird die Energie der Kugel so eingestellt, daß der Fall a) eintritt, was u.a. mit dem damit zusammenhängenden Eigenspannungszustand zusammenhängt. Aufgrund der durch die Kugel innerhalb der plastifizierten Zone erzeugten Druckspannungen in vertikaler und horizontaler Richtung zählt das Kugelstrahl-Umformen zu den Druckumformverfahren.

Um den Werkstofffluß und die inneren Vorgänge beim Eindringen einer Kugel besser zu verstehen, wurden Meßrasterversuche unternommen (Bild 4). U.a. ergibt sich hieraus, daß sich die plastische Zone in einem kugelförmigen Bereich unterhalb des Abdruckes ausbildet. Auch die Gleitlinientheorie gibt Hinweise über die mögliche Ausbildung der plastischen Zone (Bild 3). Aus Bild 3 a läßt sich z.B. für die Tiefe der plastischen Zone $h = d/\sqrt{2}$ ermitteln (Kopp, 1974), wenn d der Durchmesser des Kugelabdruckes auf dem Bauteil ist. Entsprechend den Reibungsverhältnissen entsteht unterhalb der Wirkfläche eine mehr oder weniger große fließbehinderte Zone, was auch von anderen Umformverfahren her bekannt ist. Mit Hilfe der Meßraster lassen sich die Formänderungsgeschwindigkeit und die Formänderungen im plastischen Bereich ermitteln. Da-

mit kann dann die örtliche Temperatur und die Verfestigung des plastifizierten Bereichs berechnet werden.

Es ist bekannt, und Bild 4 bestätigt dies, daß die plastische Zone beim Eindringen einer Kugel in guter Näherung kugelförmig ist. Für ein elementares Berechnungsmodell ist es sinnvoll, diese kugelige Form durch eine zylindrische zu vereinfachen (Bild 5):

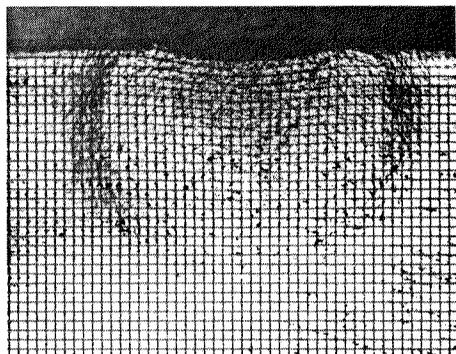


Bild 4: Meßraster-Änderungen unterhalb eines Kugelabdruckes

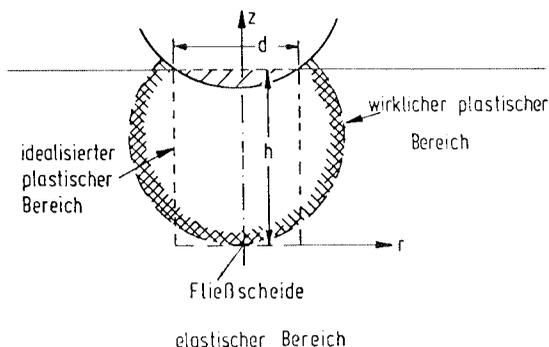
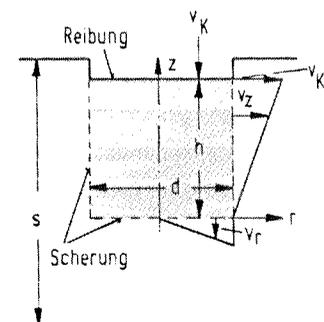


Bild 5: Die Umformzone beim Eindringen einer elastischen Kugel in eine plastifizierbare Platte.

Bei Annahme homogener Umformung (d.h. ebene Querschnitte bleiben eben) ergeben sich für den radialen und axialen Werkstofffluß folgende Geschwindigkeitsverläufe (Bild 6):



$$v_r = \frac{|v_K|}{2h} r \quad (1)$$

$$v_z = -\frac{|v_K|}{h} z \quad (2)$$

Bild 6: Elementare Modellvorstellung für das Eindringen eines Werkzeuges (idealisiert abgeplattete Kugel).

