Das Shot-peenen von Federn

Autor(en): **Horowitz, J.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **101 (1983)**

Heft 24

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-75160

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Das Shot-peenen von Federn

Von J. Horowitz, Zürich

Federn aus metallischen Werkstoffen spielen in der Technik eine nicht mehr wegzudenkende Rolle. So ist man geneigt, als Überbegriff den Ausdruck «Federnde Konstruktionselemente der Technik» zu gebrauchen. Aus der geschichtlichen Vergangenheit sind die ältesten bekannten Entwürfe von Federn aus dem Anfang des 16. Jahrhunderts bekannt, ausgeführt durch den genialen Leonardo da Vinci. Zwischen den Anfängen des Shot-peenen und den Bestrebungen, die Lebensdauer von Ventilfedern für Automobile zu verlängern, besteht ein enger Zusammenhang. Der Formenreichtum und die Verschiedenartigkeit der zu behandelnden Werkstücke bestimmen das Arbeitsgebiet. Deshalb befasst sich der folgende Beitrag nur mit dem Shot-peenen von Blattfedern, zylindrischen Schraubenfedern, Tellerfedern, Spiralfedern und Torsionsstäben.

Vorbemerkungen

Wie aus amerikanischen Literaturangaben [1] hervorgeht, besteht ein enger Zusammenhang zwischen den Anfängen des Shot-peening-Verfahrens und den Ende der 20er Jahre besonders intensiven Bemühungen zur Verbesserung der Lebensdauer von Ventilfedern für Automobile.

Damals stellten *gebrochene Ventilfedern* eine sehr häufige Störungsursache beim Betreiben von Autos dar. Wie aus den Berichten hervorgeht, vermuteten damals *Burkhardt* und *Heiss*, dass die Brüche durch am Ventilfederdraht anhaftenden Zunder verursacht würden. Um diese Vermutung zu überprüfen, wurde eine Bestellung von durch *Strahlen entzundertem Federdraht* aufgegeben. Beim Eintreffen der Lieferung stellte man eine durch das Strahlen ausserordentlich stark aufgerauhte Drahtoberfläche fest. Mangels anderweitiger Ware wurde trotz der starken Aufrauhung das Material aufgearbeitet und die damit hergestellten Ventilfedern geprüft. Zur allgemeinen Überraschung wiesen diese eine *sehr hohe Dauerstandfestigkeit* auf. Die Wiederholung der Versuche bestätigte das Ergebnis und führte im Jahre 1930 in den Buick-Automobilwerken zur Verwendung von *mit Schrot entzundertem* Draht für die Fabrikation der Ventilfedern. Das Vorgehen fand rasch Nachahmung und führte nach *Henry O. Fuchs* und *Paul E. Bickel* [2, 3] in verhältnismässig kurzer Zeit zur Abklärung der theoretischen Zusammenhänge und der Wirkungsweise des Shot-peening-Verfahrens sowie zu einer weiten Verbreitung seiner praktischen Anwendungen. Heute schätzt man, dass jedes Jahr Hunderte Millionen von Federn der verschiedensten Arten gepeent werden, davon allein Millionen von Ventilfedern für Autos.

Über das Shot-peening-Verfahren selber und über seine Grundlagen und Begriffe ist an dieser Stelle bereits berichtet worden [4]. Bei diesem *Feinbearbeitungsverfahren der Strahltechnik* wird an der Oberfläche der zu behandelnden Werkstücke eine unter Druckvorspannungen stehende Materialschicht erzeugt und auf diesem Wege eine *Erhöhung der Dauerstandfestigkeit* und somit auch der Lebensdauer und der Betriebssicherheit von auf *Wechselspannungen* hoch beanspruchten Federn erreicht. Die Probleme des hier zu behandelnden Arbeitsgebietes werden vor allem durch die Faktoren *Formenreichtum* und durch die *Verschiedenartigkeit* der zu behandelnden Werkstücke bestimmt. Andererseits benötigen die Automobilindustrie und die ihr verwandten Herstellerwerke grosse Mengen gleicher oder zumindest gleichartiger Federn, die in den eigenen Werkstätten oder in spezialisierten Zulieferbetrieben hergestellt werden. Hier sind Maschinen erforderlich, die in der Lage sein müssen, sehr grosse Stückzahlen gleichartiger Werkstücke zu behandeln. Es wird deshalb nur das Peenen folgender Federarten behandelt:

Blattfedern

Bild 1 zeigt als Beispiel ein aus mehreren Blättern zusammengesetztes Federnpaket. Die Belastung erfolgt auf *Druck*, wobei das Material der Feder auf Biegung beansprucht wird.

Zylindrische Schraubenfedern

Je nach der Belastungsart unterscheidet man zwischen *Schraubendruck-* und *Schraubenzugfedern*. Beide Formen sind in Bild 2 dargestellt. In beiden Fällen wird das Material auf *Torsion* beansprucht.

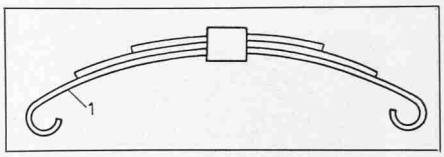


Bild 1. Blattfedern-Paket. Normalerweise ist es stets nur sinnvoll, die konkave Innenseite des grossen, zumeist mit Ösen versehenen Haupt-Tragfeder-Blattes zu peenen.
1: grosses Haupt-Tragfeder-Blatt

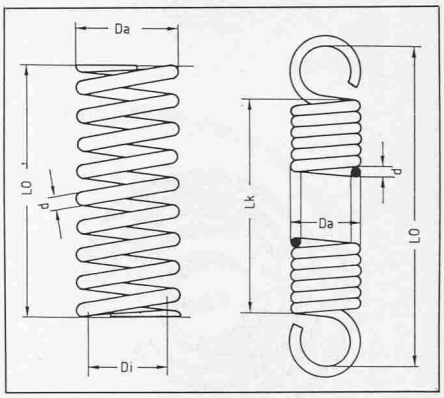


Bild 2. Zylindrische Schraubenfedern. Links eine Schraubendruckfeder, rechts eine Schraubenzugfeder mit aufgebogener, sogenannter «deutscher» Öse.

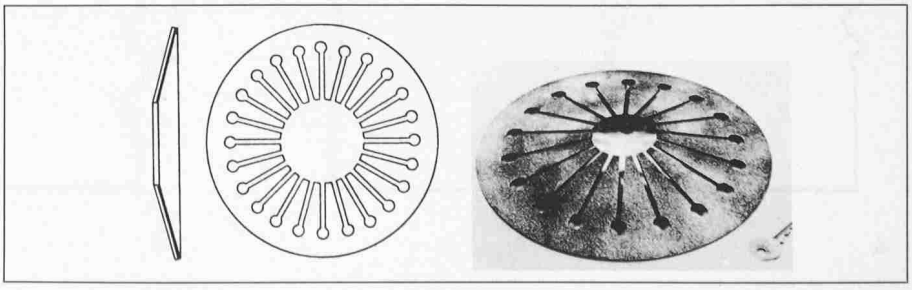
Tellerfedern

Als Beispiel zeigt Bild 3 eine *Kupplungsfeder*. Die Belastung erfolgt auf *Druck*, während das Material der Feder auf *Biegung* beansprucht wird.

Spiralfedern

Bild 4 zeigt einige Beispiele flacher Spiralfedern, die eine Wirkung im Drehsinn abgeben. Das Material wird dabei auf *Biegung* beansprucht. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird die Bezeichnung Spiralfeder gelegentlich auch auf *zylindrische Schraubenfedern* angewendet. Hier handelt es sich um einen Irrtum, der überdies leicht zu Missverständnissen führen kann. Schraubenfedern arbeiten entweder *auf Zug oder Druck*, während die Bezeichnung «Spiralfeder» ausschliesslich für Torsions-

Bild 3. Kupplungsfedern (auch Tellerfedern genannt). Links: Prinzipzeichnung. Rechts: Photo einer gepeenten Kupplungsfeder, die mit Stahlschrot S-550 (Nennkorngrösse 1,4 mm) und bei einer Strahlintensität von 10×10^{-3} Zoll = 0,25 mm gemäss Almen-Test-Plättchen C behandelt worden ist.
Bild: Metal Improvement Comp. Inc., Division France, Zone industr., F-45200 Amilly



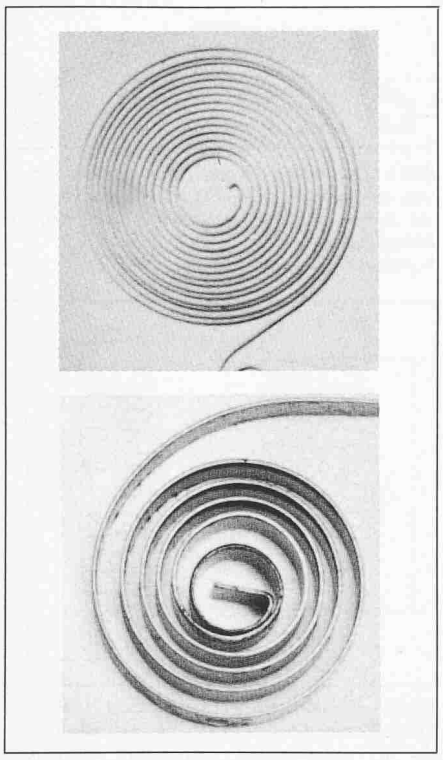


Bild 4. Beispiele von Spiralfedern.
Bild: Federnfabrik Thür + Co., Dietlikon-Zürich

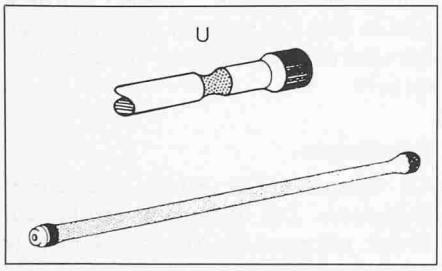


Bild 5. Torsionsstab. Diese federnden Konstruktions-Elemente werden vielfach zusätzlich als Sicherung gegen Überlast verwendet und erhalten dann im zylindrischen Teil eine Querschnittsverengung (Detail U). Während der Shot-peening-Behandlung wird diese Stelle mit einer Gummimanschette gegen die Wirkung der Bestrahlung geschützt

federn zu verwenden ist, wie sie in Bild 4 dargestellt sind.

Torsionsstäbe

Es handelt sich um ein *federndes Konstruktionselement,* das im Fahrzeugbau vielfache Verwendung findet und dementsprechend auch in grossen Serien hergestellt wird. Bild 5 zeigt die meist angewandte gerade Ausführung. In manchen Fällen werden Torsionsstäbe auch als *Sicherung gegen Überlast* verwendet. Hierzu wird der Durchmesser des betreffenden Stabes an einer vorbestimmten Stelle verengt, wie in Skizze U in Bild 5 dargestellt. Die englische Bezeichnung für Torsionsstäbe lautet «Torsion Bar Springs» und weist direkt auf ihre federnden Eigenschaften hin.

Massenfertigung

Vor allem die drei zuerst genannten Federarten werden massengefertigt. Dies trifft bei Spiralfedern weniger zu, jedoch reichen die Serien meist für Anlagen aus, die besonders für diesen Zweck ausgelegt werden. Torsionsstäbe werden von der Automobilindustrie in grossen Serien gefertigt. Auch hier werden für das Peenen besondere Maschinen verwendet.

Anders liegen die Verhältnisse bei den zahlreichen anderen Federformen und Ausführungen. Die Vielfalt ist so gross und die Stückzahlen deshalb meistens so gering, dass überall dort, wo die Werkstücke gepeent werden müssen, fast immer möglichst universell verwendbare Anlagen gewählt werden. Als solche kommen vor allem nach dem Druckluftsystem arbeitende, mit Injektor-Strahlpistolen ausgerüstete *Shot-peening-Kabinen* in Betracht [5], bei denen die Strahlmittelzuführung zu den Strahlpistolen mittels Becherwerk nach dem Gravitationssystem erfolgt.

