

# Die Ausbildung von Eigenspannungen an Torsionsproben beim Spannungsstrahlen

E. Müller

## 1 Einleitung

Kugelstrahlen wird heute unter anderem angewendet, um gezielt Druckeigenspannungen in die Oberfläche eines Werkstückes zu induzieren und diese zu verfestigen. Je höher die Festigkeit, desto mehr tritt eine zusätzliche Verfestigung des Materials in den Hintergrund. Beide Effekte tragen zu einer Lebensdauersteigerung unter dynamischer Beanspruchung bei. So wird das Kugelstrahlen standardmäßig bei Federelementen angewendet, die als Tragfedern für Kraftfahrzeuge eingesetzt werden. Eine Steigerung zum normalen Kugelstrahlen ist das sogenannte Spannungsstrahlen. Hier wird das Federelement in der späteren Belastungsrichtung vorgespannt, dann gestrahlt und wieder entlastet. Dadurch bauen sich zusätzliche Druckeigenspannungen auf, die die Lebensdauer weiter steigern.

Diese Form des Spannungsstrahlens hält verstärkt Einzug beim Strahlen von Federelementen [1, 2, 3, 4, 5, 6]]. Insbesondere ist die Ausbildung der Eigenspannung über die Tiefe von Interesse, da sie die Schwingfestigkeit erhöht, wie es auch das Modell der lokalen Dauerfestigkeit beschreibt [7]. Die ersten Ergebnisse zur Ausbildung der Eigenspannungen beim Spannungsstrahlen gegenüber normalem Kugelstrahlen liegen in [3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12] vor. In dieser Publikation soll über eine systematische Untersuchung der Ausbildung von Eigenspannungen durch Spannungsstrahlen an Torsionsproben berichtet werden.

## 2 Vorüberlegung und Definitionen

Unter Strahlen (im technischen Sinne) versteht man die Wechselwirkung eines hinreichend harten Strahlmittels mit der Oberfläche eines Werkstückes. Sind beim Strahlen die Partikel des Strahlmittels gerundet, so spricht man von Kugelstrahlen [5]. Dabei wird die Oberfläche verfestigt, und es treten Druckeigenspannungen in den oberflächennahen Schichten (0,0 mm–0,5 mm Tiefe) auf. Um die Effekte des Kugelstrahlens noch besser ausnutzen zu können, verwendet man das sogenannte Spannungsstrahlen. Hier wird das Werkstück in der späteren dynamischen Belastungsrichtung vorgespannt, dann gestrahlt und wieder entlastet. Dadurch ist eine Verbesserung des Druckeigenspannungsniveaus zu erreichen. Diese Maßnahme ist bei solchen Werkstücken sinnvoll, die (vornehmlich) im Schwellbereich belastet werden.

Beim Spannungsstrahlen hängt die Ausbildung der Druckeigenspannung stark von der (Torsions-) Vorspannung ( $\tau_{KS}$ )  $\sigma_{KS}$  während des Kugelstrahlens ab. Hier ist sowohl ein Einfluß auf die Höhe (Maximum) der Druckeigenspannung sowie auch auf die Ausprägung in der Tiefe vorhanden. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Festigkeit des Werkstückes. Je härter ein Werkstück ist, desto höher kann das Maximum der Druck-

eigenspannung liegen, aber desto geringer ist die Tiefenwirkung [6].

## 3 Theoretische Überlegungen

Um eine Beziehung zwischen Vorspannung  $\tau_{KS}$  und der Höhe der Eigenspannung nach dem Entlasten der vorgespannten Probe zu bekommen, wird mit folgenden Annahmen ein Zusammenhang hergestellt:

- ideal elastisch-plastisches Werkstoffverhalten
- Momentengleichgewicht zwischen Randschicht und Kern
- ein idealisierter Spannungsverlauf in Form eines Rechteckprofils für die durch Kugelstrahlen induzierte Eigenspannung  $\sigma_{EK}$ ,

Weiter wird angenommen, daß die Eigenspannung  $\sigma_{EK}$  unabhängig von der Vorspannung  $\tau_{KS}$  eingebracht werden kann. Dieses wird auch durch experimentelle Ergebnisse [3, 4] gestützt. Idealisiert auf die Querschnittsfläche, ergibt sich Abb. 1.

