

DER EINFLUSS DES KUGELSTRAHLENS AUF DIE DAUERFESTIGKEIT VON BLATT- UND PARABELFEDERN

G. Kühnelt

*Vereinigte Edelstahlwerke Aktiengesellschaft (VEW) Werk Judenburg
A-8750 Judenburg, Austria*

KURZAUSZUG

Mit diesen Versuchen wird untersucht, in welchem Maß die Beanspruchbarkeit von Federblättern durch verschiedenartige Kugelstrahlbehandlung erhöht werden kann.

STICHWORTE

Parabelfeder; Kugelstrahlen; Kugelstrahlen unter Vorspannung; Kugelstrahlen unter erhöhter Temperatur; Vorsetzen.

EINLEITUNG

Durch Kugelstrahlbehandlung wird die Beanspruchbarkeit von Blattfedern insbesondere von Parabelfedern, erhöht. Das Ausmaß der Erhöhung der Beanspruchbarkeit ist von der Art des Kugelstrahlens abhängig.

Durch Dauerversuche im Biege-Schwellbereich an Prüfständen aus 50CrV4, Querschnitt 100x20, welche in den Federwerksproduktionsanlagen unter den gleichen Bedingungen wie die Serienfertigung vergütet wurden, werden praxisnahe Werte über die Erhöhung der Beanspruchbarkeit von Blattfedern durch Kugelstrahlbehandlung gewonnen.

Als Versuchsergebnis werden die von den Prüfständen ertragenen Lastspiele bei vorgegebenem Beanspruchungsniveau festgehalten. Über die Prüfergebnisse nach folgenden Arten der Kugelstrahlbehandlung wird berichtet:

- Keine Kugelstrahlbehandlung
- Kugelstrahlen ohne zusätzliche Vorkehrungen
- Kugelstrahlen unter Vorspannung
- Kugelstrahlen unter hoher Vorspannung
- Kugelstrahlen unter erhöhter Temperatur.

FESTLEGUNG DER PROBEN

In dem Bestreben, Aufhängungsfedern für Fahrzeuge zur Erzielung einer optimalen Werkstoffausnutzung als Biegeträger gleicher Festigkeit herzustellen, wurde die Parabelfeder als Einblatt- oder Mehrblattfeder entwickelt. Abb.1 zeigt das Prinzip der Parabelfeder. Man sieht, daß sich im Bereich der höchsten Spannungen die Federblätter einer Parabelfeder nicht berühren, so daß in diesem Bereich jede qualitätsverbessernde Oberflächenbehandlung nicht durch Reibwirkung beeinträchtigt

werden kann. So wird auch der Effekt des Kugelstrahlens nicht durch die Relativbewegung der Federblätter zueinander vermindert. Es kann daher der Schwingversuch an einer kompletten Parabelfeder durch einen Schwingversuch an einem mit gleich hohen Spannungen beaufschlagten geraden Stab ersetzt werden, wodurch der Versuchsaufwand erheblich reduziert werden kann.

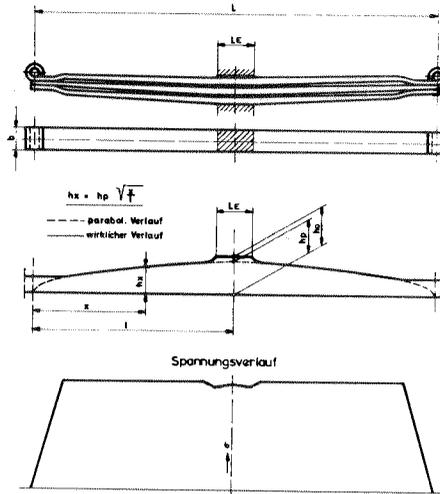


Abb.1 Parabelfeder

Als Probenmaterial wurden Stäbe aus warmgewaltem Federstahl 50CrV4 (DIN 17221) mit einem Querschnitt von 100x20 mm mit kreisrunden Flanken entsprechend Entwurf DIN 59145 und einer Länge von 1400 mm verwendet. Die Proben wurden unter denselben Bedingungen wie die Federblätter der Serienfertigung in den Produktionsanlagen des Federwerkes federhart vergütet. (Zugfestigkeit 1500 bis 1520 N/mm²)