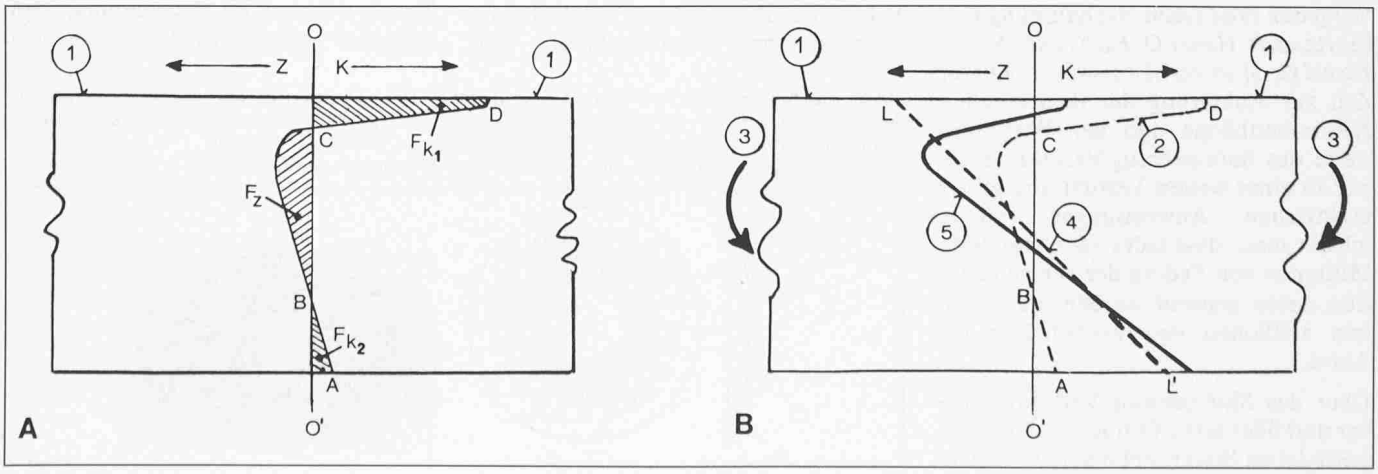
Wirkung der Shot-peening-Behandlung

Die gelegentlich geäusserte Vermutung, die *Erhöhung der Dauerstandfestigkeit* beim Shot-peenen sei auf eine Verfestigung und Verdichtung der Werkstückoberfläche zurückzuführen, stimmt nicht. Ein Bruch im kritischen Querschnitt wird fast immer durch einen an der Oberfläche auftretenden Anriss eingeleitet, denn dort tritt zuerst eine Überschreitung der zulässigen Belastung auf. Bei nach dem Shot-peening-Verfahren behandelten Werkstücken müssen jedoch die Zug-, Schub- oder Torsionskräfte zunächst die in den äusseren Materialschichten induzierten Druckvorspannungen überwinden. Der Zeitpunkt, in dem die zulässige Belastung an der Werkstückoberfläche erreicht ist, wird damit wesentlich hinausgeschoben. Den dabei wirksam werdenden Mechanismus veranschaulicht Bild 6. Darin zeigt A zunächst die Spannungsverhältnisse in einem keinen äusseren Belastungen unterworfenen Träger oder Balken, der auf der Oberseite bereits gepeent worden ist. Es herrscht *Gleichgewichtszustand,* wobei die von der Spannungsverteilkurve rechts der Nullinie im Gebiet der Druckspannungen umschlossenen beiden Flächen A–B–O′ und C–D–O zusammen gleich gross sein müssen wie das auf der Seite der Zugspannungen von der Kurve eingeschlossene Flächensegment B–C. Ausserdem muss die Summe der Mo-

Bild 6. Diagramm der in einem auf der Oberseite nach dem Shot-peening-Verfahren behandelten Träger oder der in einem rechteckigen Balken auftretenden Zug- und Druckspannungen. N.B. Ein Bruch wird fast immer durch einen an der Oberfläche des Werkstückes beginnenden Anriss eingeleitet. Die Gegenüberstellung der beiden Diagramme macht deutlich, wie durch das Shot-peenen die einen solchen Anriss verursachenden Zugspannungen an der Oberfläche herabgesetzt werden.

A (links): Träger ist keinerlei äusseren Belastungen unterworfen. Da Kräftegleichgewicht herrscht, müssen die Flächen $F_{k_1} + F_{k_2}$ gleich der Fläche F_z sein

B (rechts): Träger unter Biegebelastung. 1: gepeente Oberfläche des Trägers. 0–0′: Nullinie. Z: Zugspannungen. D: Druckspannungen. 2: vom Shot-peenen herrührende Zug- und Druckspannungen. 3: Biegebelastung. 4: durch Biegebelastung erzeugte Zug- und Druckspannungen. 5: aus Biegebelastung und Shot-peenen resultierende Spannungsverteilkurve



mente aller dieser Flächen Null ergeben. B veranschaulicht hingegen den Zustand einer Biegebelastung des auf der Oberseite gepeenten Balkens, wobei die über die ganze Dicke des Trägers wirksam werdenden Kräfte durch die Linie L-L′ gegeben sind. Die resultierende Spannungsverteilungskurve ergibt sich durch Addition der Abszissen der Biegekräfte und der durch das Shotpeenen erzeugten Vorspannungen. Diese Spannungsverteilungskurve ist in B als ausgezogene Linie dargestellt, die beiden Komponenten sind gestrichelt eingezeichnet. Man erkennt im Diagramm, in welch hohem Masse das Shot-peenen den Zeitpunkt hinauszuschieben vermag, in dem die zulässige Belastung an der Werkstückoberfläche erreicht wird. Es ist dies ein Mechanismus, der ganz besonders dort wirksam wird, wo aus hochwertigen Materialien gefertigte Werkstücke rasch wechselnden starken Beanspruchungen ausgesetzt sind. Diese Voraussetzungen treffen auch in besonders hohem Masse auf die verschiedenen Federarten zu.

Verlängerte Dauerstandfestigkeit

Der Gewinn des Verfahrens äussert sich in einer wesentlich verlängerten Dauerstandfestigkeit. Man versteht darunter die *Anzahl Lastwechsel bis zum Eintreten des Bruches.* Es handelt sich jedoch keineswegs um einen statistisch ermittelten Durchschnittswert, sondern es wird in der Praxis wenn immer möglich eine repräsentative Anzahl Musterstücke in speziell für diesen Zweck gebauten Prüfmaschinen immer wiederkehrenden, gleichartigen Wechselbeanspruchungen unterworfen, bis der Prüfling zu Bruch geht. Gezählt wird die Anzahl Lastwechsel bis zum Bruch. Die Untersuchung einer ausreichenden Serie gleicher Stücke wird in Form einer Kurve als *Lebenserwartungs-Charakteristik* ausgewertet, wobei als Ordinate die Zahl der Lastwechsel bis zum Bruch und auf der Abszisse ein geeigneter Vergleichsmassstab aufgetragen werden. Um einwandfreie Vergleichsmöglichkeiten zu erhalten, wird fast immer auch eine entsprechende Anzahl gleicher, jedoch nicht gepeenter Werkstücke in analoger Weise in einer Prüfmaschine untersucht und wiederum zu einer Lebenserwartungs-Charakteristik für unbehandelte Stükke zusammengefasst. Während in den USA für solche Charakteristiken die Bezeichnung «S-N Curves» üblich ist, wird in Deutschland gelegentlich die Bezeichnung *«Wöhlerkurven»* verwendet.

Zeitaufwendige Prüfmethoden

Die Untersuchung einer Serie von Musterstücken in der Prüfmaschine ist sehr zeitaufwendig. So liegt beispielsweise die Lebensdauer gepeenter Zahnräder aus gehärtetem oder vergütetem Stahl bei Normalbelastung zwischen 10^6 bis 10^7 Lastwechseln. Die Untersuchung kann jedoch in sogenannten *Pulsatoren* erfolgen, die mit hoher Frequenz arbeiten. So lassen sich bis etwa 100 Lastwechsel je Sekunde unter Schwellbeanspruchung durchführen. Bei einer kleinen Serie von nur etwa zehn Zahnräder-Prüflingen muss jedoch trotz den verhältnismässig günstigen Arbeitsbedingungen bereits mit einer Belegung des Pulsators von schätzungsweise fünfzig bis dreihundert Arbeitsstunden gerechnet werden.

Ganz andere Verhältnisse liegen hingegen bei der Prüfung von Federn unter immer wiederkehrenden gleichartigen Wechselbeanspruchungen vor. Als Wichtigstes ist zunächst festzuhalten, dass bei allen Federarten unter Belastung *Formänderungen* auftreten. Bei Schrauben-Druckfedern zum Beispiel hat eine Belastung ein Zusammendrükken der Federwindungen und eine Verkürzung der Federlänge zur Folge. Schraubenzugfedern hingegen werden unter Belastung gestreckt. Bei Blattfedern hat jede Belastung eine Veränderung der Durchbiegung des Federblattes und damit auch eine Formänderung zur Folge usw. Alle diese Deformationen benötigen entsprechend Zeit und schliessen die Verwendung von hochfrequenten Pulsometer-Prüfmaschinen aus. Die für Hersteller von Federn gebauten Prüfmaschinen sind üblicherweise für ganz andere Zwecke ausgelegt; sie dienen in erster Linie der Kontrolle der Federabmessungen unter Last und beim Setzen, für die Kraftmessung usw. Mit solchen Einrichtungen lassen sich gegebenenfalls drei oder vier Lastwechsel pro Minute durchführen. Eine kleine Überschlagsrechnung zeigt, dass so für die Untersuchung einer kleinen Serie von zehn Feder-Prüflingen bis zum Bruch sich eine Belegung der Prüfanlage ergeben würde, die bei 24-Stunden-Betrieb mehr als ein Jahr dauern würde. Eine solche Untersuchung verursacht entsprechend grosse Aufwendungen, die sich nur in seltenen Ausnahmefällen rechtfertigen lassen.

Prüfmuster

Beim Shot-peening-Verfahren sollten Lebenserwartungs-Charakteristiken grundsätzlich durch die Untersuchung ganzer Serien von Original-Werkstükken im Prüfstandversuch ermittelt werden. Dies ist bei Federn jedoch nicht möglich, weil die Aufwendungen dafür zu hoch sind. So wendet man *indirekte* Methoden an, bei denen die Prüfung bis zum Bruch ganzer Serien von Federn, die aus dem gleichen Material hergestellt sind, nach einem eigens angefertigten Prüfmuster erfolgt.

Diese *Dauerstandversuche dienen aber gleichzeitig auch der Ermittlung und Festlegung der später bei der Fertigung anzuwendenden Parameter für Strahlintensität, Strahldauer* usw. Um die dazu notwendigen Vorversuche abzukürzen, werden zu Beginn für die Strahlintensität die in Bild 7 zusammengefassten Richtwerte zugrunde gelegt, wie sie erfahrungsgemäss für Werkstücke aus

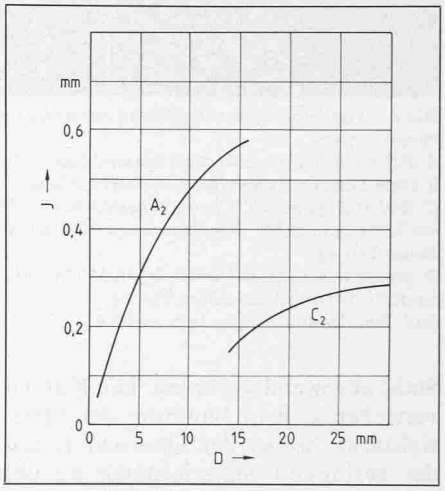
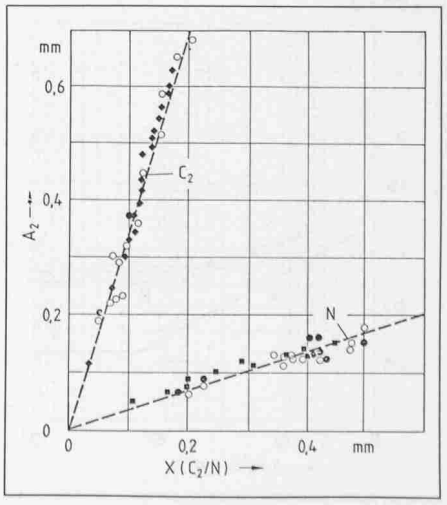


Bild 7. Peenen von Werkstücken aus Stahl. Richtwerte für die Strahlintensität in Funktion der Materialstärke an der kritischen Stelle des zu behandelnden Werkstückes, wobei der Querschnitt mit der geringsten Materialstärke massgebend ist.
J: Strahlintensität gemessen mit Almen-Test-Plättchen. D: Materialstärke (Dicke) in mm des zu peenenden Bauteils im schwächsten Querschnitt. A_2: Richtwerte der Strahlintensität bei Messung mit Almen-Test-Plättchen A_2.
C_2: Richtwerte der Strahlintensität bei Messung mit Almen-Test-Plättchen Type C_2

Bild 8. Diagramm zur Umwandlung von mit Almen-Test-Plättchen A_2, C_2 oder N gemessenen Strahlintensitäten.
A_2: Strahlintensität gemessen mit Almen-Test-Plättchen A_2. X: Skala für Strahlintensitäten gemessen mit Test-Plättchen C_2 und N, je nach der für die Ablesung verwendeten Kurve.
Im Diagramm sind auch Einzelmesswerte aus der Praxis eingetragen. Es geht daraus hervor, dass bei diesen Messungen zwangsläufig mit einer beachtlichen Streuung gerechnet werden muss