Bei diesem einfachen Modell müssen am Zylindermantel und -boden Scherflächen zugelassen werden, was bei der Leistungsberechnung berücksichtigt werden muß. Mit dem vorliegenden Geschwindigkeitsfeld können die Formänderungsgeschwindigkeiten berechnet werden.

Formänderungsgeschwindigkeit

Die Formänderungsgeschwindigkeiten ergeben sich nach den Gleichungen

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\partial r}{\partial t} = \frac{|v_K|}{2h}; \quad \dot{\epsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{|v_K|}{h}; \quad \dot{\epsilon}_\varphi = \frac{v_r}{r} = \frac{|v_K|}{2h} \quad (3)$$

Die Vergleichsformänderungsgeschwindigkeit nach v. Mises wird nach der Gleichung

$$\dot{\epsilon}_V = |\dot{\epsilon}_z| = \left| \frac{v_K}{h} \right| \hat{=} \dot{\psi} \quad (\text{in Bild 8}) \quad (4)$$

berechnet.

In Bild 7 ist diese Gleichung dargestellt unter der Annahme, daß die Kugelgeschwindigkeit v_K von der Auftreffgeschwindigkeit v_{K0} linear auf Null abfällt, die Höhe der plastischen Zone h von einem unbekanntem Anfangswert h_0 auf den Endwert nach einer noch unbekanntem ansteigenden Funktion verläuft.

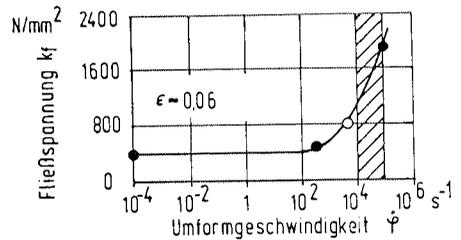
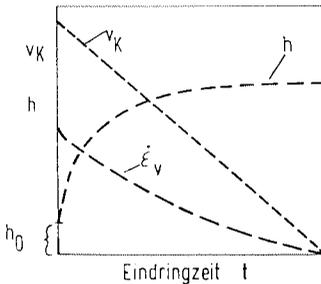


Bild 7: Vergleichsformänderungsgeschwindigkeit beim Eindringen einer Kugel in eine Platte

Bild 8: Abhängigkeit der Fließspannung von $\dot{\psi}$ (Plaul 1965)

Wird angenommen, daß die Endhöhe h schon zum Zeitpunkt des Auftreffens der Kugel entstehen würden, ergäbe sich eine untere Schranke für den Wert $\dot{\epsilon}_V$ zu Beginn des Eindringvorganges. Mit einem Zahlenbeispiel soll der Betrag dieser Größe abgeschätzt werden: Bei einer Auftreffgeschwindigkeit der Kugel von $v_K = 10 \text{ m/s}$ und einer plastischen Zone mit $h = 1 \text{ mm}$ bei einer Blechdicke von 4 mm ergäbe sich $\dot{\epsilon}_V = 10^4 \text{ s}^{-1}$. Nimmt man einmal für den Beginn des Eindringvorganges $h_0 = 0,1 \text{ mm}$ an, so ergäbe sich bereits $\dot{\epsilon}_V = 10^5 \text{ s}^{-1}$. Derartig hohe Beträge von $\dot{\epsilon}_V$ zwingen zur Berücksichtigung dieses Parameters bei der Ermittlung der Fließspannung, die während des Umformprozesses vorliegt. Z.B. steigt die Fließspannung bei einem austenitischen Stahl von ca. 900 N/mm^2 bei $\dot{\psi} = 10^4 \text{ s}^{-1}$ auf ca. 1900 N/mm^2 bei $\dot{\psi} = 10^5 \text{ s}^{-1}$ (Bild 8).