BEHANDLUNGEN ZUR ERHÖHUNG DER BEANSPRUCHBARKEIT

Kugelstrahlen

Das Kugelstrahlen erfolgte auf der federwerkseigenen Kugelstrahlanlage¹⁾. Es handelt sich dabei um eine Schleuderrad-Strahlmaschine mit zwei hintereinander angeordneten Schleuderrädern mit 500 mm Durchmesser und einer Drehzahl von 2600 U/min. Die Proben werden auf einem Fördergurt liegend durch die Strahlkammer bewegt. Der Abstand der zu strahlenden Oberfläche vom Schleuderrad beträgt ca. 450 mm. Als Strahlmittel wurde vergüteter Stahlschrott SAE-Nr. 390²⁾ verwendet. Siebanalyse: 26% > 1,25 mm; 55% > 1,00 mm; 5% > 0,80 mm; 11% > 0,63 mm; 2% > 0,50 mm; 1% Rest. Es wurden Almenintensitäten A2 von ca. 0,60 mm gemessen.

Kugelstrahlbedingungen

Entsprechend dem Ziel der Untersuchungen erfolgte das Kugelstrahlen

- 1) Type: Gutmann BFW8
- 2) Marke: Wheelabrator WSS 390

unter verschiedenen Randbedingungen:

Kugelstrahlen ohne zusätzliche Vorkehrungen. Die Proben wurden lose auf den Fördergurt gelegt und durch die Kugelstrahlanlage gelassen, so daß jene Flachseiten der Proben, auf denen bei Prüfbelastung die Zugspannungen auftreten, dem Kugelstrahlen ausgesetzt waren.

Kugelstrahlen unter Vorspannung. Die Proben wurden mittels Vorrichtung so vorgekrümmt, daß in den, dem Kugelstrahlen ausgesetzten Oberflächen Zugspannungen von 700 N/mm² erzeugt wurden. Die in die Vorrichtung eingespannten Probestücke wurden durch die Kugelstrahlanlage gelassen. Eine Vorspannung von 700 N/mm² entspricht den üblichen Spannungen in Parabelfedern, welche auf Strecklage (die Federblätter sind gerade) belastet sind und ist daher in der Praxis durch das Zusammenspannen von je zwei gleichartigen, Rücken an Rücken liegenden, Federblättern erzeugbar.

Kugelstrahlen unter hoher Vorspannung. Die Proben wurden mittels Vorrichtung so vorgekrümmt, daß in der dem Kugelstrahlen ausgesetzten Oberfläche Zugspannungen von 1450 N/mm² erzeugt wurden. Das sind Spannungen, welche im Bereich der Streckgrenze liegen und stellen somit den Grenzfall des Vorspannens dar.

Kugelstrahlen unter erhöhter Temperatur. Zwei Temperaturniveaus wurden untersucht:

a) 160°C: Die Federblätter wurden im Anlaßofen auf ca. 300°C erwärmt und anschließend an der Luft auf eine Oberflächentemperatur von 160°C abgekühlt und dann durch die Kugelstrahlanlage gelassen. Während des Durchlaufens kühlten die Blätter auf eine Oberflächentemperatur von ca. 120°C ab.

b) 250°C: Die Federblätter wurden im Anlaßofen auf ca. 300°C erwärmt und anschließend an der Luft auf eine Oberflächentemperatur von 250°C abgekühlt und dann durch die Kugelstrahlanlage gelassen. Während des Durchlaufens kühlten die Blätter auf ca. 170°C ab.