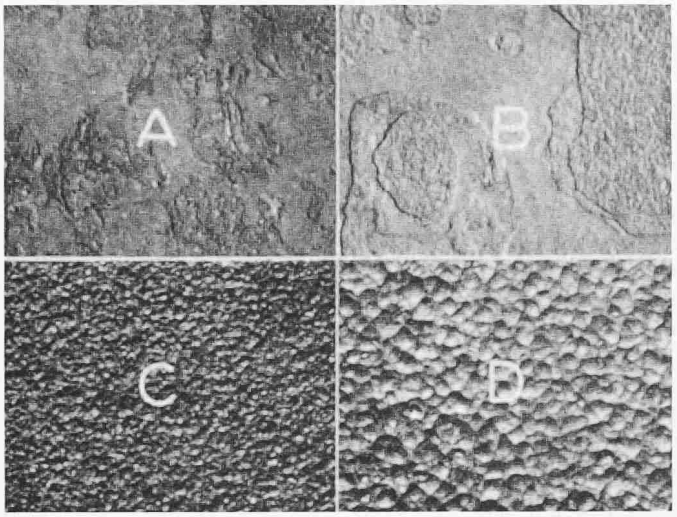


Bild 9. Vier Beispiele des Oberflächenzustandes von Blattfedern in fünffacher Vergrösserung.
A: Flachstahl in warmgewalztem Zustand angeliefert.
B: Oberfläche nach thermischer Nachbehandlung.
C: Walzstahl gemäss B, d.h. nach thermischer Nachbehandlung, jedoch gepeent mit Stahlschrot S-230 (Nennkorngrösse 0,6 mm), Strahlintensität 0,18 mm mit Almen-Test A_2.
D: gemäss B, gepeent mit Stahlschrot S-550 (Nennkorngrösse 1,4 mm), Strahlintensität 0,56 mm gemäss Almen-Test A_2.
Bild: Wheelabrator Comp., Indiana USA

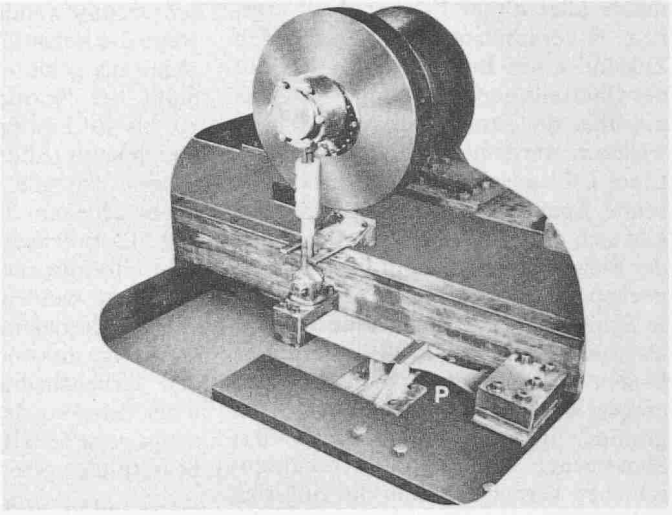
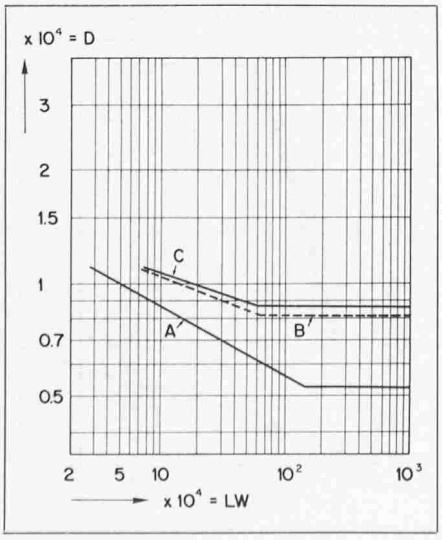


Bild 10. In den USA übliche Ausrüstung zur Dauerstandprüfung bis zum Bruch von sogenannten Flachbiegeproben, die als Prüfmuster aus der für die Herstellung von Blattfedern bestimmten Flachstahlqualität zur Ermittlung von Lebenserwartungs-Charakteristiken auf indirektem Wege dienen. Die Apparatur unterwirft das Prüfmuster ständig wiederkehrenden, gleichartigen Wechselbeanspruchungen auf Biegung unter Schwellbelastung.
P: eingespanntes Prüfmuster (Flachbiegeprobe)
Bild: Wheelabrator Comp., Indiana USA

Stahl angewendet werden. Die Kurven verstehen sich in Funktion der Materialstärke, wobei der Querschnitt mit der geringsten Materialstärke an der kritischen Stelle massgebend ist. Zur Festlegung der Strahlintensität gehört stets auch die Angabe der einzuhaltenden Flächenüberdeckung. Was die Angaben in Bild 7 betrifft, beziehen sich diese auf eine Flächenüberdeckung von 98 Prozent. Im Diagramm kommen zwei der genormten Almen-Test-Prüfplättchen vor. Für die Umrechnung ist auf Bild 8 verwiesen.

Bild 11: Lebenserwartungs-Charakteristik, ermittelt für Blattfedern nach der indirekten Methode durch stets wiederkehrende, gleichartige Wechselbelastungen auf Biegung unter Schwellbelastung in der in Bild 10 abgebildeten Prüfapparatur. Die Kurven geben die Dauerstandfestigkeit der aus einem Viertelzoll dicken Federstahl mit einer Härte von 40–45 Rockwell C (nach der Wärmebehandlung) gefertigten, als Prüfmuster dienenden Flachbiegeproben wieder (und somit des als Rohmaterial dienenden Flachstahls). Das Diagramm beruht auf der Auswertung einer Reihenuntersuchung mit einer grossen Anzahl von bis zum Bruch geführten Tests.
D: Belastung (Stress) in kg/cm². LW: Lastwechsel bis zum Bruch des Prüfmusters. B: Dauerstandfestigkeit von Flachbiegeproben, die gepeent wurden, jedoch mit einer zu geringen Strahlintensität.
A: Dauerstandfestigkeit von nicht gepeenten Probestücken. C: Dauerstandfestigkeit von Flachbiegeproben, die mit optimaler Strahlintensität gepeent wurden



Lebenserwartungs-Charakteristiken von Blattfedern

Bedingt durch die Konstruktion und die Arbeitsweise ist es bei Blattfedern nur sinnvoll, die *konkave* Seite des grossen, zumeist mit Ösen versehenen Haupt-Tragfeder-Blattes (französisch lame maîtresse) zu peenen. Nur dort kann durch den in Bild 6 veranschaulichten Mechanismus und die dabei induzierten Druckvorspannungen der Zeitpunkt hinausgeschoben werden, in dem an der Oberfläche die zulässige Zugbelastung erreicht wird. Die Herstellung erfolgt aus *Flachstahl,* wobei sehr verschiedene Qualitäten verwendet werden. In manchen Fällen wird überdies im Laufe der Fabrikation auch eine *thermische Nachbehandlung* durchgeführt. Es ist zu beachten: Das Shot-peenen muss stets als letzte Bearbeitungsstufe der Fertigung durchgeführt werden. Bild 9 zeigt den Endzustand von vier typischen Oberflächen von Blattfedern in fünffacher Vergrösserung.

Was die Prüfmuster für die Dauerstandsprüfung bis zum Bruch betrifft, werden diese für Blattfedern in Form sog. *Flachbiegeproben* aus dem gleichen Material wie die Federn selbst angefertigt. Sie müssen somit gleiche Dicke und auch sonst die gleichen Eigenschaften wie das zu prüfende Material aufweisen. Bild 10 zeigt die verhältnismässig einfache Ausrüstung zur Prüfung der Muster auf ständig wiederkehrende gleichartige Wechselbeanspruchungen unter Schwellbelastung auf Biegekräfte, wie sie in den USA verwendet werden. Rechts aussen im Bild ist der eine fest mit der Grundplatte verbundene Einspannblock zu sehen. Der andere wird von einem einstellbaren Exzenter in eine rasche Auf- und Abbewegung versetzt, so dass das dazwischen liegende, gut sichtbare Probemuster immer wiederkehrenden Belastungen auf Biegung ausgesetzt wird. In Bild 10 ist eine mit dieser Apparatur aufgenommene Lebenserwartungs-Charakteristik wiedergegeben. Die Daten sind der ausführlichen Legende zu entnehmen, wobei aber auf ein wesentliches Detail hingewiesen werden muss. Die so ermittelte Charakteristik gilt im Grunde für ein Federblatt mit einer einwandfreien, durchgehenden und somit unbeschädigten Oberfläche. In der Praxis erhält jedoch jedes Federblatt für Montagezwecke usw. Bohrungen und gestanzte Löcher für Befestigungsbolzen, Ausfräsungen für Klammern usw. Je nach verwendeter Stahlqualität und Fabrikationsverfahren ergeben sich dadurch Einbussen von schätzungsweise 30 bis 50 Prozent gegenüber dem untersuchten, unbeschädigten Blatt. Es sei in diesem Zusammenhang auf den Bericht von *Karl-Heinz Muhr* verwiesen, in dem vor allem auf den Einfluss des Pee-

nens auf Flachbiegeproben aus Stahl 50 CrV 4 eingegangen wird [6].

In der Werkstatt wird das Shot-peenen von Blattfedern auf mit Schleuderrädern ausgerüsteten und nach dem Längsstrahl-Einstrang-Prinzip arbeitenden Maschinen durchgeführt, die je nach der verlangten Produktion mit einem, zwei oder sogar drei auf dem Dach der Anlage aufgebauten Schleuderrad-Einheiten bestückt sind. Bild 11 zeigt eine solche Maschine in Betrieb, während Bild 12 schematisch die Arbeitsweise der Transporteinrichtung und die Anordnung der Schleuderräder veranschaulicht, deren Strahlen auf die konkave Seite der durchlaufenden Blattfedern konvergieren, um eine möglichst gleichförmige Beaufschlagung zu erreichen. Bild 13a vermittelt einen Blick in die Beladestation mit den auf den Querstäben der Transporteinrichtung sitzenden Haltern, in welche die Blattfedern eingelegt werden. Früher wurden vielfach für den Transport der Werkstücke durch die Maschine Gummibänder verwendet. Die hier gezeigte Lösung bietet den Vorteil, dass die beiden Längsketten des Transportsystems entlang den Seitenwänden des Strahlraumes laufen und somit der direkten Einwirkung des Schleuderstrahls entzogen sind.

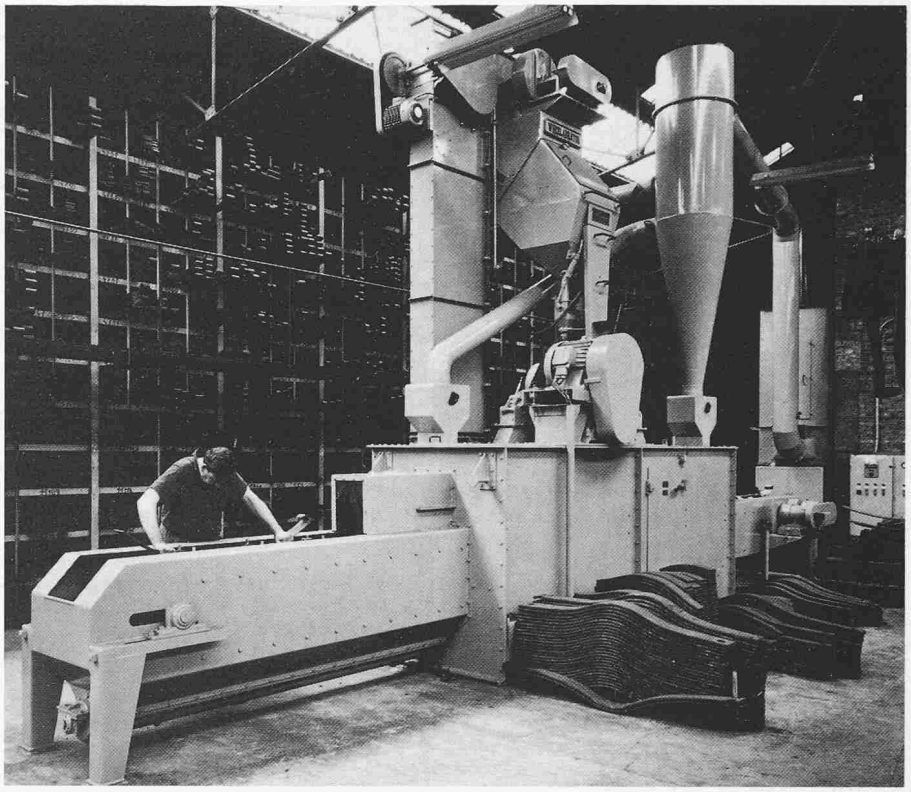


Bild 12. Kontinuierlich nach dem Durchlaufverfahren arbeitende Anlage für das Shot-peenen von Blattfedern, ausgerüstet mit zwei auf dem Maschinendach aufgebauten Schleuderrädern von je zweieinhalb Zoll Breite und neunzehneinhalb Zoll Raddurchmesser, deren Schleuderstrahlen gegeneinander konvergieren, wie auch aus dem Arbeitsprinzip (Bild 13) hervorgeht. Antriebsmotor je Schleuderrad N = 25 PS. Anlage nach dem Längsstrahl-Einstrang-Prinzip. Ansicht von der Beschickungs-Seite aus gesehen.
Bild: Maschinenfabrik Graber + Wening AG, Neftenbach (ZH)

Lebenserwartungs-Charakteristiken von Kupplungsfedern (Tellerfedern)

Kupplungsfedern werden von den Zulieferbetrieben der Automobilindustrie in grossen Serien produziert. In Anbetracht der verlangten grossen Betriebssicherheit müssen Kupplungsfedern auf der Aussen- und auf der Innenseite als letzte Behandlungsstufe gepeent werden. Erfahrungsgemäss ist das beidseitige Peenen erforderlich, um einwandfreie Ergebnisse zu erhalten. Auch bei Tellerfedern werden die Lebenserwartungs-Charakteristiken in der beschriebenen Weise auf indirektem Wege durch Dauerstandsprüfung von «Flachbiegeproben» des für die Herstellung der zu untersuchenden Kupplungsfedern verwendeten Blechmaterials ermittelt. Als Beispiel ist in Bild 14 eine solche Charakteristik für Tellerfedern A 31,5 nach DIN 2093 aus Stahl 50 CrV 4 wiedergegeben [7]. Im übrigen wird auf die Bildlegende verwiesen.