Formänderungen

Ausgehend von den Formänderungsgeschwindigkeiten läßt sich der Formänderungszustand

berechnen. So ergibt sich die radiale Formänderung z.B. zu

$$\mathcal{E}_r = \int_t \dot{\mathcal{E}}_r dt = \int_h \mathcal{E}_r \frac{dh}{v_K} = -\frac{1}{2} \ln \frac{h}{h_0} \quad (5)$$

und die Vergleichsformänderung zu

$$\mathcal{E}_v = \int_t \dot{\mathcal{E}}_v dt = \left| \ln \frac{h}{h_0} \right| \quad (6)$$

In Bild 9 ist die radiale Formänderungsverteilung nach diesem Modell dargestellt. Man erkennt den Mangel dieses Modells, nämlich den sprunghaften Übergang des plastischen Bereichs zum nichtplastischen, was aus der Annahme eines starr-plastischen Werkstoffes herrührt.

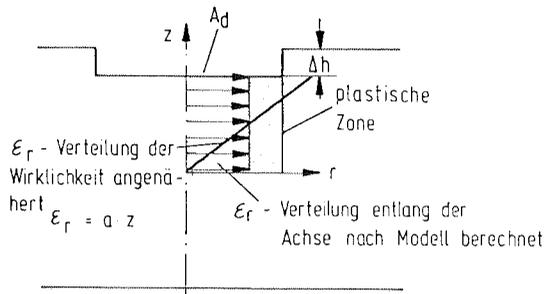


Bild 9: Radialer Formänderungszustand erläutert am elementaren Modell

In Wirklichkeit wird aber die radiale Dehnung unter äußerer Belastung von Null beginnend zunehmen, wobei am Rand wieder je nach Reibbedingungen ein Abfall eintreten kann. Sieht man einmal von diesem Abfall ab, so wäre die einfachste Näherung für den realen radialen Dehnungsverlauf eine lineare Dehnungsverteilung, wobei die Dehnung am Rand gerade doppelt so groß wie die nach dem Modell errechnete sein soll, d.h. die rechteckige Dehnungsverteilung aus dem plastomechanischen Modell wird in eine flächengleiche dreieckige Dehnungsverteilung umgewandelt. Die radiale Dehnungsverteilung in einem Bauteil zeigt Bild 10. Die einzelnen Kurvenverläufe bedeuten:

1. Radiale Dehnungsverteilung während Belastung, Annahme ebener Querschnitte
2. Bleibende Dehnungsverteilung nach Entlastung ohne Erfüllung der Gleichgewichtsbedingungen ($\Sigma F = 0$ und $\Sigma M = 0$)
3. Wie 2, jedoch mit Erfüllung der Gleichgewichtsbedingungen
4. Realer radialer Dehnungsverlauf, keine ebenen Querschnitte

Infolge der im Vergleich zu den bleibenden Formänderungen geringen Rückfederung stellt die Kurve 2 eine erste Näherung für die Kurve 4 dar.

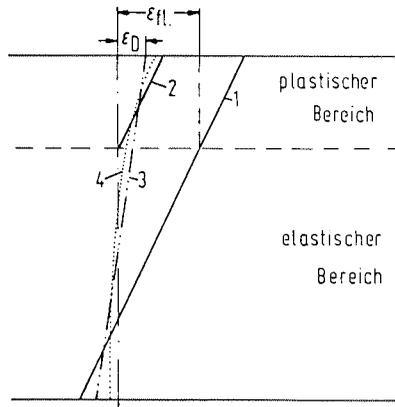


Bild 10: Radiale Dehnungsverteilung

Wie die Bilder 11 a,b,c zeigen, stimmt diese Modellvorstellung zumindest für den untersuchten Bereich relativ gut überein. Damit kann jetzt die Fließspannung k_f in Abhängigkeit von Formänderungsgeschwindigkeit und Formänderung an jeder Stelle der plastifizierten Zone abgeschätzt werden.

