

# ERMITTLUNG VON EINFLUSSGRÖSSEN BEIM KUGELSTRAHLEN DURCH EINZELKORNVERSUCHE

R. Clausen

*Universität Hamburg, Hamburg, Bundesrepublik Deutschland*

## ABSTRACT

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden einzelne Stahlkugeln mit definierten Bedingungen auf die Oberflächen von Werkstoffproben geschossen. Durch Ausmessen der Kugeleindrücke wurden die Wirkungen der Einstellparameter erfaßt und Aussagen für den realen Kugelstrahlprozeß abgeleitet. Die Tiefe der Kugeleindrücke ist mit der Rauhtiefe gestrahlter Oberflächen gleichzusetzen. Im einzelnen erfolgte eine Veränderung der Parameter Geschwindigkeit, Durchmesser, Härte und Auftreffwinkel der Kugel. Auch wurden die Werkstoffe und Werkstoffhärten variiert. Die Versuche wurden mit einer speziellen Versuchseinrichtung durchgeführt.

## KEYWORDS

Kugelstrahlen, Einflußgrößen, Kugeleindrücke einzelner Stahlkugeln, Versuchseinrichtung, Rauhtiefe.

## EINLEITUNG

In den vergangenen Jahren wurden in der Universität Hamburg, Fachgebiet Fertigungstechnik, systematische Untersuchungen zur Ermittlung der Einflußgrößen beim Kugelstrahlen mit dem Ziel durchgeführt, im Rahmen einer Modellbetrachtung genauere Erkenntnisse über das Zusammenwirken einzelner Einflußparameter zu ermitteln [1,2,3,4]. Im Gegensatz zum realen Kugelstrahlprozeß wurden einzelne Stahlkugeln mit definierten Einstellbedingungen auf die Oberflächen von Werkstoffproben geschossen. Im einzelnen erfolgte eine Veränderung der Parameter

Kugelgeschwindigkeit,  
Kugeldurchmesser,  
Kugelhärte,  
Werkstoffhärte  
Auftrittswinkel der Kugel.

Durch Ausmessen der Tiefe und des Durchmessers der Kugleindrücke konnten die Wirkungen dieser Einflußgrößen erfaßt und Bedeutungen für den Kugelstrahlprozeß beschrieben werden. So kann beispielsweise bei Flächenbedeckungen bis etwa 100% die Tiefe der erzeugten Kugleindrücke mit der Rauhtiefe gestrahlter Oberflächen gleichgesetzt werden, da sie weitgehend der größten Eindrucktiefe eines Strahlmittelkornes entspricht und mit großer Sicherheit innerhalb einer Meßstrecke ein von benachbarten Eindrücken unbeeinflußter oder nur wenig beschädigter Korneindruck liegt wird. Im vorliegenden Beitrag soll über ausgewählte Ergebnisse bezüglich der Eindrucktiefe berichtet werden.

### VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Zur Durchführung der Versuche wurde eine Versuchseinrichtung entwickelt, mit deren Hilfe Kugeln unterschiedlicher Durchmesser durch Druckluft auf definierte Geschwindigkeiten zu beschleunigen sind. In Bild 1 ist die Seitenansicht der ausgeführten Anlage dargestellt. In einem Grundrahmen hoher Steifigkeit liegt auf der rechten Seite die Kugel-Beschleunigungseinrichtung und auf der linken Seite die Werkstück-Spanneinrichtung, die aus einem Kreuztisch (Verstellgenauigkeit 0,01 mm) und zur Veränderung des Kugel-Auftreffwinkels aus einer winkelverstellbaren Aufnahmeplatte besteht.