Kupplungs- und Tellerfedern haben eine leicht konische Form. Da Aussen- und Innenseite gepeent werden müssen, haben sich für diesen Zweck – je nach der zu bewältigenden Produktion – zwei verschiedene Maschinentypen

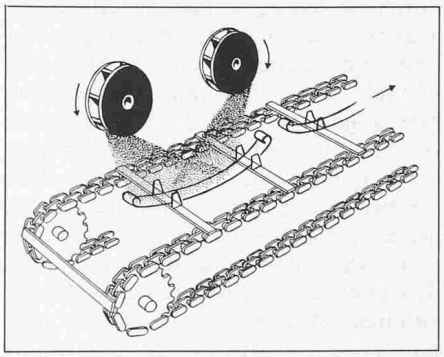


Bild 13. Schleuderradanordnung der mit zwei auf dem Dach montierten Schleuderradeinheiten ausgerüsteten Maschine gemäss Bild 12 zum Peenen von Blattfedern, wobei die Schleuderstrahlen auf die durch die Anlage im Längsstrahl-Einstrang-Prinzip durchlaufenden Federn konvergieren. Grundsätzlich wird jeweilen nur die konkave Seite des Haupt-Tragfeder-Blattes behandelt

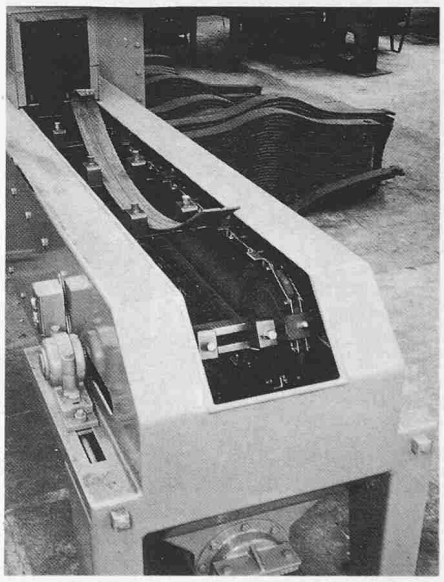


Bild 13A. Blick auf die Beladestation der Maschine gemäss Bild 12 für das Peenen von Blattfedern nach dem kontinuierlichen Durchlaufverfahren gemäss dem Längsstrahl-Einstrang-Prinzip. Das Bild zeigt das Transportsystem gemäss Schema Bild 13 mit den beiden Längsketten an den Seitenwänden, den Querstäben und den Gummiklemmbacken für das Festklemmen der Blattfedern.
Bild: Maschinenfabrik Graber + Wening AG, Neftenbach (ZH)

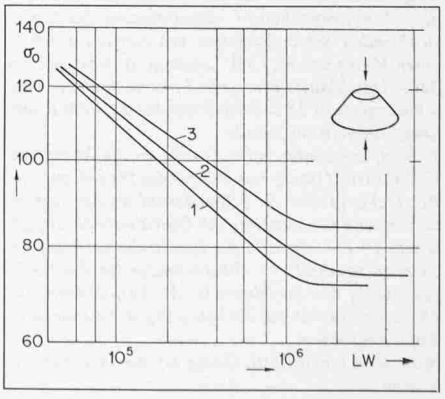


Bild 14 (rechts). Lebenserwartungs-Charakteristiken von Tellerfedern A 31,5 nach DIN 2095 aus Stahl 50CrV4. Unterspannung = 10 kg/mm² nach Muhr [7].
LW: Anzahl Lastwechsel bis zum Bruch. σ_0: Oberspannung in kg/mm². 1: Tellerfedern ungepeent. 2: gepeent mit Stahlguss-Schrot Nennkorngrösse 0,84 mm. 3: gepeent mit Drahtkorn 0,6 mm Durchmesser

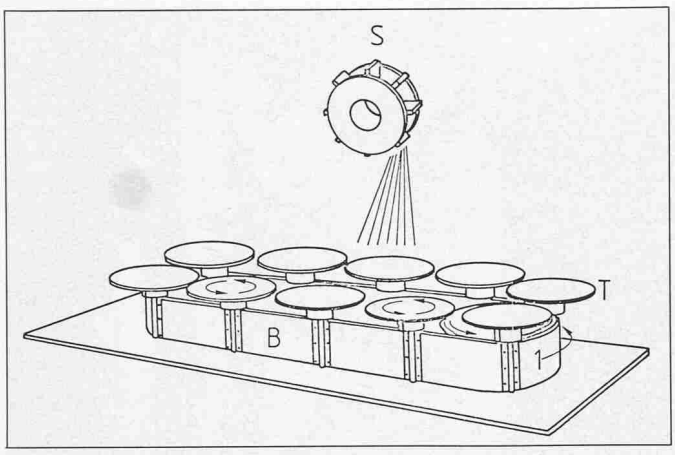


Bild 15. Arbeitsprinzip einer mit einem einzigen, auf dem Dach der Anlage aufgebauten Schleuderradausgerüsteten Maschine zum Peenen von Kupplungs- und Tellerfedern. Zum beidseitigen Peenen ist zweimaliger Durchgang unter dem Schleuderrad erforderlich mit Wenden der Feder zwischen dem ersten und dem zweiten Durchgang.
B: hochkant umlaufendes, breites, mit Armierungen verstärktes Tragband aus Gummi mit daran montierten Drehtellern. T: Drehteller für die Aufnahme der Werkstückhalter. 1: Drehrichtung des Tragbandes. 2: gradliniger Durchlauf der Drehteller unter dem Schleuderrad. S: Schleuderrad

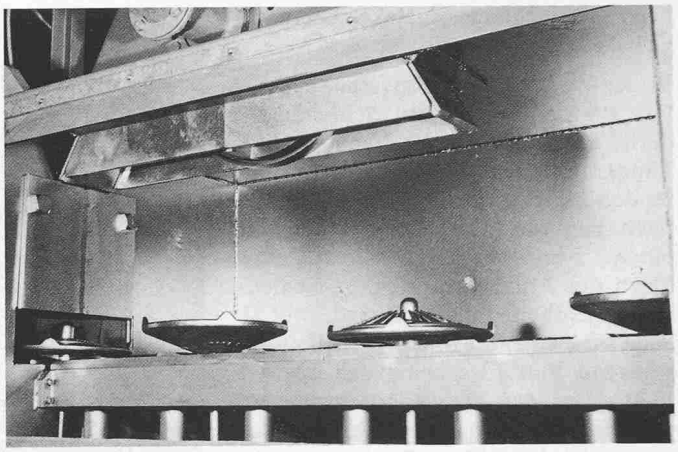


Bild 16. Strahlraum einer Maschine gemäss Arbeitsprinzip Bild 15 für das Shot-peenen von Kupplungsfedern mit gradlinigem Durchlauf der Werkstückhalter unter dem Schleuderrad. Die auf den Drehtellern sitzenden, abwechselnd konkaven und konvexen Werkstückhalter sind im Bild gut zu erkennen. Dem Bedienungsmann obliegt nicht nur das Beladen und das Wegnehmen, sondern auch das Wenden der Kupplungsfedern nach dem ersten Durchgang.
Bild: Alfred Gutmann, Gesell. für Maschinenbau, Hamburg

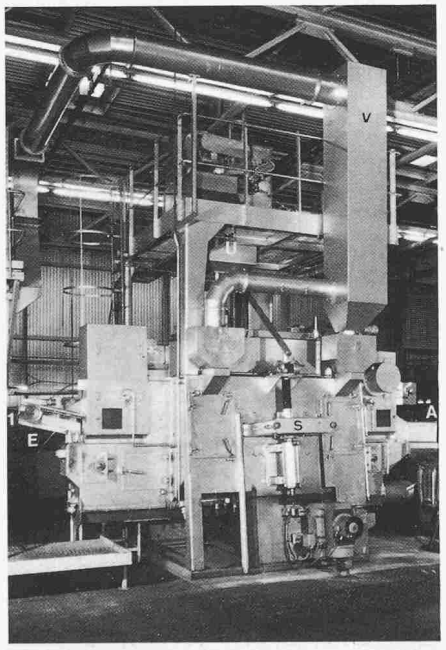


Bild 17. Anlage für das Shot-peenen von Kupplungsfedern im Durchlaufverfahren auf beiden Seiten gleichzeitig in einem einzigen Durchgang. Kontinuierliche Arbeitsweise gemäss Schema Bild 18A bei Durchlauf in senkrechter Stellung. Maschine ausgerüstet mit zwei an den beiden Längswänden des Maschinengehäuses angeordneten, horizontal strahlenden Schleuderrädern mit Antrieb durch je einen Motor von 18,5 kW Leistung. Ansicht von der Seite. Durchlaufrichtung von links nach rechts. Maschinengewicht 13 t. Produktion bis zu 1800 Kupplungsfedern in der Stunde.
1: Kupplungsfeder beim Eintritt in die Maschine. E: Eintrittsöffnung mit Führungsschienen auf der Beschickungsseite. S: Schleuderrad an der rechten Seitenwand der Maschine, in Durchlaufrichtung gesehen. U: Zwischensilo für das Strahlmittel am Becherwerksauslauf. V: Vorabscheider für die Rückgewinnung des Strahlmittels. A: Austrittsseite mit Führungsschienen für die beidseitig fertig gepeenten Kupplungsfedern
Bild: Maschinenfabrik Georg Fischer AG, Schaffhausen

eingebürgert, wobei in beiden Fällen Schleuderräder verwendet werden. Bei der einen Lösung werden die Federn in horizontaler Lage mittels eines mit Drehtellern ausgerüsteten Conveyors durch ein auf dem Dach der Maschine angeordnetes Schleuderrad von oben und somit einseitig im Durchlauf behandelt. Bild 15 veranschaulicht das hier angewandte Arbeitsprinzip, während Bild 16 das Innere des Strahlraums einer solchen Strahlanlage zeigt. Für die beidseitige Behandlung müssen in dieser Anlage die Federn zweimal unter dem Schleuderrad durchlaufen. Auf den Drehtellern sind die wechselweise aufeinanderfolgenden konkaven und konvexen Werkstückhalter zu sehen, in welche die Federn eingelegt werden. Der an der Vorderseite der Anlage stehende Bedienungsmann besorgt nicht nur das Be- und Entladen der Werkstükke, sondern auch das Wenden der Federn.

Viele Zulieferbetriebe benötigen möglichst leistungsfähige und rationell arbeitende Ausrüstungen. Es werden nicht nur hohe Produktionszahlen verlangt, sondern auch eine Behandlung im Durchlaufverfahren mit Peenen der Kupplungsfedern auf beiden Seiten in einem einzigen Durchgang. Vielfach wird gewünscht, die Anlage in eine kontinuierliche Fertigungsstrasse einzugliedern. Eine diesen Anforderungen gerecht werdende Maschinenanlage zeigt Bild 17. Sie ist mit zwei an den beiden Seitenwänden angeordneten, horizontal strahlenden Schleuderrädern von 65 mm Breite und 500 mm Durchmesser ausgerüstet mit einer Motorleistung von je 25 bis 30 PS je Rad. Die Anlage arbeitet nach dem Längsstrahlprinzip im Durchlaufverfahren und ist in der Lage, bis zu 1500 Kupplungsfedern in der Stunde beidseitig zu peenen. Wie aus dem Prinzipschema in Bild 18a hervorgeht, werden die Tellerfedern mittels einer mit Nocken versehenen Förderkette stehend durch den Strahlraum transportiert. Die untere Kante der Federn stützt sich auf ein Förderband ab, das im entgegengesetzten Sinn wie die obenliegende Förderkette läuft und auf diese Weise den Tellerfedern eine rotierende Bewegung beim Durchlauf vermittelt. Bild 18b vermittelt einen Blick ins Innere des Strahlraumes und zeigt die Transporteinrichtung mit den durchlaufenden Kupplungsfedern.