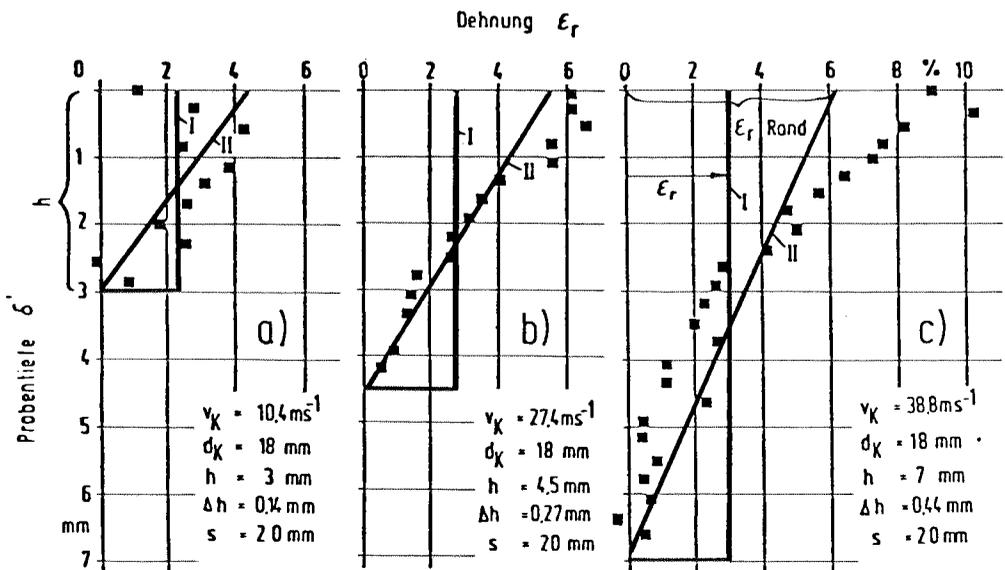


Bild 11: An Rasterproben gemessene Dehnungen unterhalb eines dynamisch erzeugten Kugelabdruckes

Die nächste Frage ist, ob mit diesem Dehnungsmodell auch die Krümmung des Werkstückes vorausbestimmt werden kann. Hierzu wird folgende Überlegung angestellt: Bei Annahme ebener Querschnitte wird sich der in Bild 10 dargestellte Dehnungsverlauf nach der Rückfederung einstellen (Kurve 3). Mit der Vereinfachung ebener Formänderung läßt sich der Zusammenhang

$$\epsilon_D = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{2\pi(R+c) - 2\pi R}{2\pi R} = \frac{c}{R} = f(\epsilon_r) \quad (7)$$

ableiten, woraus die Beziehung

$$R = \frac{c}{\epsilon_D(\epsilon_r)} \quad (8)$$

erhalten werden kann. ϵ_D läßt sich mit Hilfe der Gleichgewichtsbedingungen aus dem ϵ_r -Verlauf ermitteln (Kopp, 1974). Der Parameter c ist der Abstand der neutralen Linie im entlasteten Zustand von der gestrahlten Oberfläche.

Weiter unten wird eine Methode eingeführt, wie von diesem örtlichen Krümmungsradius, der sich beim Eindringen einer Kugel ergibt, auf den Krümmungsradius eines kugelgestrahlten Bleches geschlossen werden kann.

Spannungen

Zur Ermittlung der beim Eindringen einer Kugel in eine Platte auftretenden Spannungen gibt es bereits in der Literatur verschiedene mehr oder weniger komplizierte Ansätze (Lee u.a. 1972). Im folgenden sollen zwei einfache Methoden angewendet werden:

- a) Über eine Leistungsberechnung mit Hilfe eines Geschwindigkeitsfeldes. Die Umformleistung beim Eindringen einer Kugel setzt sich zusammen aus den Anteilen für die ideelle-, Reib- und Scherleistung:

$$P_{ges} = P_{id} + P_R + P_{Sch} \quad (9)$$

Dabei ist die ideelle Leistung

$$P_{id} = k_f v_K A_d \quad (10)$$

Die Reibleistung ist wegen der kugeligen Wirkfläche

$$P_R \approx 0 \quad (11)$$

Die Scherleistung am Mantel (P_{SchM}) des plastischen Zylinders berechnet sich nach der Gleichung

$$P_{\text{Sch}} = \int_A \tau v \, dA \quad (12)$$

Mit $\tau = k = k_f/2$, $v = 1/2 v_K$ ergibt sich damit für die Scherleistung am Mantel:

$$P_{\text{SchM}} = \frac{\pi}{4} k_f v_K d \cdot h = k_f \frac{h}{d} v_K A_d \quad (13)$$