Durch das Entlasten ergeben sich folgende Veränderungen (Abb. 2).

Durch Ausgleich der Momente über den Drahtquerschnitt ergibt sich:

$$\sigma_R = \sigma_{EK} - \sigma_{KS} * (x_0/r)^3$$

mit  $\sigma_R$  die Eigenspannung am Rand und  $\Delta\sigma$  die Zunahme der Druckeigenspannung durch Entlastung.

Da die Tiefe der Druckeigenspannung  $\sigma_{EK}$  unabhängig von der Vorspannung  $\tau_{KS}$  ist, ergibt sich in erster Näherung ein linearer Zusammenhang zwischen Vorspannung  $\tau_{KS}$  und zusätzlicher Ausprägung der Eigenspannung. In Abschnitt 6 wird dieses Ergebnis mit experimentellen Ergebnissen verglichen.

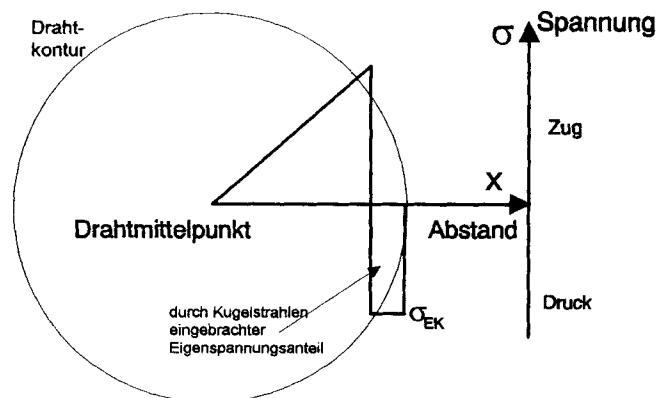


Abb. 1. Idealisierte Spannungsverteilung nach dem Kugelstrahlen unter Last

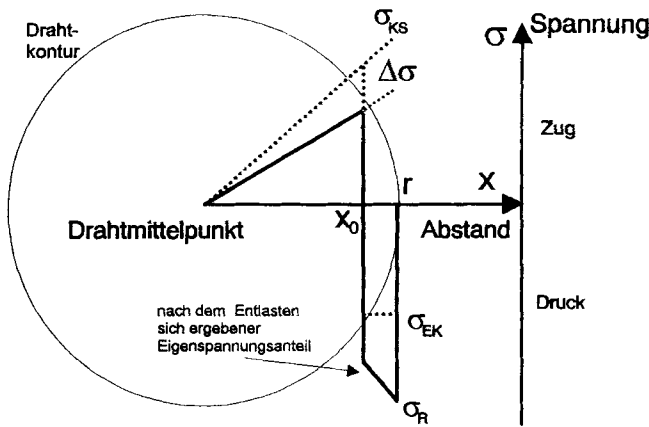


Abb. 2. Spannungsverteilung nach dem Entlasten

## 4 Probenaufbau

Als Torsionsproben, bestehend aus 55 Cr 3, wurden Proben von den Abmessungen gewählt, wie in Abb. 3 gezeigt. Sie wurden auf ca. 880 °C unter Schutzgas erhitzt, um keine Oberflächenentkohlung zu haben. Anschließend wurden sie im Öl abgeschreckt, um martensitisches Gefüge zu erhalten. Nach der Aufteilung wurden die einzelnen Chargen auf vier Festigkeiten ( $R_m = 1550; 1700; 1850; 2000 \text{ N/mm}^2$ ) vergütet.

Die Proben wurden kugelgestrahlt, wobei ein Überdeckungsgrad von 98 % erreicht wurde. Als Strahlmittel wurde arrondiertes Drahtkorn mit einem nominalen Durchmesser von 0,6 mm eingesetzt. Die Strahlapparatur bestand aus

zwei gegenläufigen Schleuderrädern mit einer Abwurfgeschwindigkeit  $v$  des Korns von  $v = 80 \text{ m/s}$ . Die Almenteststreifen  $A_2$  ergaben eine durchschnittliche Bogenhöhe  $h = 0,39 \text{ mm}$ . Um die Proben spannungsstrahlen zu können, wurde eigens ein Gestell entwickelt, in welches sie eingespannt werden konnten und anschließend mit dem Gestell auf das Transportband des Kugelstrahlers gelegt werden, ohne daß eine Reduzierung des Überdeckungsgrades auftrat. Nach dem Strahlen wurden die Proben wieder entspannt.