Strahlbehandlung von Torsionsstäben

In der Regel werden die Torsionsstäbe von den Automobilwerken in den eigenen Fabrikationsbetrieben hergestellt. Es werden denn auch dementsprechend grosse Serien aufgelegt, wobei je nachdem sehr unterschiedliche Stahlqualitäten Verwendung finden. Was die Formgebung anbelangt, sei auf Bild 5 weiter oben verwiesen.

Zur Ermittlung der Lebensdauer-Charakteristiken werden gerade, stabförmige Prüfmuster in der für die Herstellung vorgesehenen Stahlqualität mit gleichem Querschnitt und Stabdurchmesser in der oben bereits beschriebenen Weise bis zum Bruch geprüft. Die

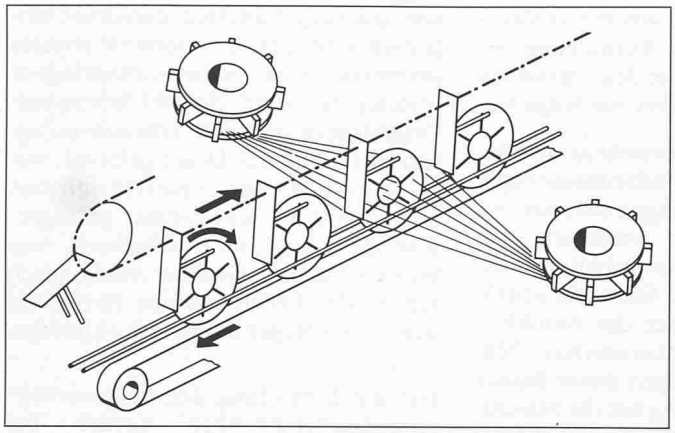


Bild 18A. Arbeitsprinzip der Anlage zum Peenen von Kupplungsfedern im Durchlaufverfahren auf beiden Seiten gleichzeitig und des in der Maschine gemäss Bild 17 angewandten Transportsystems, wobei die Tellerfedern mittels mit Nocken versehener Förderkette stehend durch den Strahlraum geführt werden (siehe Bild 18B)

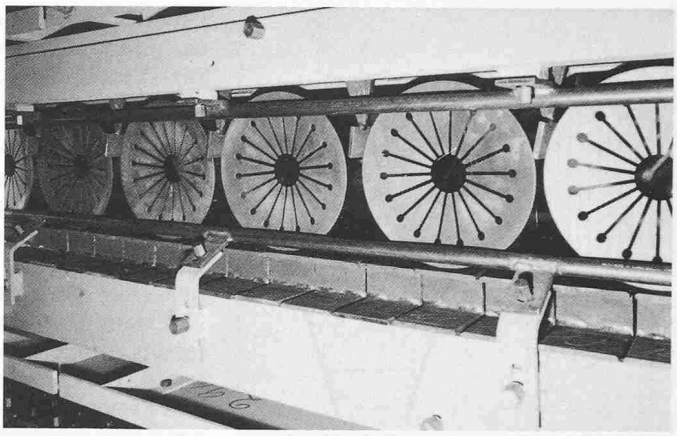


Bild 18B. Strahlraum der Maschine Bild 17 mit den auf dem Förderband stehend durchlaufenden und dabei eine rotierende Bewegung ausführenden Kupplungsfedern. Die Werkstücke werden auf beiden Seiten gleichzeitig durch die an den Längswänden horizontal montierten Schleuderräder gepeent.
Bild: Maschinenfabrik Georg Fischer AG, Schaffhausen

so ermittelten Werte können somit unmittelbar auf Torsionsstäbe mit den genau gleichen Charakteristiken übertragen werden.

In den Werkstätten wird das Shot-peenen von Torsionsstäben auf mit Schleuderrädern ausgerüsteten und nach dem Längsstrahl-Einstrang-Prinzip arbeitenden Maschinen durchgeführt, die je nach der verlangten Produktion mit zwei oder drei auf dem Dach des Maschinengehäuses aufgebauten Schleuderrad-Einheiten bestückt sind. Ein wesentliches Merkmal dieser Anlage besteht in der Anordnung der Vorschubrollen des Konveyors, die, wie aus Bild 19a hervorgeht, den Werkstücken nicht nur einen linearen Vorschub, sondern auch eine Drehbewegung um die eigene Achse vermitteln. Zu diesem Zwecke sind die doppeltkonischen Vorschubrollen des Konveyors im Grundriss schräg zur Vorschubrichtung gestellt, so dass die Torsionsstäbe in einem Durchgang sowohl allseitig als auch gleichförmig gepeent werden. Als Beispiel einer solchen Anlage zeigt Bild 19b eine mit drei hintereinander angeordneten Schleuderrädern von 19½″ Durchmesser bestückte Maschine, die somit für eine verhältnismässig grosse Produktionsleistung ausgelegt ist. Bei dieser Disposition decken sich die Längsachsen der Strahlbilder der drei Schleuderräder. Die benötigten Torsionsstäbe haben, was den zu peenenden zylindrischen Teil des Werkstückes anbelangt, einen Durchmesser, der wesentlich kleiner ist als das Strahlbild eines normalen Schleuderrades von z. B. 65 mm Breite. Die Anlage in Bild 19b wurde deshalb mit sogenannten schmalen Rädern von 1⅝″ Breite ausgerüstet, von denen jedes durch einen Motor von 20 PS Leistung angetrieben wird. Das Strahlmittel wird durch eine oberhalb der Räder angeordnete Förderschnecke den Einlauftrichtern der Räder zugeführt. Auf dem Bild ist auch die Antriebsseite des Konveyors mit den schräg zur Längsachse der Anlage stehenden doppeltkonischen Förderrollen samt den zugehörenden Keilriemenantrieben zu sehen.

Auch bei der Verwendung schmaler Schleuderradbauarten mit etwa 40 mm Breite bleibt das Missverhältnis zwischen dem Durchmesser der zu strahlenden Torsionsstäbe und der Breite des Strahlbildes bestehen. Es ergibt sich zwangsläufig eine schlechte Ausnützung der zur Verfügung stehenden Strahlleistung. Hinzu kommt noch ein

Bild 19A. Arbeitsprinzip einer mit zwei auf dem Dach des Maschinengehäuses aufgebauten Maschine zum Peenen von Torsionsstäben im Durchlaufverfahren, wobei der mit doppeltkonischen, schräg zur Vorschubrichtung angeordneten Rollen ausgerüstete Konveyor den Werkstücken sowohl eine Drehbewegung um die Längsachse als auch den linearen Transport durch die Anlage sicherstellt

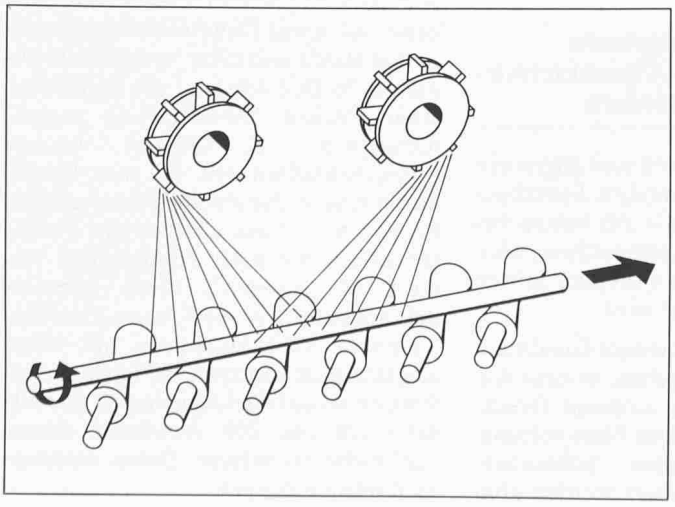
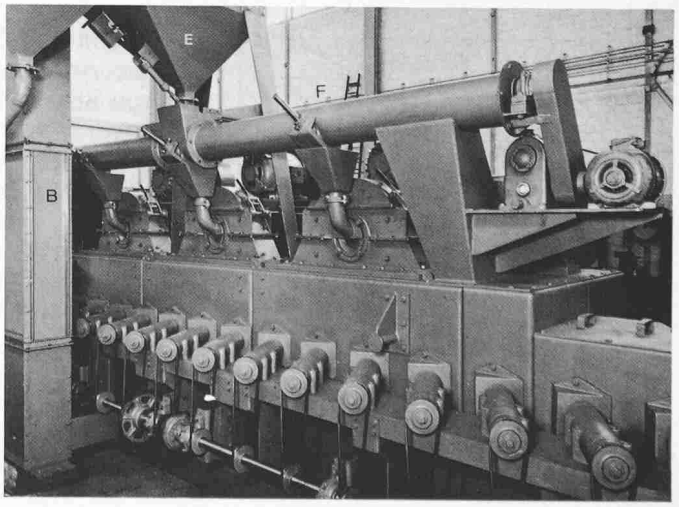


Bild 19B. Kontinuierlich nach dem Durchlaufverfahren arbeitende Anlage zum Peenen von Torsionsstäben, ausgerüstet mit drei auf dem Maschinendach hintereinander angeordneten Schleuderrädern von je 1⅝″ Breite und 19½″ Durchmesser, jedes durch einen Motor von 20 PS Leistung angetrieben. Arbeitsprinzip siehe Bild 19A. Durchlaufrichtung von rechts nach links. Ansicht von der Antriebsseite der doppeltkonischen Vorschubrollen des Transportkonveyors.
B: Becherwerk zur Hochförderung des Strahlmittels. E: Strahlmittelsilo am Auslauf des Kaskadenabscheiders. F: horizontale Förderschnecke oberhalb der Schleuderräder für die Zuführung des Strahlmittels zu den Einlauftrichtern der Schleuderräder.
Bild: Maschinenfabrik Graber + Wening AG, Neftenbach (ZH)



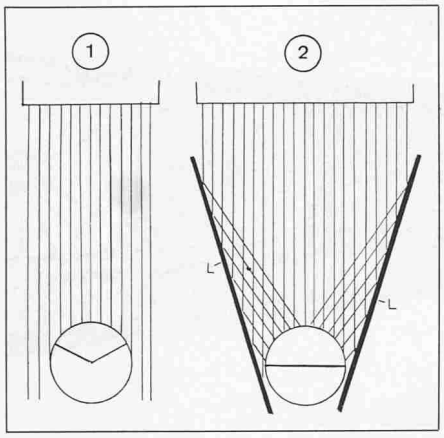


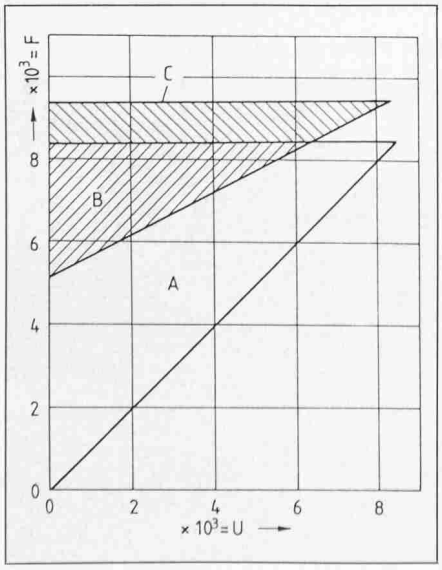
Bild 20. Schematische Darstellung der Wirkungsweise des Strahl-Leitplatten-Systems der Maschinenfabrik Georg Fischer zur besseren Ausnützung der Strahlleistung von Schleuderrädern bei der Behandlung von Rundmaterial im Durchlaufverfahren.
Links: Strahlausnützung bei Verwendung eines «schmalen» Schleuderrades von nur 1⅝″ Breite (etwa 41,4 mm).
Rechts: Strahlausnützung bei Schleuderrad von 65 mm Breite unter Verwendung von Strahl-Leitplatten.

weiterer ungünstiger Umstand. Wie in Bild 20 (links) zu sehen, treffen in den Randzonen, bedingt durch den runden Querschnitt der Werkstücke, die Schrotkörner mit einem nach aussen immer ungünstiger werdenden Aufprallwinkel auf die zu behandelnde Oberfläche, was eine weitere zusätzliche Einbusse bei der Ausnützung der zur Verfügung stehenden Strahlleistung des Schleuderrades zur Folge hat.

Das gleiche Problem besteht grundsätzlich auch für Entzunderungsanlagen von Draht und Stangenmaterial im Durchlaufverfahren, wiederum bedingt durch das Missverhältnis zwischen der Breite des Schleuderstrahls und dem Durchmesser des durchlaufenden, runden, zu entzundernden Materials. Für Strahlanlagen dieser Bauart und Zweckbestimmung hat die Maschinenfabrik Georg Fischer in Schaffhausen eine Lösung entwickelt, bei der mit Hilfe von Strahlleitplatten die ganze Breite des vom Schleuderrad abgeworfenen Schleuderstrahls auf die Oberfläche des Rundmaterials gerichtet werden kann. Das diesbezügliche Arbeitsprinzip ist in Bild 20 (rechts) dargestellt. Mittels Leitplatten wird jetzt die Hälfte des Umfangs des durchlaufenden Stangenmaterials erreicht. Wie aus der Skizze hervorgeht, ergibt sich somit ein aktiver Strahlumhüllungswinkel bis zu 180° an der Oberfläche des runden Querschnittes. Die Leitplatten sind verstellbar, so dass der Anstellwinkel verändert und das System ohne Schwierigkeiten dem Durchmesser der zu strahlenden Werkstücke angepasst werden kann. Diese Lösung ergibt einen wesentlich besseren Bestrahlungswirkungsgrad, aber auch die Strahlleistung der Schleuderräder wird erheblich besser ausgenützt [8]. Selbstverständlich lässt sich ein solches Strahl-Leitplatten-System auch bei Maschinen zum Peenen von Torsionsstäben anwenden.