Die Scherleistung am Boden des plastischen Zylinders errechnet sich analog (mit $v \approx \frac{1}{2} v_r = \frac{v_K \cdot d}{8h}$) zu:

$$P_{\text{SchB}} = \int_A \tau v \, dA = \frac{k_f v_K d}{2 \cdot 8h} \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \quad (14)$$

oder

$$P_{\text{SchB}} = \frac{1}{64} k_f \frac{d}{h} v_K A_d \quad (15)$$

Wegen $P_{\text{SchB}} \ll P_{\text{SchM}}$ wird dieser Anteil vernachlässigt. Aus der verbleibenden Gesamtleistung läßt sich der Umformwiderstand berechnen:

$$\frac{k_W}{k_f} = \frac{P_{\text{Sch ges}}}{k_f v_K A_d} = 1 + \frac{h}{d} \quad (16)$$

Der plastische Bereich mit dem Durchmesser d wird umgeben von elastischem Werkstoff, d.h. daß beim Eindringen der Kugel zusätzlich noch ein Anteil zur Überwindung der elastischen Dehnung aufgebracht werden muß. Für diesen Anteil wurde mit Hilfe der Gleitlinientheorie (Johnson u.a., 1970) näherungsweise nach der Gleichung der Druck

$$p = k_f \ln D/d \quad (17)$$

bestimmt. Mit D als dem Außendurchmesser des elastisch beanspruchten Ringbereiches ergibt sich bei einem Verhältnis $D/d = 2,5$ der Druck $p \approx 0,92 k_f$.

Damit ergibt sich insgesamt der bezogene Umformwiderstand zu:

$$\frac{k_W}{k_f} = 1 + \frac{h}{d} + \ln \frac{D}{d} \quad (18)$$

Mit $d = h\sqrt{2}$, erhält man für den Umformwiderstand $k_W \approx 2,6 \cdot k_f$.

b) über die Gleitlinientheorie

Bei Annahme eines ebenen Stempels ohne Reibung (abgeplattete Kugel, Bild 11 a) ergibt sich die zur Plastifizierung notwendige bezogene Spannung $k_W/k_f \approx 3$, und bei einer kugelförmigen Berührung (Bild 11 b) zu $k_W/k_f \approx 2,6$ (Prandtl, 1923)

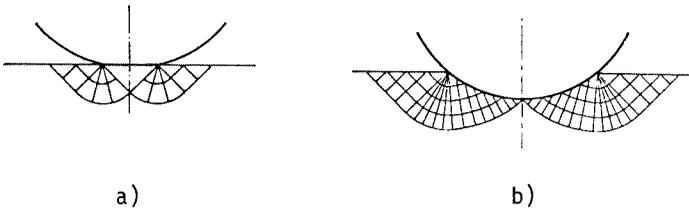


Bild 11: Ersatzmodell für die Spannungsberechnung m.H. der Gleitlinientheorie für das Eindringen
 a) einer abgeplatteten Kugel (ebene Formänderung)
 b) einer nicht abgeplatteten Kugel
 in eine Platte (ebene Formänderung)

Kraft

Die vorausgegangenen Spannungsberechnungen ergeben Werte zwischen 2,6 und 3,0. Für die weitere Betrachtung wird mit dem oberen Wert gerechnet. Mit der Spannung läßt sich die Umformkraft beim Eindringen der Kugel berechnen:

$$F = \frac{3}{4} k_f d^2 \quad (19)$$

Andererseits ergibt sich aus den Gleichungen nach Hertz für die maximale Stoßkraft

$$F = \left[\frac{5}{4} \frac{m_K}{\alpha} v_K^2 \right]^{3/5} \quad (20)$$

mit der Kugelmasse m_K und

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{9}{64} \frac{1}{r_K} \left[\frac{1-\nu_1}{G_1} + \frac{1-\nu_2}{G_2} \right]^2} \quad (21)$$