Vorsetzen

Das Vorsetzen von Federn besteht in einer ein- bis dreimaligen, über die Streckgrenze hinausgehenden Belastung bis in den plastischen Bereich. Dadurch werden in den Randzonen der Federblätter Eigenspannungen verursacht, welche den späteren Betriebsspannungen der Feder entgegengerichtet sind. Das Vorsetzen wird bei Federn alleine oder nach dem Kugelstrahlen durchgeführt.

Die Proben für die Versuche wurden auf einer Blattfederprüfmaschine einer einmaligen Setzbelastung unterzogen. Die Belastung wurde so gewählt, daß rechnerische Randspannungen von 1750 N/mm² erzeugt wurden.

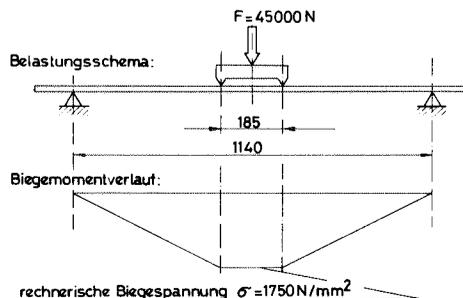


Abb.2 Anordnung beim Vorsetzen

VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Programm

Nachfolgende Behandlungszustände der Probenstücke wurden verglichen.

Einfluß des Kugelstrahlens ohne Vorsetzen:

- Proben vergütet
- Proben vergütet kugelgestrahlt (ohne Zusatzmaßnahmen)
- Proben vergütet unter hoher Vorspannung kugelgestrahlt
- Proben vergütet bei 160°C kugelgestrahlt
- Proben vergütet bei 250°C kugelgestrahlt.

Zusammenwirken von Kugelstrahlen und Vorsetzen:

- Proben vergütet gesetzt
- Proben vergütet gesetzt kugelgestrahlt
- Proben vergütet kugelgestrahlt gesetzt
- Proben vergütet unter Vorspannung kugelgestrahlt gesetzt
- Proben vergütet unter hoher Vorspannung kugelgestrahlt gesetzt.

Anzahl der Prüfstücke. Um die Untersuchungsergebnisse statistisch abzusichern, wurden von jeder Behandlungsart und Laststufe 5 Proben geprüft, um unter der Annahme, daß die Logarithmen der Bruchlastspielzahlen nach Gauß verteilt sind, Überlebenswahrscheinlichkeiten errechnen zu können.

Versuchsbedingungen

Die Untersuchungen wurden im Bereich der Schwellbeanspruchung durchgeführt, entsprechend der Beanspruchung einer Fahrzeugfeder. Die Schwingversuche wurde auf einer für die Versuche hergerichteten Exzenterpresse durchgeführt.

Die Versuchsanordnung ist aus Abb.3 ersichtlich.

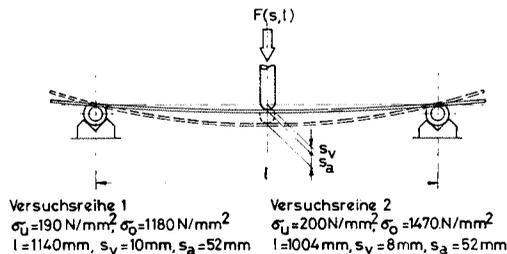


Abb.3 Prüfanordnung für die Schwingversuche

Da der Hub der Exzenterpresse s_a mit 52 mm vorgegeben war, wurden die gewünschten Ober- und Unterspannungen σ_o und σ_u durch Variation des Vorspannweges s_v und der Stützweite l eingestellt.

Aus Zeitgründen und wegen der geringen Prüffrequenz von 33 Lastspielen pro Minute würde die maximale Prüfdauer mit 10^6 Lastspielen festgelegt.

Versuchsreihe 1. Die Biegespannungen von Parabelfedern für Straßenfahrzeuge unter Nennlast (d.i. die statische Belastung der Feder im vollbeladenen Fahrzeug) liegen im allgemeinen um 700 N/mm². Für die erste Versuchsreihe wurden daher 700 N/mm² als Mittelspannung gewählt. Die Unterspannung sollte nicht unter 200 N/mm² betragen, um eine eindeutig definierte Vorlast zu gewährleisten. Daraus ergab sich die Oberspannung mit 1200 N/mm².