## 5 Durchführung der Röntgenmessung

Für die Messung der Eigenspannungen stand ein Röntgendiffraktometer Strainflex MSF-2M der Firma Rigaku zur Verfügung. Es wurde als  $\Omega$ -Goniometer betrieben. Die Strahlung war Cr-K $\alpha$ -Strahlung, so daß die [h,k,l]-Ebene [2,1,1] zur Eigenspannungsbestimmung genutzt wurde. Der Durchmesser des Meßflecks betrug ca. 7 mm. Um auch ein Tiefenprofil aufnehmen zu können, wurde das Material in Größe des Meßflecks elektrolytisch abgetragen, um keine zusätzlichen Eigenspannungen zu induzieren. Die Messung bzw. Auswertung erfolgte nach der  $\sin^2\psi$ -2 $\Theta$ -Methode [13, 14, 15]. Die  $\psi$ -Winkel waren  $= 0^\circ; 15^\circ; 30^\circ; 45^\circ$ .

Die mittlere Meßgenauigkeit lag bei 7%.

## 6 Ergebnisse und Auswertung

In den Abb. 4 bis 7 sind die Ergebnisse im Überblick dargestellt. Bei den einzelnen Festigkeiten sind die Tiefenprofile

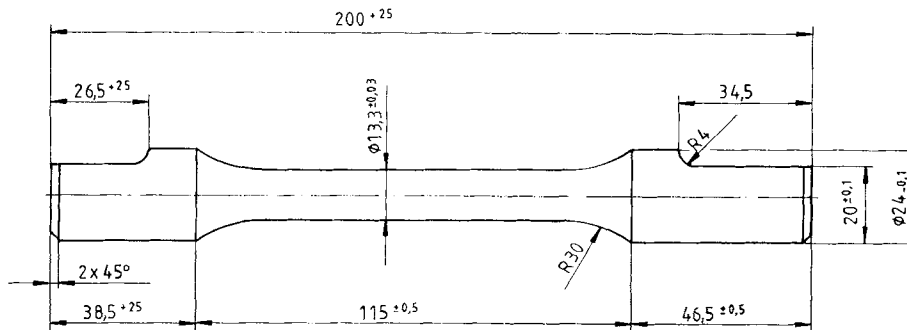


Abb. 3. Probengeometrie

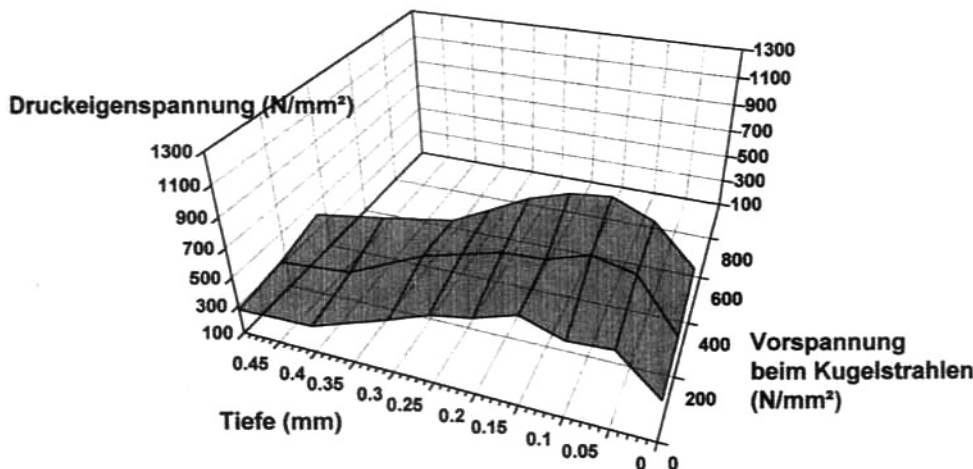
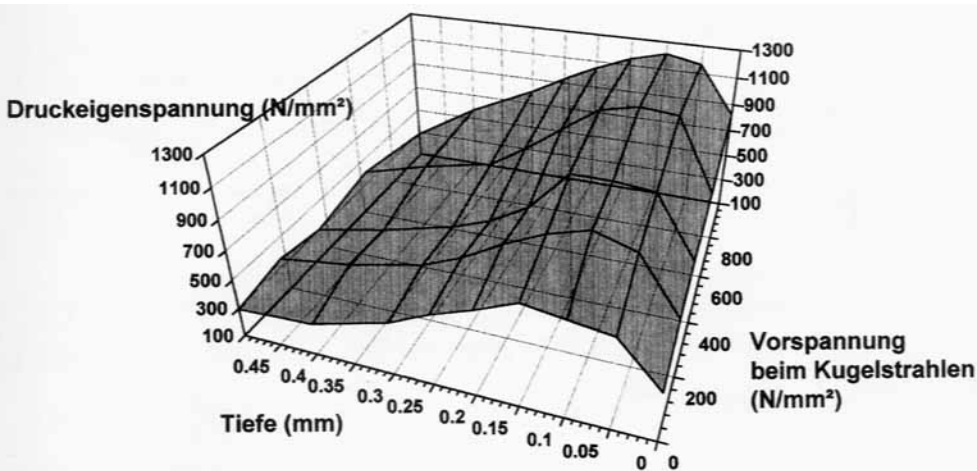
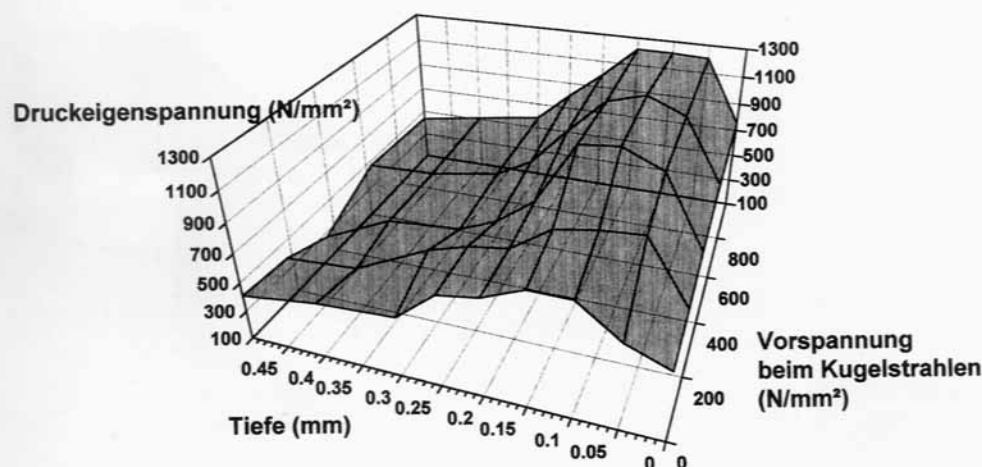


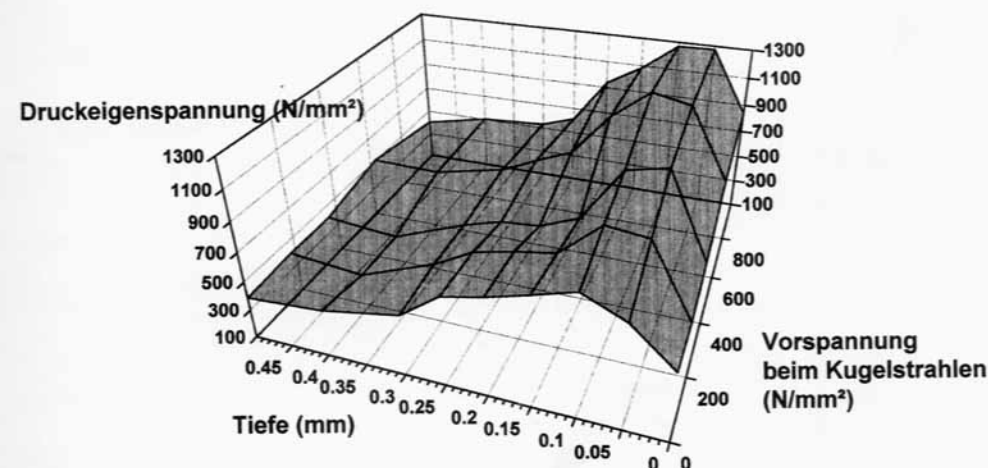
Abb. 4. Druckeigenspannung in Abhängigkeit von der Vorspannung beim Kugelstrahlen und der Tiefe unter der Oberfläche bei einer Werkstofffestigkeit  $R_m = 1550 \text{ N/mm}^2$