Was die verschiedenen Abhängigkeiten und Charakteristiken anbelangt, so sei auf die Angaben in der Literatur verwiesen [9]. Die Entwicklung eines solchen Leitplattensystems wurde erst durch die Verwendung neuer, hoch verschleissfester Werkstoffe möglich.

Bild 21. Goodman-Diagramm über die für Schraubenfedern aus thermisch vorbehandeltem Stahldraht nach dem Shot-peenen höchstzulässigen Druckspannungen, aufgestellt für die Stahlsorten: A.S.T.M. A-230-41 und A.S.T.M. A-232-41. Gültig für Drähte mit einer Stärke von 0,207″ und feiner (etwa 5,26 mm Durchmesser).
A: Gebiet der für nicht gepeentes Drahtmaterial mit Sicherheit zulässigen Druckspannungen (Area of safe stress range material not shot blasted). B: Gebiet der für nach dem Shot-peening-Verfahren behandeltes Material zusätzlich möglichen Druckspannungen (Area of additional stress possible due to shot blasting). C: höchstes durch Shot-peening erzielbares Resultat. U: Druckspannungen in kg/cm² bereits vor der Shot-peening-Behandlung vorhanden. F: Druckspannungen in kg/cm² nach Beendigung der Shot-peening-Behandlung.



Das Goodman-Diagramm Lebenserwartungs-Charakteristiken von Schraubenfedern

Schrauben-Druckfedern sind allgemein die am meisten verwendete Federbauart. Es dürfte auch die am besten bekannte Shot-peening-Behandlung sein, die ja bereits seit etwa dreissig Jahren mit Erfolg angewendet wird.

In Bild 21 ist das sogenannte Goodman-Diagramm wiedergegeben, woraus Angaben über die höchst zulässige Druckspannung bei nach dem Shot-peening-Verfahren behandelten Schrauben-Druckfedern entnommen werden können, die aus gehärtetem Stahldraht hergestellt sind (greater allowable stresses permitted on shot peened coil springs of pretempered wire). Sowohl Schrauben-Druckfedern als auch Schrauben-Zugfedern werden aus Draht gefertigt, wobei je nachdem sehr unterschiedlichen Stahlqualitäten zum Einsatz gelangen. Bild 22 zeigt die Formgebung von Schraubenfedern in einer automatisch arbeitenden Federmaschine. Es handelt sich in der Regel um eine Kaltformgebung.

Für die Ermittlung der Lebenserwartungs-Charakteristiken werden bei Schraubenfedern Muster der für die Herstellung verwendeten Drahtqualität bis zum Bruch geprüft. Bei dieser Prüfmethode handelt es sich um gerade, stabförmige Prüfmuster, die aus der gleichen Stahlqualität bestehen. An geraden Drähten ermittelte Werte lassen sich nicht ohne weiteres auf Schraubenfedern gleicher Drahtsorte und gleichen Drahtdurchmessers übertragen. Zurzeit wird meistens der von *Göhner* [10] abgeleitete k-Faktor für die Umrechnung benutzt, der jedoch keine Rücksicht auf den Eigenspannungszustand der Schraubenfedern nimmt, sondern nur das Verhältnis der rechnerischen Höchstspannung in der Feder mit dem Wickelverhältnis w zur rechnerischen Höchstspannung im geraden Draht angibt. Die aus dem Fehlen einer brauchbaren Umrechnungsmethode sich ergebenden Nachteile sind bekannt [11]. In diesem Zusammenhang ist zunächst in Bild 23a eine Lebenserwartungs-Charakteristik für gerade Probestäbe aus Chrom-Vanadin-legiertem Ventilfederdraht von 4 mm Durchmesser wiedergegeben.

Dauerschwingungsverhalten

Die Abklärung solcher grundlegenden Zusammenhänge setzt den Vergleich von Prüfungen der Dauerstandfestigkeit an geraden Drahtmustern mit entsprechenden Dauerstandsversuchen bis zum Bruch an Schraubenfedern voraus, denn nur unter Dauerschwingungsverhalten lassen sich diese Verhältnisse abklären. In Bild 23b sind die Ergebnisse einer solchen Untersuchung zusammengefasst [12]. Geprüft wurden Schraubenfedern mit 4,5 mm Drahtdurchmesser und einem Wickelverhältnis $6 < w < 7$ aus unlegiertem Ventilfederdraht mit einer Zugfestigkeit von etwa 145 kg/mm², sowie überdies Schraubenfedern aus Chrom-Vanadin-legiertem Ventilfederdraht mit einer Zugfestigkeit von etwa 165 kg/mm². Im übrigen sei auf die Legenden zu den Bildern 20a und 20b verwiesen, denen zahlreiche technische Daten entnommen werden können.

Schraubendruck- und Schraubenzugfedern

Beim Peenen von Schraubenfedern liegen jedoch nicht nur die dargelegten grundsätzlichen Schwierigkeiten vor, ist doch die praktische Durchführung dieses Präzisionsverfahrens mit einer Reihe von Problemen verbunden, auf die hier teilweise eingegangen werden soll. Es muss zunächst zwischen Schraubendruck- und Schraubenzugfedern unterschieden werden. Bei den letzten liegen im normalen, entspannten Zustand die Drahtwindungen zumeist eng beieinander. In den üblichen, mit Schleuderrädern bestückten, nach dem Durchlaufprinzip arbeitenden Shot-peening-Maschinen bestreichen zwar die Schleuderstrahlen intensiv die Federaussenseite. Bei wirklich dicht aneinanderstehenden Drahtwindungen werden aber die tiefliegenden Rundungen der Drahtwindungen ungenügend vom Strahlmittel erreicht, was ganz besonders für die einander berührenden Windungsflächen zutrifft. Von einer einwandfreien Durchführung des Peening-Verfahrens kann nicht mehr gesprochen werden. Eine wirklich einwandfreie Methode zum allseitigen Peenen der Drahtwindungen einer solchen Zugfeder einschliesslich des Federinnern besteht in einer Behandlung im *gestreckten* Zustand oder, wie der Fachausdruck lautet, *im vorgespannten Zustand*. Durch das Strecken ergeben sich genügend Abstände zwischen den Drahtwindungen, so dass der Strahl auch das Federinnere einwandfrei bestreichen kann. Es handelt sich um ein verhältnismässig aufwendiges Verfahren. Gelegentlich werden deshalb die Innenflächen von Schraubenzugfedern nach dem Druckluftstrahlverfahren gepeent. Hierzu wird der Freistrahlschlauch mit gekrümmter Strahldüse langsam in die Schraubenfeder eingeführt, während die Feder sich um die Längsachse dreht. Die Strahldüse muss dabei mit möglichst gleichförmiger Geschwindigkeit vorgeschoben werden. Es empfiehlt sich, die Behandlung in zwei Etappen durchzuführen, durch Einfahren von rechts und von links, um eine möglichst gleichförmige Behandlung zu erreichen. Werden bei Schraubenzugfedern aus irgendeinem Grunde die Innenflächen der Windungen nicht gepeent, so werden jeweils mindestens die Lastösen behandelt.

Bei Schraubendruckfedern hingegen stehen im allgemeinen die Drahtwindungen so weit auseinander, dass der Strahl der Schleuderräder der Shot-peening-Anlage auch das Federinnere bestreichen kann. Besonders kleine Schraubenfedern, die zu geringe Abmessungen aufweisen, um noch «individuell» behandelt zu werden, erhalten gelegentlich eine Peening-Behandlung in einer mit einem muldenförmigen Förderband ausgerüsteten und mit einem Schleuderrad bestückten Trommelmaschine. Die kleinen Federn werden in ganzen Chargen in die muldenförmige Ausbuchtung des vorzugsweise aus Gummi bestehenden Förderbandes gegeben. Im Betrieb ergibt sich durch die Bewegung des Bandes ein stetes Rollen, Überpurzeln und Wenden der Federn, das eine mehr oder weniger allseitige Behandlung aller Aussenflächen der Werkstücke herbeiführen soll. Dieses Ziel wird in der Praxis nur sehr bedingt erreicht, vor allem weil in einer Trommelmaschine dieser Art keine angemessene Kontrolle der Strahlintensität nach Almen-Test über die ganze Charge durchgeführt werden kann. Eine solche ist aber bei jeder Peeningbehandlung zur Kontrolle unerlässlich, um ein einwandfreies Ergebnis zu erzielen. Dies gilt ganz allgemein für das Peenen aller Arten von Federn. Trommelmaschinen, die mit einem aus Stahllamellen zusammengesetzten Förderband ausgerüstet sind, eignen sich zusätzlich für das Peenen wenig, da die Gefahr der Beschädigung der unter Druckvorspannung stehenden Materialschichten besteht.

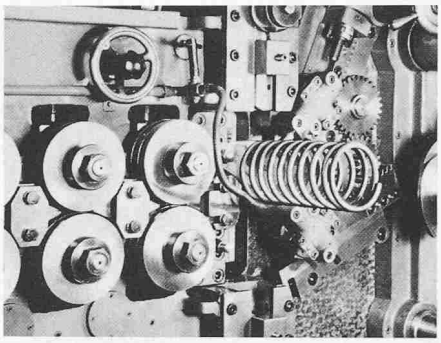


Bild 22. Formen einer Schraubendruckfeder in einer automatisch arbeitenden Federnformmaschine für Drahtstärken bis 14 mm Drahtdurchmesser.
Bild: Thür + Co, Federfabriken, Dietlikon-Zürich

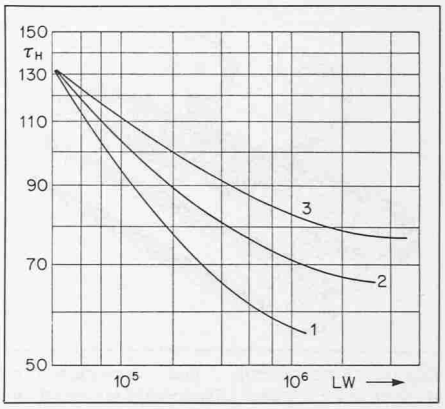


Bild 23A. Lebenserwartungs-Charakteristik für Schraubenfedern, ermittelt auf indirektem Wege durch Prüfung auf Dauerstandfestigkeit von geraden Stäben aus Chrom-Vanadin-legiertem Ventilfederdraht mit 4 mm Drahtstärke und mit einer Zugfestigkeit von etwa 165 kg/mm². Unterspannung τ_u = 10 kg/mm² [11].
1: ungepeenter Draht. 2: Drahtmaterial mit Stahlschrot S-230 gepeent. 3: Drahtmaterial mit Stahlschrot S-230 gepeent und anschliessend vorgesetzt. τ_H: Hubspannung in kg/mm². LW: Anzahl Lastwechsel bis zum Bruch

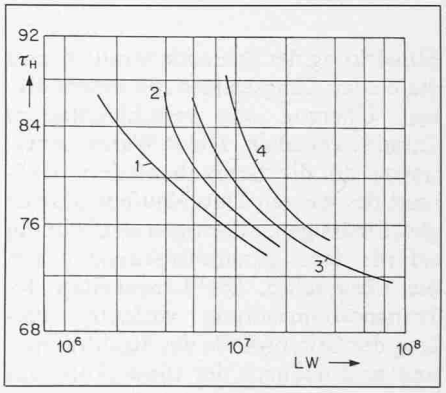


Bild 23B. Lebenserwartungs-Charakteristik erstellt auf direktem Wege durch Prüfung des Dauerschwingungsverhaltens von Schraubendruckfedern aus Draht mit einem Durchmesser von 4,5 mm für eine Unterspannung τ_u von 15 kg/cm² [11].
1: Schraubendruckfedern aus unlegiertem Ventilfederdraht mit einer Zugfestigkeit von etwa 145 kg/mm², sodann gepeent und warmgesetzt. 2: Schraubendruckfedern aus unlegiertem Ventilfederdraht mit einer Zugfestigkeit von etwa 145 kg/mm², sodann unter Vorspannung gepeent und anschliessend warmgesetzt. 3: Schraubendruckfedern aus Chrom-Vanadin-legiertem Ventilfederdraht mit einer Zugfestigkeit von 165 kg/mm², sodann kugelgestrahlt und anschliessend warmgesetzt. 4: Schraubendruckfedern aus Chrom-Vanadin-legiertem Ventilfederdraht mit einer Zugfestigkeit von 165 kg/mm², sodann unter Vorspannung gepeent und anschliessend warmgesetzt. τ_H: Hubspannung in kg/mm². LW: Anzahl Lastwechsel bis zum Bruch