Am Übergang zwischen elastischem und plastischem Zustand werden beide Ansätze näherungsweise gleichgesetzt. Hieraus ergibt sich ein Zusammenhang zwischen der Tiefe der plastischen Zone h und allen wichtigen Prozeßparametern:

$$h = 0,8 \cdot C \cdot r_K \sqrt[3]{\frac{v_K^{6/5}}{k_f (\varphi, \varphi_{20})}} \approx 0,8 \cdot C \cdot r_K \sqrt[3]{\frac{v_K}{k_f (\varphi, \varphi_{20})}} \quad (22)$$

mit

$$C = \sqrt[3]{\frac{S^{3/5}}{\left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right]^{2/5}}} \quad (23)$$

Temperatur

Eine weitere wichtige Größe ist die während des Kugelstrahlens auftretende Temperatur. Zur Abschätzung örtlicher Temperaturen kann die Beziehung

$$\Delta v^{\circ} = \frac{k_f(\varphi, \dot{\varphi}) \cdot \varphi}{c \cdot \xi} \quad (24)$$

herangezogen werden.

An einem Zahlenbeispiel soll die Größenordnung dieses Wertes abgeschätzt werden.

Entsprechend Bild 8 errechnet sich für einen Stahl eine Temperaturerhöhung von $\Delta v^{\circ} = 17,8 \text{ K}$ für $\dot{\varphi} = 10^2 \text{ s}^{-1}$, $\Delta v^{\circ} = 46,8 \text{ K}$ für $\dot{\varphi} = 10^4 \text{ s}^{-1}$ und $\Delta v^{\circ} = 84,6 \text{ K}$ für $\dot{\varphi} = 10^5 \text{ s}^{-1}$

Eigenspannungen

Mit dem in Bild 10 dargestellten Modell läßt sich qualitativ der Eigenspannungsverlauf erklären. Bei Vorhandensein einer durch Reibung behinderten Zone ergibt sich der in Bild 13 dargestellte Dehnungs- und Eigenspannungsverlauf. Hiernach können sich in der Mitte des Kugelabdruckes in radialer Richtung Zugeigenspannungen, in den weiter außen liegenden Bereichen Druckeigenspannungen an der Oberfläche ergeben, was sich auch durch röntgenografische Messung nachweisen läßt (Bild 14).

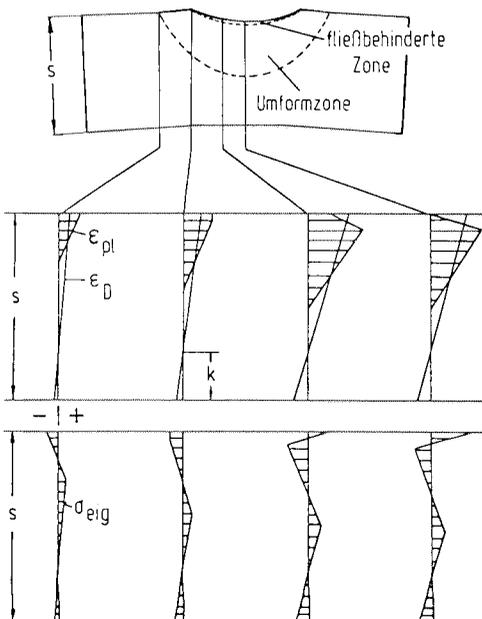


Bild 13: Eigenspannungen unterhalb eines Kugelabdruckes

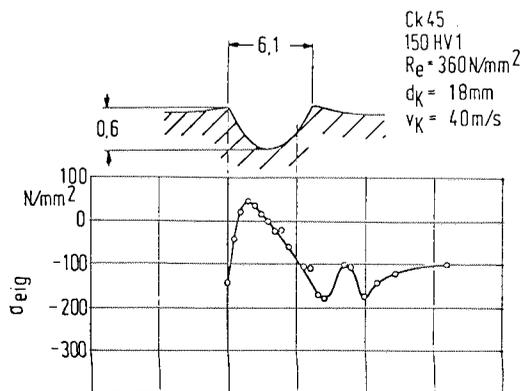


Bild 14: Röntgenografisch ermittelte Eigenspannungen in der Oberfläche eines dynamisch erzeugten Kugelabdruckes.