**Abb. 5.** Druckeigenspannung in Abhängigkeit von der Vorspannung beim Kugelstrahlen und der Tiefe unter der Oberfläche bei einer Werkstofffestigkeit  $R_m = 1700 \text{ N/mm}^2$



**Abb. 6.** Druckeigenspannung in Abhängigkeit von der Vorspannung beim Kugelstrahlen und der Tiefe unter der Oberfläche bei einer Werkstofffestigkeit  $R_m = 1850 \text{ N/mm}^2$



**Abb. 7.** Druckeigenspannung in Abhängigkeit von der Vorspannung beim Kugelstrahlen und der Tiefe unter der Oberfläche bei einer Werkstofffestigkeit  $R_m = 2000 \text{ N/mm}^2$

im oberflächennahen Bereich der Druckeigenspannung gegenüber der Vorspannung  $\tau_{KS}$  beim Kugelstrahlen aufgetragen. (Da hier Druckeigenspannung dargestellt ist, sind die Werte positiv!) Bei  $R_m = 1550 \text{ N/mm}^2$  wurde aufgrund der geringen Festigkeit nur mit einer Vorspannung  $\tau_{KS}$  von maximal  $360 \text{ N/mm}^2$  gestrahlt. Man sieht deutlich, daß die maximalen Druckeigenspannungen in einem Tiefenbereich um die  $0.1 \text{ mm}$  liegen. Bei einer Tiefe von  $0.5 \text{ mm}$  haben sich die eingebrachten Druckeigenspannungen egalisiert und sind kaum noch von der Vorspannung  $\tau_{KS}$  abhängig. Auch an der Oberfläche nimmt die Druckeigenspannung sowohl in Abhängigkeit von der Festigkeit  $R_m$  wie auch der Vorspannung

$\tau_{KS}$  zu. Dieses ist aus *Abb. 8* deutlich zu entnehmen. Innerhalb der Fehlergrenzen ist ein stetiger Anstieg der Druckeigenspannung bei Zunahme eines oder beider Parameter ( $\tau_{KS}$ ,  $R_m$ ) zu verzeichnen.

In *Abb. 9* sind die Eigenspannungsprofile in Abhängigkeit von der Festigkeit  $R_m$  bei normaler (ohne Vorspannung) Kugelstrahlbehandlung gezeigt. Deutlich ist die Zunahme der Druckeigenspannung von ca.  $600 \text{ N/mm}^2$  bei  $R_m = 1500 \text{ N/mm}^2$  auf über  $800 \text{ N/mm}^2$  bei  $R_m = 2000 \text{ N/mm}^2$  im Maximum zu sehen. Bei  $\tau_{KS} = 1000 \text{ N/mm}^2$  verwischen sich diese deutlichen Unterschiede, wie *Abb. 10* zeigt. Dieses ist auf die Konstanz der Kugelstrahlbehandlung zurückzuführen. Würde