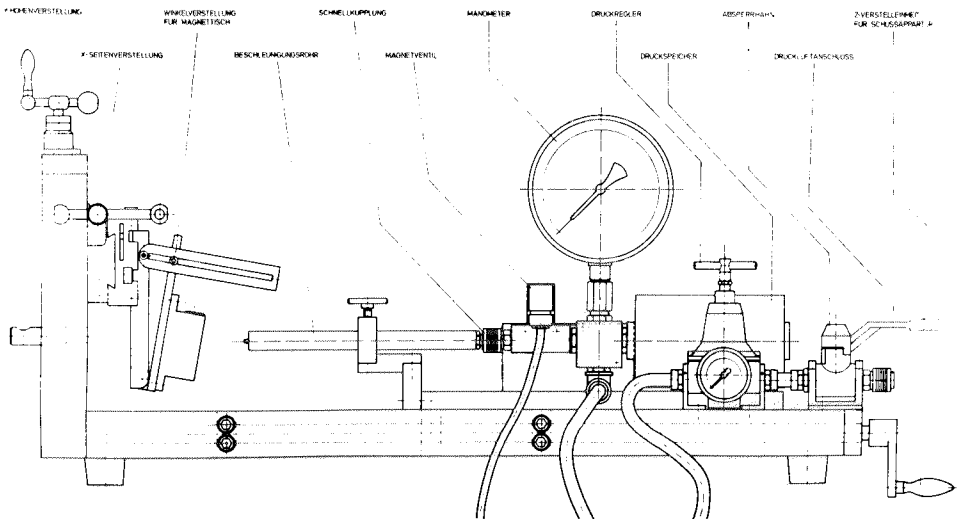


Bild 1. Versuchseinrichtung zur Beschleunigung der Kugeln.

Die Kugel-Beschleunigungseinrichtung ist zur Festlegung bestimmter Flugwege über eine Gewindespindel auf Rundführungen längs verfahrbar. Die Einrichtung besteht im einzelnen aus einem Druckluftspeicher mit Feinmeßmanometer (Klasse 0,6%,  $p_{max}=25$  bar), dem Magnetventil auf der Ausgangsseite, dem Druckregler zur Druckeinstellung und den über Schnellkupplungen auswechselbaren Beschleunigungsrohren für unterschiedliche Kugeldurchmesser. Diese Rohre bestehen aus äußeren Trag- und inneren Druckrohren aus CrNi-Stahl, die speziell für die verwendeten Kugeldurchmesser angefertigt wurden. Der Beschleunigungsvorgang wird nach Einlegen einer Kugel in das entsprechende Beschleu-

nigungsrohr durch Einschalten des Magnetventiles ausgelöst. Die Kugelgeschwindigkeit kann durch Veränderung des Luftdruckes variiert werden. Die erforderliche Kalibrierung erfolgte über Geschwindigkeitsmessungen durch Ermittlung der Flugzeit mit Hilfe von Impulsgebern am Anfang und Ende der Flugbahn. Zur Anwendung kamen eine Funkenstrecke am Ausgang der Beschleunigungsrohre und ein Quarzkristallaufnehmer beim Aufprall der Kugel.

Zum Ausmessen der Tiefe der Kugeleindrücke (Verformungstiefe) wurde eine besondere Meßeinrichtung zusammengestellt. Das Gerät besteht im einzelnen aus einem Kreuztisch mit Mikrometerschrauben-Verstellung, zwei induktiven Wegaufnehmern und einem X-Y-Schreiber. Nach dem Ausrichten der Probe wird durch Verstellen der mit dem X-Aufnehmer fluchtenden Mikrometer-Schraube der Meßschrieb erzeugt. Die Tastschuppe aus Hartmetall hat einen Spitzenradius von  $R = 100 \mu\text{m}$  ( $R = 200 \mu\text{m}$  bei Al 99.5). Die Auflagekraft betrug  $F = 0,35 \text{ N}$ . Die Kalibrierung erfolgte mit Hilfe von Endmaßen. Bild 2 veranschaulicht zur Darstellung der hohen Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse verschiedene Kugeleindrücke bei gleichen Versuchsbedingungen. Deutlich ist die äußerst geringe Streuung der Verformungen erkennbar. Als Verformungstiefe wurde die Meßdifferenz zwischen Eindruckgrund und Höhe des Eindruckrandes festgelegt. Der Durchmesser der Kugeleindrücke (Verformungsdurchmesser) wurde mit Hilfe eines Meßmikroskopes ermittelt.

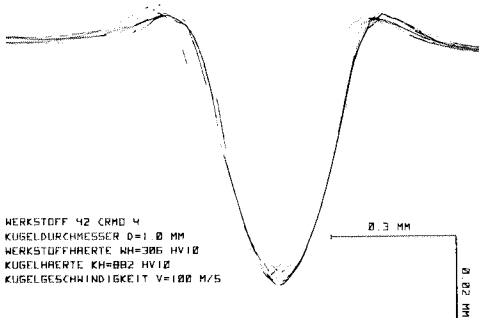


Bild 2. Aufzeichnungen über Kugeleindrücke bei konstanten Versuchsbedingungen.