AUSWIRKUNG ZWEIER UND MEHRERER KUGELEINDRINGVORGÄNGE

Die dargestellten Zusammenhänge gelten grundsätzlich für jeden Kugelabdruck. Bei sehr dicht nebeneinanderliegenden plastischen Zonen zweier Kugeleindringvorgänge finden gegenseitige Beeinflussungen der mechanischen Eigenschaften in diesen Bereichen statt. Eine deutliche Beeinflussung erfährt z.B. die Eigenspannung in dem Bereich des vorhergehenden Kugeleindrucks, wie Bild 15 zeigt. Durch den verdrängten Werkstoff aus dem Bereich unterhalb des zweiten Kugeleindrucks werden die unter Zugspannung stehenden Bereiche des ersten Kugeleindrucks wieder entspannt, was einem Abbau der Zugeigenspannungen gleichkommt. Entsprechende Ergebnisse wurden bei einer Probe mit 15 definierten Kugelabdrücken erzielt (Bild 16).

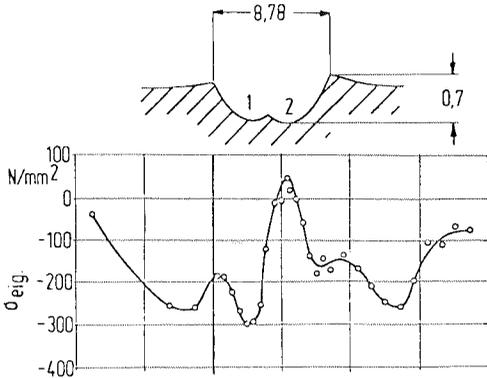


Bild 15: Oberflächen-eigenspannung im Bereich eines dynamisch erzeugten Zweifachabdruckes

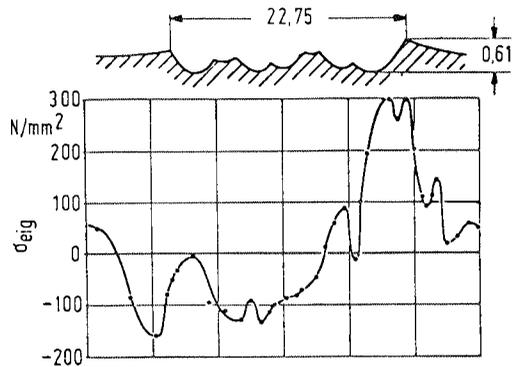


Bild 16: Oberflächen-eigenspannung im Bereich eines dynamisch erzeugten Vielfachabdruckes

FLÄCHENWEISE GESTRAHLTE BAUTEILE

Im folgenden sollen nun noch einige Fragen bei flächenweise gestrahlten Bauteilen diskutiert werden. In Bild 17 ist die Umformung einer Blechstruktur dargestellt, die auf einer kreisförmigen Fläche gestrahlt wurde. Es entsteht bei entsprechender Intensität eine Beule entgegen der Strahlrichtung. Wird nun die Strahldüse in einer Richtung verschoben, z.B. parallel zu einer Kante, so entsteht eine Krümmung des Bleches gemäß Bild 18 a. Je nach Größe der nichtgestrahlten Bereiche entstehen unterschiedliche Krümmungen in den beiden Richtungen (Bild 18 b). Hieraus lassen sich eindeutige Verfahrensrichtlinien ableiten. So muß z.B. ein Blech streifenförmig gestrahlt werden, wenn die Krümmung in Streifenrichtung kleiner als quer dazu sein soll. Außerdem bestimmt die Richtung der Strahlführung (Bild 19) die Richtung der Krümmung (Bild 20).