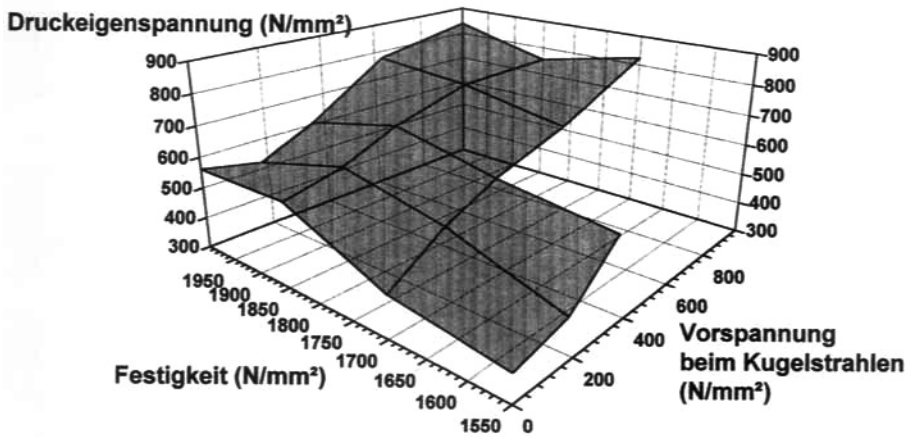


Abb. 8. Druckeigenspannung an der Oberfläche in Abhängigkeit von Festigkeit und Vorspannung beim Kugelstrahlen

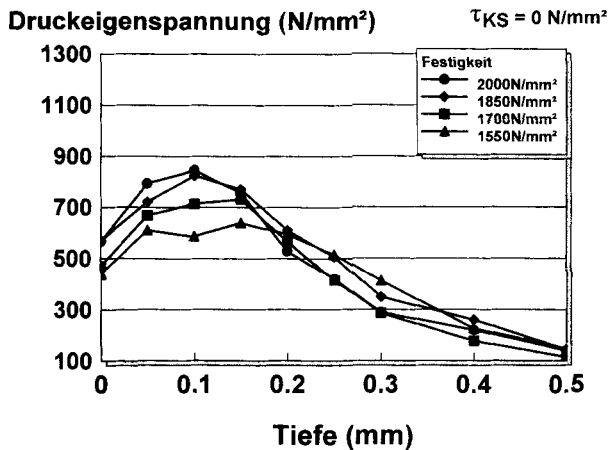


Abb. 9. Druckeigenspannungsverteilungen bei den verschiedenen Festigkeiten beim normalen Kugelstrahlen

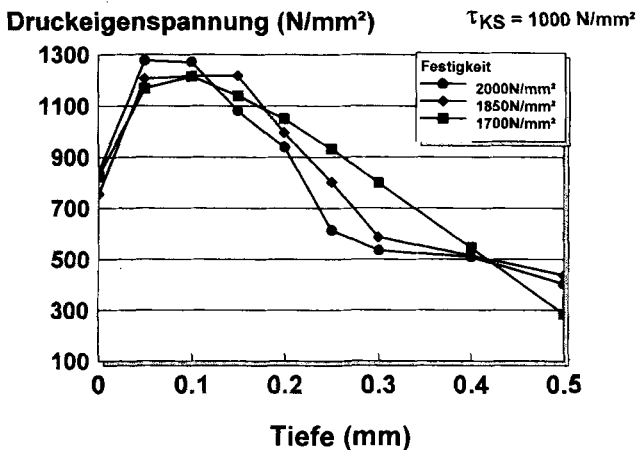


Abb. 10. Druckeigenspannungsverteilungen bei den verschiedenen Festigkeiten nach Spannungsstrahlen bei  $\tau_{KS} = 1000 N/mm^2$

für jede Festigkeit die optimalen Strahlparameter gewählt, wo würde das Druckeigenspannungsmaximum durch die Streckgrenze  $R_p$  bestimmt. Mit zunehmender Festigkeit nimmt die Tiefenwirkung des Kugelstrahlens ab. Dieses wird besonders deutlich, wenn mit hoher Vorspannung  $\tau_{KS}$  gestrahlt wird (siehe Abb. 10).

Hier zeigt sich die höhere Fließgrenze des Werkstoffes bei höherer Zugfestigkeit. Beim gleichen „Durchgriff“ des Korns

(Konstanz der Kugelstrahlbehandlung) ist eine geringere Plastizierung erfolgt. Oder anders ausgedrückt, durch die höhere Plastizierung in den oberen Bereichen ist die übriggebliebene Energie nicht mehr ausreichend, um in den darunterliegenden Schichten den gleichen Plastizierungsgrad bei höheren Festigkeiten zu erreichen. Im Bereich zwischen 0.2 mm–0.4 mm zeigt sich dieser Effekt.