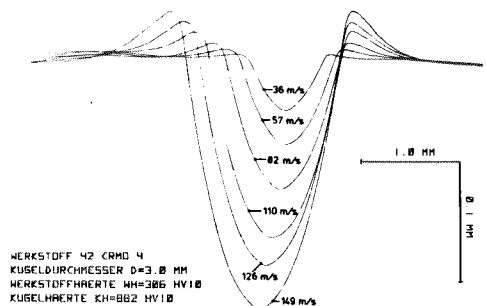


Bild 3. Kugeleindrücke (Verformungstiefe) bei verschiedenen Kugelgeschwindigkeiten.

Als Kugeln wurden Wälzlagerkugeln (max. Maßabweichung  $2 \mu\text{m}$ ) aus Wälzlagerstahl 100 Cr 6 verwendet. Die ausgewählten Kugeldurchmesser von  $D = 0,4$  bis  $3,0 \text{ mm}$  sind vergleichbar mit den nach DIN 8201 genormten Korngrößen. Unterschiedliche Kugelhärten von 409 bis 882 HV 10 (41 bis 65 HRC) wurden durch eine Wärmebehandlung der Kugeln erreicht. Die größte Härte entspricht der Härte des Anlieferungszustandes. Die Untersuchungen wurden an vier Werkstoffen aus unterschiedlichen Werkstoffgruppen durchgeführt; dem Vergütungsstahl 42 CrMo 4 in fünf Vergütungszuständen mit Werkstoffhärten von 296 (normalisiert) bis 612 HV 10, der Titanlegierung TiAl 6 V4 (326 HV 10), Reinnickel Ni 99,7 (94 HV 10) und Reinaluminium Al 99,5 (28 HV 10). Die Variationsbreite der gewählten Einfluß-

größen überdeckt den in der Praxis üblichen Bereich der Einstellbedingungen. Bei der graphischen Darstellung der Versuchsergebnisse wurden Mittelwerte von mindestens vier Versuchen mit gleichen Daten verwendet.

### VERSUCHSERGEBNISSE

In den Bildern 3 bis 8 ist die Tiefe der erzeugten Kugeleindrücke (Verformungstiefe) in unterschiedlichen Abhängigkeiten für einen senkrechten Aufprall der Kugeln ( $\alpha = 90^\circ$ ) dargestellt. Die Verformungstiefe entspricht der Rauhtiefe gestrahlter Oberflächen, wie einleitend berichtet wurde. Bild 3 zeigt als Beispiel Meßschiebe über Kugeleindrücke am Werkstoff 42 CrMo 4 bei verschiedenen Kugelgeschwindigkeiten und dem Kugeldurchmesser  $D = 3,0$  mm.

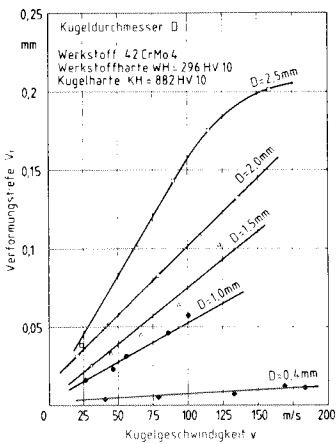


Bild 4.

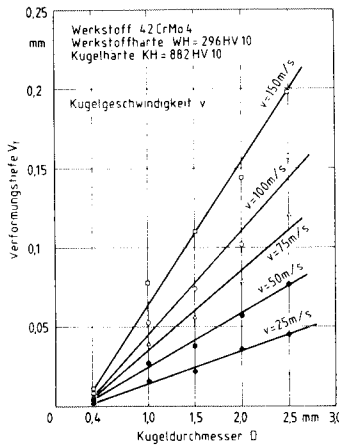


Bild 5.

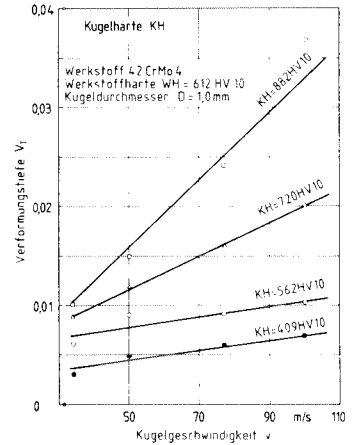


Bild 6.

Verformungstiefe in Abhängigkeit von Kugelgeschwindigkeit (Bild 4) Kugeldurchmesser (Bild 5) und Kugelhärte (Bild 6).