Anlagen

Im *werkstattmässigen* Betrieb werden Schraubenfedern normaler Grösse in mit Schleuderrädern ausgerüsteten und nach dem Längsstrahl-Einstrang-Prinzip arbeitenden Ausrüstungen nach dem Shot-peening-Verfahren behandelt. Diese Maschinen sind in der Regel mit zwei auf dem Dach der Anlage aufgebauten Schleuderradeinheiten bestückt, die so angeordnet sind, dass die Schleuderstrahlen gegeneinander konvergieren und so besser durch die Abstände zwischen den Drahtwindungen ins Innere der Schraubenfedern eindringen können. Die schematische Darstellung in Bild 24 vermittelt einen Einblick in den grundsätzlichen Aufbau von Peeningmaschinen für diese Federart sowie in deren Arbeitsweise. An der Beladestation legt der Bedienungsmann die Schraubenfedern eine nach der anderen auf den Anfang der beiden Längswalzen, wo diese von den Querstäben der Transporteinrichtung übernommen und durch den Strahlraum bis zum Ende der Anlage befördert werden. Zum Schutz gegen die ständige

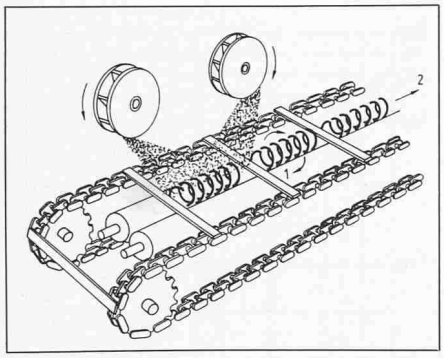


Bild 24. Arbeitsprinzip und grundsätzlicher Aufbau von nach dem Längsstrahl-Einstrang-Prinzip arbeitenden, mit zwei Schleuderrädern ausgerüsteten Maschinen zum Peenen von Schraubenfedern im Durchlaufverfahren.
1: Die Drehbewegung der beiden Längswalzen überträgt die zur allseitigen gleichmässigen Shot-peening-Behandlung erforderliche Rotationsbewegung an die Schraubenfedern. 2: Von den Querstäben der Transporteinrichtung mitgenommen, laufen die Schraubenfedern durch die Maschine bis zur Endstation

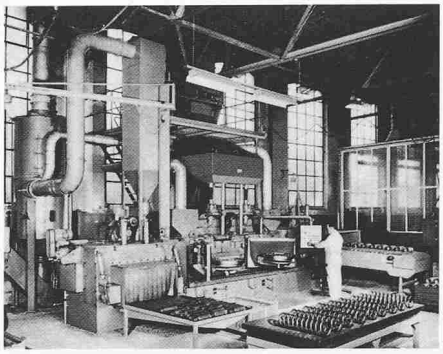


Bild 25. Gesamtansicht einer Anlage für das Peenen von Schraubendruckfedern in einer Federnfabrik mit vielseitigem Produktionsprogramm. Arbeitsprinzip gemäss Schema Bild 24, ausgelegt für Schraubenfedern mit Aussendurchmesser von 70 bis 300 mm und Federlängen von 150 bis 1100 mm, bestückt mit zwei Schleuderrädern von 65 mm Breite und 500 mm Durchmesser und angetrieben von je einem Elektromotor von 18 kW. Links Beladestation, rechts Austritt der fertig gepeenten Schraubenfedern. In der Anlage können mittels einer Hilfseinrichtung auch Spiralfedern behandelt werden (siehe Bild 25A).
Bild: Maschinenfabrik Georg Fischer AG, Schaffhausen

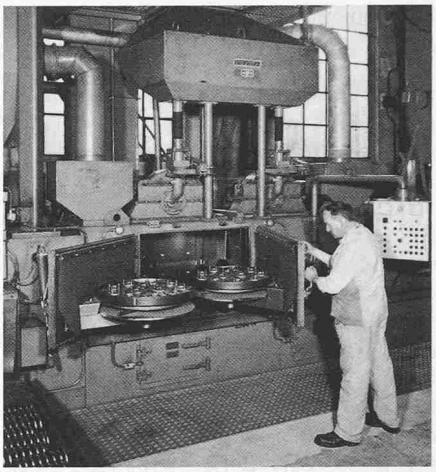


Bild 25A. Zusatzeinrichtung für das Shot-peenen von Spiralfedern in der Durchlaufanlage zur Behandlung von Schraubenfedern gemäss Bild 25 und bestehend aus zwei an der Vorderseite der Maschine eingebauten Drehtischen mit je 600 mm Durchmesser, die wechselweise in die Strahlzone unter eines der beiden Schleuderräder eingeschwenkt werden können.
Bild: Maschinenfabrik Georg Fischer AG, Schaffhausen

Einwirkung der Schleuderstrahlen sind die beiden Längswalzen mit einem dicken Überzug aus verschleissfestem Gummi versehen. Diese Walzen übertragen an die Schraubenfedern während des ganzen Durchlaufens die zur gleichmässigen, allseitigen Behandlung erforderliche Rotationsbewegung um die Längsachse. Die Längsketten der Transporteinrichtung verlaufen entlang der Seitenwände des Strahlraumes und sind dadurch der Einwirkung des Strahlmittels und den dadurch verursachten Abnützungen weitgehend entzogen. Am Auslauf der Anlage erfolgt die Entnahme der fertig gepeenten Schraubenfedern manuell über eine Auslaufrutsche oder, wo grosse Serien zu behandeln sind, mit Hilfe automatischer Entladevorrichtungen. Als Beispiel einer gemäss Bild 24 ausgelegten Shot-peening-Anlage zeigt Bild 25 eine Maschine für die Behandlung von Schraubenfedern mit einem Aussendurchmesser von 70 bis 300 mm sowie mit einer Federlänge von 150 mm bis 1100 mm. Jedes der beiden auf dem Dach des Maschinengehäuses aufgebauten Schleuderräder ist mit einem Antriebsmotor von 18 kW Leistung ausgerüstet. Die Durchlaufgeschwindigkeit kann im Regelverhältnis 1:2,5 zwischen v = 1,5 bis 3,75 m/min eingestellt werden. Gearbeitet wird mit kugeligem Stahlschrot. In Anbetracht des breit gefächerten Fabrikationsprogramms und um das Wechseln der Korngrösse des Strahlmittels weitgehend einzuschränken, wurde jedes der beiden Schleuderräder mit einer eigenen Drehzahl-Regulier-Einrichtung für die stufenlose Verstellung der Raddrehzahl im Bereich von 1500 bis 2250 t/min versehen. So kann bei gleichbleibender Strahlmittelkorngrösse die Abwurfgeschwindigkeit des Korns und somit die Strahlintensität der Behandlung verändert und den jeweiligen Anforderungen angepasst werden.

Um *zusätzliche* Verwendungsmöglichkeiten für die Anlage zu schaffen, wurde auch das Peenen von Spiralfedern mit einem Durchmesser von 200 mm bis 600 mm berücksichtigt, eine Behandlung, die auf zwei durch Elektromotoren angetriebenen Drehtischen durchgeführt wird, die wechselweise in die Strahlzone unter den Schleuderrädern eingeschwenkt werden. Beim Peenen von Schraubenfedern hingegen befinden sich beide Drehtische ausserhalb des Strahlraumes vor der Vorderwand der Maschine (Bild 25). Die zugehörige Staubfilteranlage benötigt eine Absaugleistung von 120 m^3/min. Das Gewicht dieser Peening-Maschine beträgt 15 000 kg, ohne Auskleidung mit Schleissschutzplatten aus Hartmanganstahl, die zusätzlich fast 2000 kg wiegen.

Bild 26 zeigt das Innere einer anderen Shot-peening-Maschine, bei der besonders gut die Auskleidung mit Verschleissschutzplatten zu sehen ist. Es handelt sich um eine Anlage englischer Bauart, die ebenfalls mit zwei oben angeordneten Schleuderrädern ausgerüstet ist. Die Anlage in Bild 27 wurde für das Peenen von besonders grossen Schraubendruckfedern gebaut. Es handelt sich um Bauelemente des Stabilisator-Systems von interkontinentalen Raketen, die eine Länge von 1524 mm und einen Aussendurchmesser von 609,6 mm aufweisen, bei einem Stückgewicht von etwa 544 kg je Feder. Es soll sich um die *grössten* je gepeenten Schraubenfedern handeln, wobei überdies eine Erhöhung der Dauerstandfestigkeit von 1000 Prozent erreicht worden sein soll. Die Anlage zum Peenen dieser Schraubenfedern ist mit zwei auf dem Dach der Anlage aufgebauten Schleuderrädern von je 40 PS Antriebsleistung ausgerüstet und arbeitet ebenfalls nach dem in Bild 24 dargestellten Prinzip. In Anbetracht des grossen Gewichtes werden die Federn einzeln mittels Hebezeug auf die sich drehenden Walzen in der als Vorbau ausgebildeten Beladestation der Anlage eingelegt. Alle weiteren Behandlungsstufen laufen automatisch ab, wobei eine mit Mitnehmerfingern ausgerüstete Förderkette den Transport bis zum Entladeende übernimmt. Hier wirft eine nach dem Druckluftsystem arbeitende Vorrichtung die fertig behandelte Feder aus. Die Antriebsstation des Kettenförderers und die Drehbewegung der Tragwalzen sind mit Vorrichtungen für die stufenlose Geschwindigkeitsverstellung ausgerüstet. Vorgeschrieben ist eine Strahlintensität von 0,25 mm bis 0,3 mm mit Almen-Test-Prüfplättchen Typ C bei einem Überdeckungsgrad von mindestens 98 Prozent, wobei eine Produktion von 15 bis 20 Stück in der Stunde erreicht wird unter Verwendung von Stahlschrot S 550 (Nennkorngrösse 1,4 mm). Die beiden Schleuderräder, angetrieben von je einem 40-PS-Motor, werfen zusammen 900 kg Strahlmittel in der Minute auf die zu behandelnden Flächen ab.

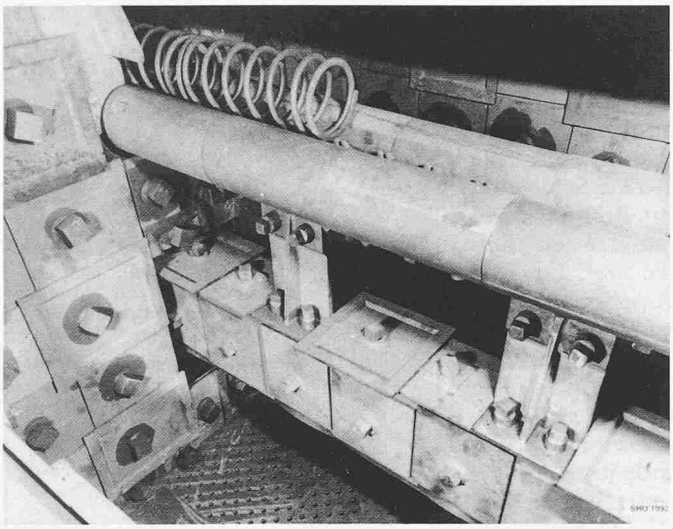


Bild 26. Strahlraum einer Shot-peening-Anlage zur Behandlung grosser Schraubendruckfedern gemäss Arbeitsprinzip Bild 24, mit der bei Maschinen dieser Art üblichen sorgfältigen Auskleidung mit Schleissschutzplatten aus einer besonders verschleissfesten Stahlsorte. Durchlauf der Federn von links nach rechts.
Bild: Spencer & Halstead Ltd. England/Pangborn Europe s.p.a. (a Kennecott Company), Caronno Pertusella (It)

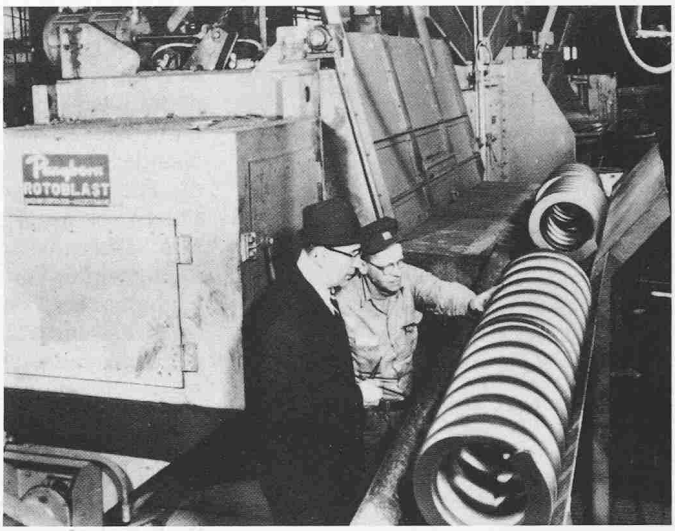


Bild 27. Anlage amerikanischer Bauart für das Shot-peenen sehr grosser Schraubendruckfedern von 24″ Durchmesser und 60″ Federlänge für das Stabilisator-System von USA-Interkontinental-Raketen. Gewicht der Federn: 544 kg je Stück, Anlage ausgerüstet mit zwei auf dem Dach der Maschinenanlage aufgebauten Schleuderrädern mit einer Antriebsleistung von je 40 PS je Rad bei einer Produktion von etwa 15 bis 20 Schraubenfedern in der Stunde.
Bild: The Pangborn Division (a Kennecott Company), Hagerstown, Maryland (USA)

Shot-peening-Anlagen in kontinuierlich arbeitenden Fertigungsstrassen

Die bei *Schraubenfedern* in der Automobilindustrie und ihren Zulieferbetrieben verhältnismässig oft vorkommende Fertigung in grossen Serien begünstigt in hohem Masse für die Herstellung die Verwendung kontinuierlich arbeitender Strassen. Es muss somit die Shot-peening-Anlage entsprechend angepasst und in die kontinuierlich arbeitende Maschinenreihe eingegliedert werden. Ausgehend vom Draht als Rohmaterial umfassen solche Gesamtanlagen im allgemeinen folgende ineinandergreifende *Fertigungsstufen:*

Formgebung

Bei grösseren Stückabmessungen erfolgt diese mit warmem Material. Die Anlage besteht aus einem Wickelofen, einem Stabzuführungsapparat und einem Wickelautomaten, auf den meistens ein Härtebad und ein Anlassofen folgen. Bei kleineren Objekten, wie zum Beispiel bei Ventilfedern, wird hingegen zumeist die Formgebung auf kaltem Wege und somit ohne Wickelofen bevorzugt (Bild 22).