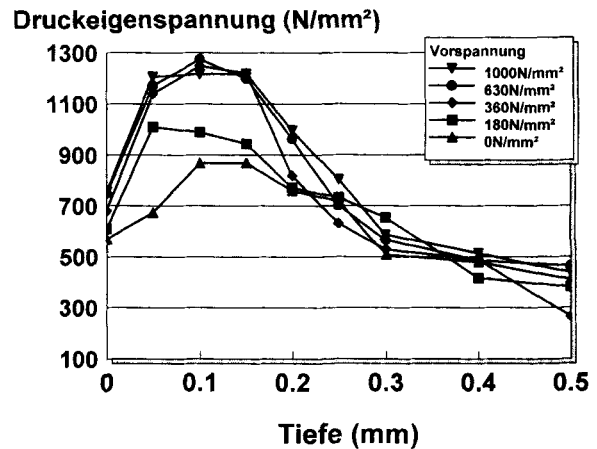


Abb. 11. Druckeigenspannungsverteilungen bei den verschiedenen Vorspannungen  $\tau_{KS}$  und einer Werkstofffestigkeit  $R_m = 1850 N/mm^2$

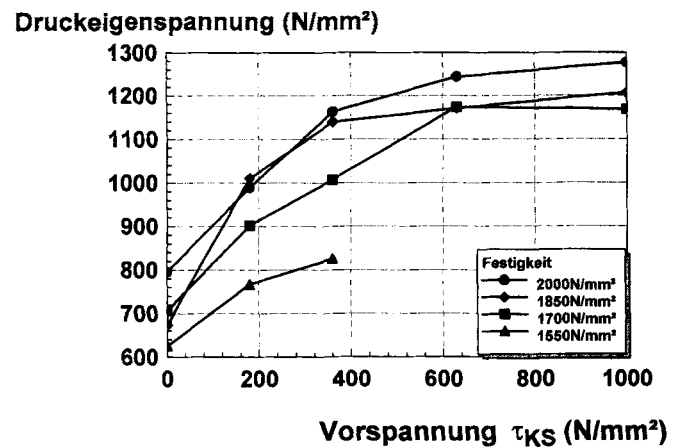


Abb. 12. Höhe der max. Druckeigenspannung in Abhängigkeit von der Vorspannung  $\tau_{KS}$  bei den verschiedenen Werkstofffestigkeiten

Abb. 11 zeigt beispielhaft für  $R_m = 1850 \text{ N/mm}^2$  die Eigenspannungsprofile bei den mit verschiedenen Vorspannungen gestrahlten Proben. Man sieht die stetige Zunahme der Eigenspannung, insbesondere im Bereich um 0.15 mm Tiefe unter der Oberfläche.

Bei den hohen Vorspannungen liegen die Werte sehr dicht. Obwohl die einzelnen Meßwerte mit einem Fehler von 7% belastet sind, ist der Effekt im Mittel eindeutig zu sehen.

Für die Tiefe 0.05 mm ist die Entwicklung der Eigenspannungen in Abhängigkeit von der Vorspannung  $\tau_{KS}$  aufgetragen (Abb. 12). Hier sind keine Oberflächeneffekte mehr vorhanden, und da es nahe der Oberfläche ist, ist der Effekt mit am größten. Die Druckeigenspannung steigt nicht linear mit der Vorspannung  $\tau_{KS}$  an, wie aus Abb. 12 deutlich wird. Dieses wäre nach der Theorie, wie in Kapitel 3 beschrieben, zu erwarten. Das gleiche Verhalten wurde auch bei Zugproben ermittelt [9 + 10], daß mit zunehmender Vorspannung  $\sigma_{KS}$  der Anstieg der Druckeigenspannung deutlich abnimmt.

## 7 Zusammenfassung

Es wurde durch systematische Variation der Festigkeit  $R_m$  und der Vorspannung  $\tau_{KS}$  während des Kugelstrahlens die Eigenspannungsbildung an Torsionsproben gezeigt. Dabei wurden Eigenspannungsprofile bis in Tiefen von 0.5 mm unter der Oberfläche bestimmt.