Die Zunahme der Verformungstiefe  $V_T$  mit steigender Kugelgeschwindigkeit ist für unterschiedliche Kugeldurchmesser dem Bild 4 zu entnehmen. Das Diagramm bezieht sich auf den normalisierten Vergütungsstahl 42 CrMo 4 und wurde mit größter Kugelhärte erzielt. Die Verformungstiefe steigt mit zunehmender Kugelgeschwindigkeit etwa linear an, wobei größere Kugeln einen stärkeren Anstieg bewirken. Nur bei größtem Kugeldurchmesser  $D = 2,5$  mm zeigt sich bei hohen Kugelgeschwindigkeiten ein degressives Verhalten, das auf zunehmende Verfestigung des Werkstoffes infolge höherer Umformgrade zurückzuführen ist. Durch Umzeichnung des Bildes wird deutlich, daß bei konstanter Kugelgeschwindigkeit eine Steigerung des Kugeldurchmessers ebenfalls zu einem linearen Anstieg der Verformungstiefe führt. Dieser Zusammenhang ist aus Bild 5 ersichtlich. Eine Veränderung der Kugelhärte ergibt keine Änderung der linearen Abhängigkeit

zwischen Verformungstiefe und Kugelgeschwindigkeit. Das in Bild 6 dargestellte ausgewählte Diagramm bezieht sich auf den Kugeldurchmesser  $D = 1,0$  mm und auf den gehärteten Vergütungsstahl 42 CrMo 4. Ferner wird aufgezeigt, daß Kugeln mit höherer Härte größere Verformungstiefen erzielen. Die Wirkungen sind jedoch sehr unterschiedlich und insbesondere abhängig von der Härte­differenz zwischen Kugel- und Werkstoffhärte, wie es deutlich in Bild 7 veranschaulicht wird. Bei geringer Härte­differenz haben Änderungen der Kugel­härte große Wirkungen, während bei hoher Härte­differenz nur geringe Beeinflussungen möglich sind. Mit steigender Kugel­härte nähert sich die Verformungstiefe asymptotisch einem Grenzwert, der bei grober Betrachtung erreicht wird, sobald die Kugel­härte etwa 100% über der Werkstoffhärte liegt. So konnte dann auch an Proben aus Al 99,5 (28 HV 10) und Ni 99,7 (94 HV 10) ein Einfluß der Kugel­härte auf die Verformungstiefe nicht ermittelt werden.

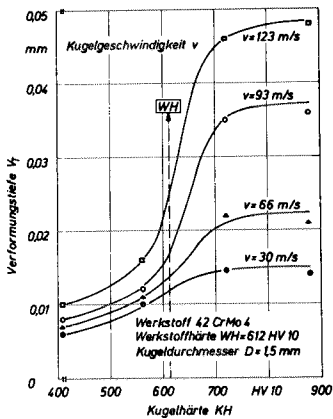


Bild 7.

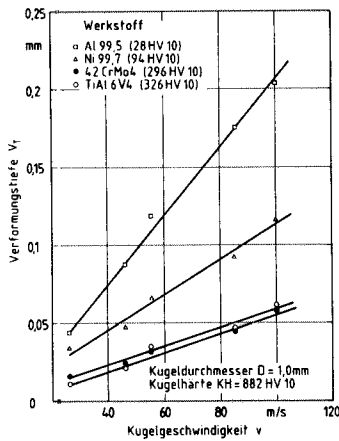


Bild 8.

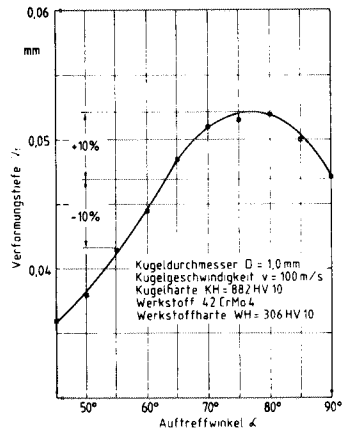


Bild 9.

Verformungstiefe in Abhängigkeit von Kugel­härte ober- und unterhalb der Werkstoffhärte (Bild 7) Kugel­geschwindigkeit für unterschiedliche Werkstoffe (Bild 8) und Auftreffwinkel der Kugel (Bild 9).