Versuchsreihe 2. Da für die unter hoher Vorspannung kugelgestrahlten Proben bei den Beanspruchungen der Versuchsreihe 1 keine Ergebnisse erzielt werden konnten (keine Brüche bis 10^6 Belastungen), mußte eine zweite Versuchsreihe mit höherer Beanspruchung durchgeführt werden.

Die Vorspannung σ_u von 200 N/mm² wurde beibehalten. Die Oberspannung σ_o wurde auf 1470 N/mm² erhöht (siehe Abb.3).

Unter diesen Belastungsverhältnissen wurden die unter Vorspannung kugelgestrahlten Proben geschwungen.

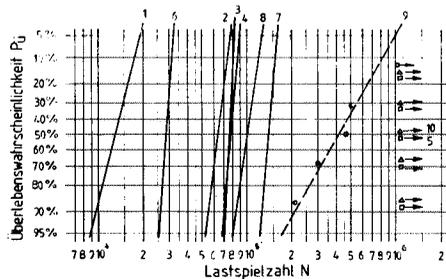
Um einen qualitativen Vergleich durchführen zu können, wurden auch für die Behandlungszustände "vergütet gesetzt" und "vergütet kugelgestrahlt gesetzt" Schwingversuche unter diesen Belastungsverhältnissen durchgeführt.

Nicht vorgesetzte Proben konnten in der Versuchsreihe 2 nicht erprobt werden, da bei der hohen Oberspannung σ_o nach den ersten Belastungen bereits bleibende Verformungen (Setzeffekt) auftraten. Nur bei den unter hoher Vorspannung kugelgestrahlten Proben war auch ein Schwingen nicht vorgesetzter Proben möglich, da auch nach höheren Lastspielzahlen keine bleibenden Verformungen feststellbar waren.

VERSUCHSERGEBNISSE

Ziel der Untersuchungen war es, die nach verschiedenen Kugelstrahlbehandlungen ertragbaren Lastspiele unter den gegebenen Versuchsbedingungen festzustellen.

Die Tabelle 1 zeigt die einzelnen Bruchlastspielzahlen aller Proben der Versuchsreihe 1. Tabelle 2 zeigt die einzelnen Bruchlastspielzahlen aller Proben der Versuchsreihe 2. Neben den ertragenen Lastspielen wurden auch die Verformungen durch das Kugelstrahlen festgehalten. Die Tabellenwerte geben in Millimetern die durch das Kugelstrahlen hervorgerufenen Durchbiegungen auf einen Meter Länge an. Die letzten drei Spalten der Tabellen zeigen die aus den je 5 Proben pro Behandlungszustand errechneten Lastspielzahlen für 90 %, 50 % und 10 % Überlebenswahrscheinlichkeit an.



- 1.. vergütet
- 2.. vergütet kugelgestrahlt
- 3.. vergütet bei 160°C kugelgestrahlt
- 4.. vergütet bei 250°C kugelgestrahlt
- 5.. vergütet unter Vorspannung (14,50 N/mm²) kugelgestrahlt
- 6.. vergütet gesetzt
- 7.. vergütet kugelgestrahlt gesetzt
- 8.. vergütet gesetzt kugelgestrahlt
- 9.. vergütet unter Vorspannung (700 N/mm²) kugelgestrahlt gesetzt
- 10.. vergütet unter Vorspannung (14,50 N/mm²) kugelgestrahlt gesetzt