Die unterschiedliche Ausbildung der Eigenspannung ist im Bereich zwischen 0.05 mm und 0.2 mm Tiefe am deutlichsten. Ab etwa 0.4 mm Tiefe haben sich die Effekte egalisiert. Das Eigenspannungsprofil zeigt den typischen Verlauf, wie bei einer Hertzschen Pressung zu erwarten ist. Mit zunehmender Vorspannung  $\tau_{KS}$  steigt die Druckeigenspannung nicht linear an, obwohl bei weitem die Streckgrenze ( $R_{p0.2} = 0.9 R_m$ ) nicht erreicht wird, und es die Modellrechnung vorgibt. In der Literatur [9 + 10] findet man Hinweise, daß durch plastische Deformation die röntgenologischen Konstanten erniedrigt werden, und somit zu wenig Eigenspannung bei der Standardauswertung errechnet wird.

## Literatur

1. G. Kühnelt, Der Einfluß des Kugelstrahlens auf die Dauerfestigkeit von Blatt- und Parabelfedern. Proceedings of the 1st International Conference on Shot Peening, S. 603 ff., Pergamon Press, Oxford 1982.
2. D. Spigiel, Einfluß des Spannungsstrahlens auf das Dauerschwingverhalten von Parabelfedern. Technischer Bericht 9/83, Luhn & Pulvermacher, Hagen 1983.
3. E. Müller u. L. Bonus, Kugelstrahlen warmgeformter Federn. Konferenzband zur internationalen Konferenz zum Thema Federntechnologie in Düsseldorf 1990, European Spring Federation, Cambridge 1990.
4. E. Müller, Der Einfluß des Plastizierens und des Kugelstrahlens auf die Ausbildung von Eigenspannungen bei Blattfedern. Hoesch Berichte aus Forschung und Entwicklung unserer Gesellschaften, 1/92, S. 23 ff., Dortmund 1992.
5. E. Müller, Spannungsstrahlen von Schraubenfedern. Draht 44 (1993) 1/2, S. 49 ff.
6. E. Müller, Some Aspects of Stress Peening of Coil Springs for Vehicle Suspensions. Proceedings of the 5th International Conference on Shot Peening in Oxford 1993. Coventry University 1993, S. 341 ff.
7. D. H. Wohlfahrt, Einfluß von Mittelspannung und Eigenspannung auf die Dauerfestigkeit. VDI-Berichte 661: Dauerfestigkeit und Zeitfestigkeit, S. 99 ff., VDI-Verlag, Düsseldorf 1988.

8. F. Engelmohr u. B. Fiedler, Festigkeitsstrahlen unter Vorspannung, Auswirkungen auf Eigenspannungszustand und Schwingfestigkeit von Bauteilen. In DVM-Betriebsfestigkeit „Moderne Fertigungstechnologien“, S. 77 ff., DVM, Berlin 1991.
9. R. Zeller, Verbesserung der Ermüdungseigenschaften von Bauteilen aus Stahl durch optimales Kugelstrahlen unter Zugvorspannung. In DVM-Betriebsfestigkeit „Moderne Fertigungstechnologien“, S. 93 ff., DVM, Berlin 1991.
10. R. Zeller, Influence of Stress Peening on Residual Stresses and Fatigue Limit. In Residual Stresses, S. 907 ff., DGM-Verlag, Oberursel 1993.
11. L. Bonus, Auswirkung des Spannungsstrahlens auf die Eigenschaften von hochvergüteten Bremsspeicher- und Torsionsfedern. TH Aachen 1994.
12. F. Engelmohr u. B. Fiedler, Festigkeitsstrahlen unter Vorspannung. Materialprüfung 36 (1994) 10, S. 406 ff.
13. SAE (Hrsg.), Residual Stress, Measurements by X-Ray Diffraction. SAE J 784a, Warrendale 1971.
14. H. D. Tietze, Grundlagen der Eigenspannungen. Springer Verlag, Wien 1982.
15. I. C. Noyan u. J. B. Cohen, Residual Stress. Springer Verlag, New York 1987.

Anschrift: Dr. E. Müller, Kraemer & Freund GmbH & Co./Hoesch Federn GmbH, Wehringhauser Straße 117, 58089 Hagen.

[T 818]