Untersuchungen an anderen Werkstoffen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften ergaben, daß die am Vergütungsstahl 42 CrMo 4 gewonnenen Ergebnisse auch auf andere Werkstoffe übertragbar sind. So wird beispielsweise in Bild 8 für Kugeln mit größter Härte und  $D = 1$  mm Durchmesser eine Gegenüberstellung der an weiteren Werkstoffen (normalisiert) erzielten Verformungstiefen gezeigt. Bei weitgehend linearem Anstieg der Verformungstiefen ist jedoch die Wirkung bei den einzelnen Werkstoffen deutlich unterschiedlich. So ist bei dem Werkstoff Al 99,5 mit der kleinsten Werkstoffhärte und geringer Verfestigungsneigung die größte Zunahme ersichtlich, während bei den Legierungen mit sehr viel höherer Härte (TiAl 6 V 4 und 42 CrMo 4) die geringsten Steigerungen erkennbar sind.

Für den realen Kugelstrahlprozeß läßt sich aus den Ergebnissen der Bilder 4 bis 8 zunächst einmal folgende Aussage ableiten. Eine Ku-

gelstrahlbehandlung bewirkt neben der Veränderung der Oberflächencharakteristik eine Änderung der Oberflächenrauheit. So wird die Rauhtiefe linear mit der Strahlmittelgeschwindigkeit und auch linear mit dem Korndurchmesser ansteigen ( $R_t \sim V_T \sim v \cdot D$ ), wobei die Größe der Zunahme sowohl von der Kugelhärte als auch von der Werkstoffhärte bestimmt wird.

Darüber hinaus lassen sich weitergehende Aussagen für den Kugelstrahlprozeß herleiten, da die Größe des Kugeleindruckes ein Maß für die maximal erreichbare Umformung je Strahlmittelkorn darstellt und somit auch die Intensität der Strahlung beeinflusst. Werden beim Kugelstrahlen kleine Korngrößen (z.B.  $D = 0,4$  mm) verwendet, so wird zur Anhebung der Strahlintensität der Einsatz größerer Korndurchmesser erheblich wirksamer sein als die Erhöhung der Strahlmittelgeschwindigkeit. Je größer aber das Korn, desto größer wird die Abhängigkeit von der jeweiligen Strahlmittelgeschwindigkeit, so daß ausgehend von einer bestimmten vorgegebenen Strahlintensität oder Oberflächen-Rauhtiefe auch die Erhöhung der Strahlmittelgeschwindigkeit die geeignete Maßnahme zur Erhöhung der Strahlintensität sein kann. Bezüglich eines möglichst geringen Luftverbrauches bei Druckluftanlagen ist jedoch die Verwendung größerer Körner mit kleinerer Geschwindigkeit anzustreben.

Aus den Ergebnissen kann für den Kugelstrahlprozeß ebenfalls entnommen werden, daß insbesondere beim Strahlen mit höheren Geschwindigkeiten oder größeren Korndurchmessern möglichst geringe Geschwindigkeitsunterschiede und Korngrößendifferenzen vorliegen sollten, um durch möglichst gleiche Verformungstiefen geringe Unterschiede in der Rauheit der Oberflächen zu erzielen. Diese gleichmäßigere Bestrahlung wird letztlich auch zu einer besseren Ausbildung des Eigenspannungsfeldes in der Randzone der Werkstücke und zur Verbesserung der Bauteileigenschaften führen. Aus gleichen Gründen sollte die Strahlmittelhärte wesentlich über der Werkstoffhärte liegen, damit die Kugel als starr gegenüber dem Bauteilwerkstoff angesehen und ein Einfluß der Kugelhärte ausgeschlossen werden kann.

In Bild 9 sind für den Werkstoff 42 CrMo 4 Ergebnisse über Untersuchungen bei Veränderung des Auftreffwinkels  $\alpha$  der Kugeln wiedergegeben. Die Verformungstiefe steigt etwa linear auf einen Maximalwert bei etwa  $\alpha = 80^\circ$  an, um anschließend auf einen etwa 10% kleineren Wert bei senkrechtem Aufprall der Kugeln ( $\alpha = 90^\circ$ ) abzufallen. Dieser Wert ist etwa gleichzustellen mit der Verformungstiefe bei dem Auftreffwinkel  $\alpha = 65^\circ$ . Untersuchungen an der Titanlegierung TiAl 6 V4 ergaben ebenfalls ein um etwa 10% höher liegendes Maximum, jedoch abweichend beim Auftreffwinkel  $\alpha = 85^\circ$ . Die unterschiedlichen Werte deuten auf eine Werkstoffabhängigkeit hin. Unterstützt wird diese Aussage durch bereits veröffentlichte Werte von  $\alpha = 75^\circ$  und  $70^\circ$  [Dirhan, Saverin]. Durch weitere Untersuchungen am Werkstoff 42 CrMo 4 (306 HV 10) wurde ermittelt, daß die Höhe des Maximums mit sinkender Kugelgeschwindigkeit abnimmt. Bei  $v=34$  m/s wurden keine erhöhten Verformungstiefen mehr festgestellt. Als Ursache für die größeren Verformungstiefen bei Auftreffwinkeln zwischen  $\alpha = 70^\circ$  bis  $85^\circ$  kann das unterschiedliche Verhalten der Komponenten der Stoßkraft tangential und normal zur Werkstückoberfläche angeführt werden [3,4].