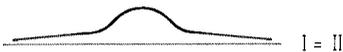
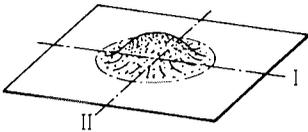


Bild 17: Partiiell kreisförmig umgeformtes Blech

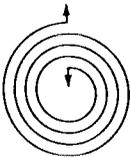
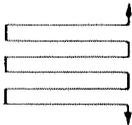


Bild 19: Strahlführungsmuster

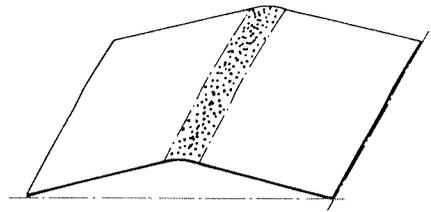


Bild 18 a: Streifenweise umgeformtes Blech mit breiten Randbereichen

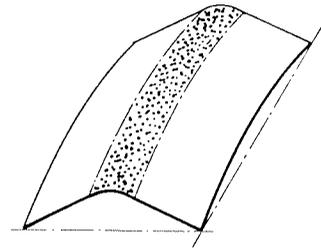


Bild 18 b: Streifenweise umgeformtes Blech mit schmalen Randbereichen

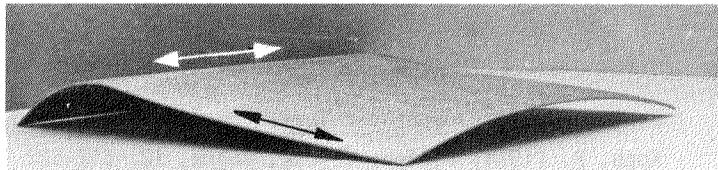


Bild 20: Durch gezielte Strahlführung (←→) zweifach gekrümmte Schale

Mit den beim Einzelstoß einer Kugel gefundenen Beziehungen, Gleichungen (8) und (6), der Beziehung $d = h\sqrt{2}$ (Kopp,1974) und dem Kugleindringweg Δh läßt sich der Krümmungsradius R_1 für den Bereich eines Kugelabdruckes berechnen. Bei einer Anzahl von n Kugelabdrücken ergibt sich dann ein mittlerer Krümmungsradius von

$$R_m = \frac{1}{A_{\text{ges}}} \sum_{i=1}^n R_i A_i \quad (25)$$

Dies ist eine Möglichkeit, den Krümmungsradius für einfache Bauteile voranzubestimmen. Für komplizierte Bauteile kann die Endform bisher nur empirisch abgeschätzt werden. In Bild 21 sind einige Beispiele, einfache und komplizierte, durch Kugelstrahl-Umformen herstellbare Strukturen aufgezeigt, womit die vielseitige Anwendbarkeit dieses Umformverfahrens deutlich wird.

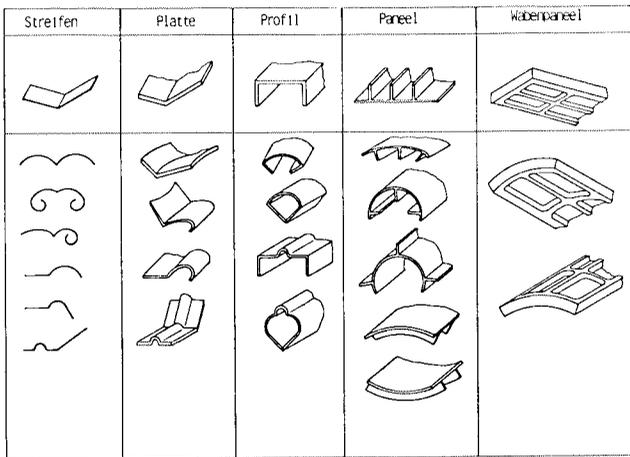


Bild 21: Auszug aus einer Formenordnung von durch Kugelstrahl-Umformen herstellbaren Produkten

LITERATUR

- Lange, K. (1972) Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 29-33
 Kopp, R. (1974) Bänder, Bleche, Rohre, 12 512-522
 Plaul, H.U. (1965) Dissertation, RWTH Aachen
 Lee, C.H., S. Masaki and S. Kobayashi (1972) Int. J. mech. Sci 417-426
 Johnson, W., R. Sowerby and J.B. Haddow Edward Arnold (Publ.) LTD 57-60
 Prandtl, L. (1923) Z. angew. Math. Mech., Bd. 3 401-406