Abb.4 Statistische Auswertung, Versuchsreihe 1

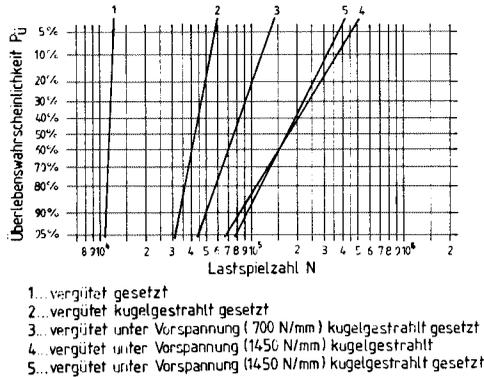


Abb.5 Statistische Auswertung,
Versuchsreihe 2

Zur Veranschaulichung der bei der Untersuchung der einzelnen Behandlungszustände aufgetretenen Streuungen sind die Untersuchungsergebnisse auch als Summenhäufigkeiten im Wahrscheinlichkeitsnetz auf den Abb.4 und 5 dargestellt.

Da in der Praxis für den Techniker und Konstrukteur eine gewisse Sicherheit erforderlich ist und um von den unterschiedlichen Streuungen unabhängig zu werden, sollen für die Vergleiche der Kugelstrahlbehandlungen nicht die Mittelwerte, sondern die 90 %-Überlebenswahrscheinlichkeiten herangezogen werden.

Nimmt man jeweils das Ergebnis des nicht kugelgestrahlten Zustandes mit 1 an, so zeigen die Versuchsergebnisse, daß bei Versuchsreihe 1 durch das Kugelstrahlen der 5,8-fache Wert und durch das Kugelstrahlen unter erhöhter Temperatur der 7,4-fache Wert bei den nicht vorgesetzten Proben erreicht wurde. Nach dem Kugelstrahlen unter hoher Vorspannung konnten keine Brüche erreicht werden.

Bei den vorgesetzten Proben der Versuchsreihe 1 wurde durch das Kugelstrahlen der 4,8-fache Wert erreicht und durch Kugelstrahlen unter Vorspannung von 700 N/mm² der 8-fache Wert. Nach Kugelstrahlen unter hoher Vorspannung konnten keine Brüche mehr erreicht werden.

In der Versuchsreihe 2 mit stark erhöhtem Beanspruchungsniveau wurde an vorgesetzten Proben durch das Kugelstrahlen der 3-fache Wert, durch das Kugelstrahlen unter Vorspannung von 700 N/mm² der 4,4-fache Wert und durch Kugelstrahlen unter hoher Vorspannung von 1450 N/mm² der 8,4-fache Wert erreicht.

Diese auf den nicht kugelgestrahlten Zustand bezogenen Werte sind in Abb.6 zusammengestellt.

Es konnte festgestellt werden, daß im Zusammenwirken von Kugelstrahlen und Vorsetzen die Reihenfolge Kugelstrahlen und anschließend Vorsetzen bessere Ergebnisse bringt, als das Kugelstrahlen bereits vorgesetzter Proben.

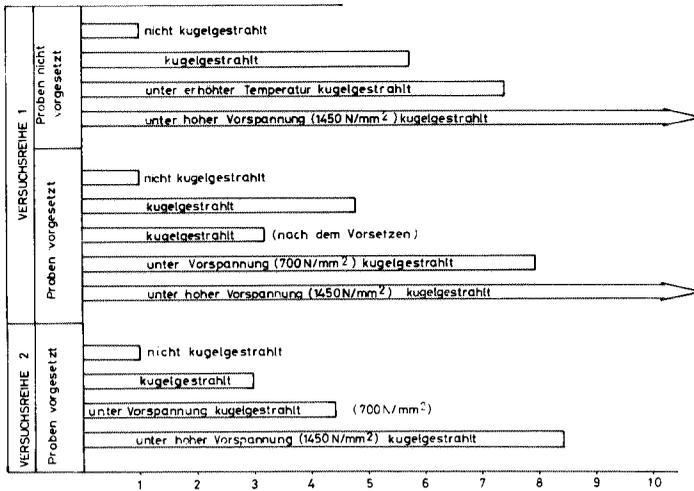


Abb.6 Auf den nicht kugelgestrahlten Zustand bezogene Prüfergebnisse ($P_{\bar{u}} = 90\%$)