Die Aussagen über den Einfluß des Auftreffwinkels lassen für den Kugelstrahlprozeß - unabhängig von der Frage, ob die geringe Schräg-

stellung der Strahlachse auch einen positiven Einfluß auf die Induzierung von Druckeigenspannungen haben wird - erkennen, daß zunächst einmal mit größeren Rauhtiefen gerechnet werden muß. Mit den in Bild 9 angegebenen Bedingungen ergibt sich ein Schrägstellbereich von über  $25^\circ$  mit maximal 10% erhöhter Rauhtiefe. Läßt man diesen Wert für eine kugelgestrahlte Oberfläche zu, bedeutet es auch, daß entsprechend gewölbte Werkstücke unter Beibehaltung der Lage der Strahlachse gestrahlt werden können. Die Grenze läßt sich auf den Auftreffwinkel  $\alpha = 55^\circ$  verschieben, wenn gegenüber der senkrechten Bestrahlung beispielsweise auch 10% kleinere Verformungstiefen zugelassen werden.

### ZUSAMMENFASSUNG

Zur Ermittlung genauerer Erkenntnisse über das Zusammenwirken einzelner Einflußgrößen beim Kugelstrahlen wurden unterschiedliche Werkstoffproben mit einzelnen Stahlkugeln verschiedener Härte beschossen. Durch Ausmessen der Tiefe und des Durchmessers der Kugeleindrücke konnten die Wirkungen der Einflußgrößen Kugelgeschwindigkeit, Kugeldurchmesser, Kugel- und Werkstoffhärte sowie Auftreffwinkel der Kugeln erfaßt werden. Die Tiefe der Kugeleindrücke steigt sowohl mit wachsender Kugelgeschwindigkeit als auch mit zunehmendem Kugeldurchmesser näherungsweise linear an. Hohe Wirkungen werden mit großen Kugeln und großen Geschwindigkeiten erzielt. Mit zunehmender Kugelhärte steigt die Kugeleindrucktiefe asymptotisch auf einen Grenzwert, so daß bei größeren Härtedifferenzen zwischen Kugel und Werkstoff ein Einfluß der Kugelhärte nicht mehr vorhanden ist.

Allgemein kann ausgesagt werden, daß bei kleinen Kugelgeschwindigkeiten und kleinen Kugeldurchmessern die Kugeleindrucktiefe nur unwesentlich durch andere Parameter beeinflusst wird. Untersuchungen mit unterschiedlichen Auftreffwinkeln ergaben maximale Kugeleindrucktiefen bei etwa  $80^\circ$ . Anhand der Ergebnisse lassen sich Aussagen für den realen Kugelstrahlprozeß ableiten. Das gilt insbesondere für die Rauheit kugelgestrahlter Oberflächen, da zwischen der Rauhtiefe und der Kugeleindrucktiefe ein direkter Zusammenhang besteht. Auch können Aussagen über die Veränderung der Strahlintensität abgeleitet werden. Durch eine analytische Betrachtung und Überprüfung mit den experimentell ermittelten Werten wurde eine Gleichung zur Berechnung der Kugeleindrucktiefe aufgestellt.

### LITERATUR

- Clausen, R. und Martin, P. (1979). Entwicklungsstand der Technologie des Kugelstrahlens. ZwF, 74, 154-156 und 222-225.
- Clausen, R. und Martin, P. (1979). Änderungen der Randzone kugelgestrahlter Proben. ZwF, 74, 334-340.
- Martin, P. (1980). Beitrag zur Ermittlung der Einflußgrößen beim Kugelstrahlen durch Einzelkornversuche. Dr.-Ing. Dissertation, Hamburg.
- Clausen, R. (1981). Untersuchungen zur Erfassung von Einflußgrößen beim Kugelstrahlen. ZwF, 76, 128-131.