TABELLE 1: Prüfergebnisse Versuchsreihe 1
 $\sigma_u = 190 \text{ N/mm}^2$; $\sigma_o = 1180 \text{ N/mm}^2$

Behandlung	Verformung durch das Kugelstr.	Lastspiele N	Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{u}}$		
			90 %	50 %	10 %
vergütet		15.200	9.600	13.100	17.800
		17.600			
		10.150			
		13.700			
		10.350			
vergütet kugelgestrahlt	1,5	69.500	55.300	64.500	75.100
	2,2	53.000			
	2,1	72.000			
	1,6	63.400			
	1,8	66.200			
vergütet unter Vorspannung (1450 N/mm ²) kugelgestrahlt	7,4	über 1000.000			
	6,9				
	7,8				
	7,6				
	7,6				

Tabelle 1: Fortsetzung

Behandlung	Verformung durch das Kugelstr.	Lastspiele N	Überlebenswahrscheinlichkeit P _ü		
			90 %	50 %	10 %
vergütet bei 160°C kugelgestrahlt	1,6	80.200	71.200	76.000	81.200
	1,6	82.700			
	2,5	79.000			
	2,4	78.000			
	2,4	62.200			
vergütet bei 250°C kugelgestrahlt	2,3	75.500	70.400	77.900	86.200
	1,9	77.500			
	1,6	87.900			
	1,7	70.800			
	2,8	78.800			
vergütet gesetzt		26.000	26.400	28.800	31.400
		28.600			
		30.400			
		30.800			
		28.500			
vergütet kugelgestrahlt gesetzt	1,4	130.200	126.900	139.700	153.800
	2,0	138.300			
	1,8	153.800			
	1,8	130.100			
	3,0	147.600			
vergütet gesetzt kugelgestrahlt	0,9	112.000	84.700	100.000	119.500
	1,4	105.000			
	1,5	81.000			
	0,9	97.000			
	1,2	111.400			
vergütet unter Vor- spannung (1450 N/mm ²) kugelgestrahlt gesetzt	9,2	über 1000.000			
	10,0				
	8,0				
	7,0				
	6,7				
vergütet unter Vor- spannung (700 N/mm ²) kugelgestrahlt gesetzt	2,9	299.500	(210.000)*	(410.000)*	(820.000)*
	3,2	über 10 ⁶			
	3,7	455.000			
	3,0	210.000			
	3,6	497.000			

* Überlebenswahrscheinlichkeiten
graphisch aus Wahrscheinlichkeits-
netz ermittelt.

TABELLE 2: Prüfergebnisse Versuchsreihe 2
 $\sigma_u = 200 \text{ N/mm}^2$; $\sigma_0 = 1470 \text{ N/mm}^2$

Behandlung	Verformung durch das Kugelstr.	Lastspiele N	Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{u}}$		
			90 %	50 %	10 %
vergütet gesetzt		11.200	11.240	11.670	12.120
		12.000			
		11.800			
		11.700			
vergütet kugelgestrahlt gesetzt	2,0	57.000	34.000	43.400	55.300
	1,7	40.000			
	2,3	34.000			
	1,5	46.500			
	1,5	43.000			
vergütet unter Vorspannung (1450 N/mm ²) kugelgestrahlt	7,5	191.000	84.100	174.900	363.400
	7,0	103.000			
	8,2	93.000			
	7,5	259.000			
	8,8	345.000			
vergütet unter Vorspannung (1450 N/mm ²) kugelgestrahlt gesetzt	7,2	85.000	94.700	171.600	310.900
	7,4	155.000			
	7,3	258.000			
	8,5	165.000			
	8,0	265.000			
vergütet unter Vorspannung (700 N/mm ²) kugelgestrahlt gesetzt	3,5	67.200	49.800	77.900	121.700
	3,0	50.000			
	4,0	92.000			
	3,0	126.500			
	3,6	73.300			