Shot-peening

Am Ende der Formgebung und nach der Wärmenachbehandlung wird zunächst eine Prüfung auf Rissbildung vorgenommen, und zwar ebenfalls im Durchlaufverfahren. Sodann folgt unmittelbar das Peenen der Federn in einer nach dem Längsstrahl-Einstrang-Prinzip arbeitenden Anlage. Auf die hiermit zusammenhängenden Probleme und deren Lösung wird später am Beispiel einer für das Peenen von Automobil-Ventilfedern ausgelegten Anlage noch näher eingegangen.

Fertigstellung der Federn

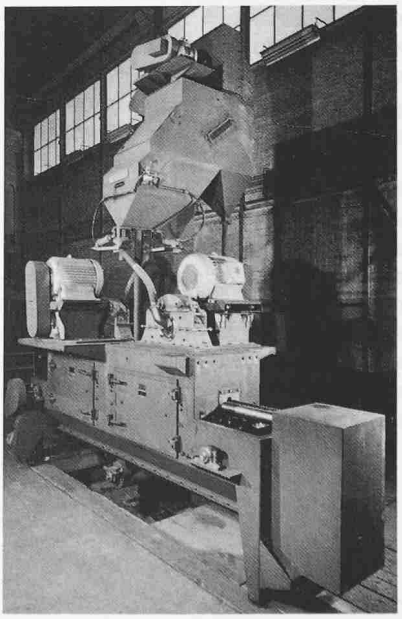
Nach dem Peenen folgt das Setzen der Federn, wobei ein Materialspeicher zwischengeschaltet werden muss. Das Setzen erfolgt im Durchlaufverfahren in einer automatischen Setzmaschine. Grössere Schraubenfedern erhalten vielfach als Oberflächenschutz eine Lackierung und durchlaufen nach dem Trocknen in einer Hängebahn noch eine automatische Prüfstation und eine selbsttätige Sortiereinrichtung.

Anlagen

In modernen Fertigungsstrassen für Federn sind alle an der Herstellung des Produkts beteiligten Aggregate mit Übergabestationen, einschliesslich der Verwendung von automatischen Setz- und Prüfstationen, miteinander verbunden und greifen somit ineinander über. Es werden nur noch wenige Arbeitskräfte benötigt, die ausschliesslich für die Überwachung der Gesamtanlage, für Materialtransporte usw. erforderlich sind. Alle Hilfs- und Verkettungsaggregate zwischen den einzelnen Maschinen können hier nicht erwähnt werden.

Damit keine Materialstockung entsteht, müssen alle Maschinen einer Fertigungsstrasse für Federn im gleichen Arbeitsrhythmus produzieren. Diese Forderung gilt auch für die Shot-peening-Ausrüstung. Es ist nicht einfach, diese Auflage zu erfüllen, müssen doch beim Peenen ausser dem Arbeitsrhythmus die vom Verfahren her vorgeschriebenen Spezifikationen für Strahlintensität nach Almen-Test, der Überdeckungsgrad usw. unter Beibehaltung der festgelegten Korngrösse eingehalten werden. Bild 28 zeigt eine Ferti-

Bild 28. Shot-peening-Maschine, bestimmt für die Eingliederung in eine kontinuierlich arbeitende Fertigungsstrasse zur Herstellung von Ventilfedern für den Automobilbau, ausgelegt für Federn von 20 bis 50 mm Durchmesser und maximal 80 mm Federnlänge. Arbeitsprinzip analog Bild 24, ausgerüstet mit zwei schmalen Schleuderrädern von je 1⅝″ Breite und 19½″ Durchmesser mit Antriebsmotoren von je 20 PS Leistung. Drehzahlverstellung der Schleuderräder zwischen 960 bis 2500 U/min.
Bild: Maschinenfabrik Graber + Wening AG, Neftenbach (ZH)



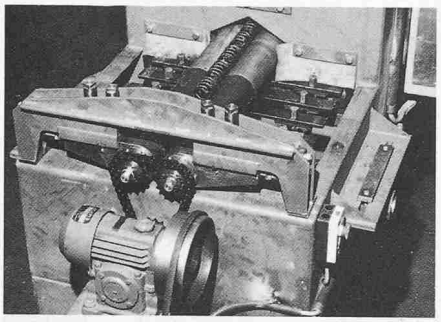


Bild 28A. Beladestation einer Shot-peening-Maschine bestimmt für eine Fertigungsstrasse zur Herstellung von Ventilfedern mit 20 bis 50 mm Durchmesser und mit bis zu 80 mm Federlänge. In der Abbildung ist die Übergabestation, welche die Ventilfedern in die Beladestation der Peening-Maschine einlegt, nicht zu sehen.
Bild: Maschinenfabrik Georg Fischer AG, Schaffhausen.

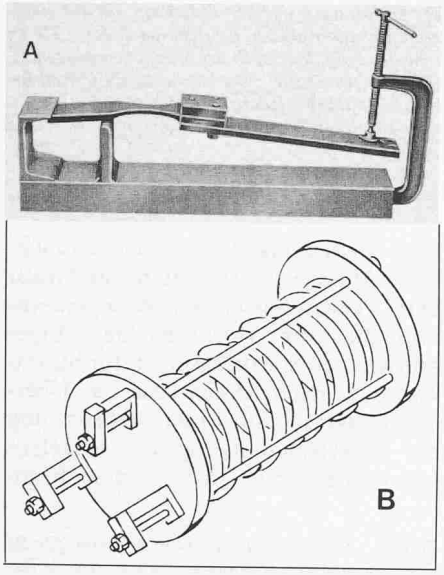


Bild 29. Hilfsvorrichtungen für das Peenen von Federn unter Vorspannung.
A: Einspannvorrichtung, in der die zu behandelnden Blattfedern gepeent werden
B: Einspannvorrichtung, in der Schraubendruckfedern im eingespannten Zustand gepeent werden

gungsstrasse zur Herstellung von Ventilfedern aus dem Automobilbau mit Shot-peening-Anlage. Es werden Schraubendruckfedern mit einer Länge von bis zu 80 mm maximaler Länge erzeugt, bei einem Aussendurchmesser von 20 mm bis 50 mm. Der grundsätzliche Aufbau und die Arbeitsweise entsprechen auch in diesem Falle dem Schema in Bild 21. Entsprechend den niedrigen Abmessungen dieser Ventilfedern haben die beiden sich drehenden Tragwalzen einen Aussendurchmesser von nur 100 mm und sind mit verschleissfesten Mänteln aus nitriertem Stahl von 67 Rc-Härte ausgerüstet. Um die Transportgeschwindigkeit an die Verhältnisse in den übrigen Maschinen der Fertigungsstrasse anzupassen, wurde der Regelbereich des Vorschubs auf ein Verhältnis von 1:5, und zwar im Bereich von v = 2 m/min bis zu v = 10 m/min verdoppelt. Um schmale, den Dimensionen der Ventilfedern entsprechende Strahlbilder zu erhalten, wurde die Peeninganlage mit zwei Schleuderrädern von nur 41,3 mm Breite und 495 mm Durchmesser ausgerüstet. Das Shot-peening-Verfahren verlangt das Einhalten der vorgeschriebenen Strahlintensität und Flächenüberdeckung bei den sehr unterschiedlichen Arbeitsgeschwindigkeiten der Fertigungsstrasse mit Verwendung der gleichen Strahlmittelkörnung. Um dieser Forderung gerecht zu werden, wurde jedes der beiden Schleuderräder mit einem Antriebsmotor von 20 PS und einer Vorrichtung für die stufenlose Verstellung der Raddrehzahl im Bereich zwischen 950 t/min und 2500 t/min ausgerüstet, damit durch Veränderung der Abwurfgeschwindigkeit die Strahlintensität der Behandlung den jeweiligen Anforderungen angepasst werden kann. Das Gewicht dieser Anlage beträgt etwa 7500 kg, die zugehörende Auskleidung mit Schleissschutzplatten aus Hartmanganstahl wiegt zusätzlich ungefähr 1250 kg. Die zur Entstaubung der Peeningmaschine erforderliche Staubfilteranlage wurde für eine Absaugleistung von 90 m³/min ausgelegt. Zur Ergänzung zeigt Bild 28a die Beladestation einer Peeningmaschine ähnlicher Bauart, die zur Behandlung von Ventilfedern mit sonst den gleichen Abmessungen für den Automobilbau ausgelegt wurde, jedoch sonst eine etwas geringe Produktionskapazität aufweist.

Shot-peening-Behandlung von vorgespannten Federn

Es handelt sich um eine Technik, die in den Vereinigten Staaten unter den Bezeichnungen *Stress-Peening* und *Strain-Peening* bekannt geworden ist. Bei ihr werden die Federn in vorgespanntem Zustand der Peening-Behandlung unterworfen. Es lässt sich auf diesem Wege die *Dauerstandfestigkeit* erhöhen. Was die Ergebnisse anbelangt, sei auf die Angaben in der Literatur verwiesen [13]. Peenen unter Vorspannung soll sich besonders gut bei Teilen anwenden lassen, die nach der Behandlung wiederholten Biege- oder Torsionsbelastungen unterworfen werden, was insbesondere für Blatt- und Schraubenfedern zutrifft. Die Vorspannung wird durch statische Belastung der Federn in der gleichen Richtung ausgeübt wie die Beanspruchung, die danach im eigentlichen Gebrauch auftreten wird.

Bild 29a veranschaulicht das bei der Vorspannung einer Blattfeder zur Anwendung kommende Grundprinzip. Die in die Hilfseinrichtung eingespannte Blattfeder wird unter statischer Vorspannung gepeent. Nach Beendigung der Peeningbehandlung wird die Hilfsapparatur entfernt. Die erzielte Verlängerung der Lebensdauer ist in der Regel wesentlich höher als beim normalen Shot-peenen. In Ergänzung zeigt Bild 29b eine Hilfseinrichtung zur Behandlung von Schraubendruckfedern unter Vorspannung nach dem Shot-peening-Verfahren. Was die Resultate anbelangt, wird auch hier auf die Angaben in der Literatur verwiesen [14].

Adresse des Verfassers: *J. Horowitz*, dipl. Ing. ETH, Winterthurerstr. 537, 8051 Zürich.

Literaturhinweise

[1] *Almen, J.O.* (1962): «Effect of Residual Stresses on Rolling Bodies». S.A.E., Reprint Nr. 147 A.

[2] *Fuchs, H.O. & Bickel, P.E.* (1963): «Shot Peening of Springs». Springs magazine, Vol. 2, Nr. 1: 16–20.

[3] *Zimmerli, F.P.* (1952): «Heat Treating, Setting and Shot Peening of Mechanical Springs». Metal Progress.

[4] *Horowitz, J.* (1978): «Das Shot-peening-Verfahren und die Anforderungen an die Anlagentechnik». Schweiz. Bauzeitung, Heft 51/52: 999–1010.

[5] Siehe Bilder 15 und 16 in cit. loc. [4], Seite 1008 und 1009.

[6] *Muhr, K.-H.* (1968): «Einfluss von Eigenspannungen auf das Verhalten von Federn aus Stahl unter schwingender Beanspruchung. Bericht des Werkstoffausschusses des VDEh». Stahl und Eisen 88, Nr. 26: 1449ff.

[7] *Muhr, K.-H.* cit. loc. [6]. Stahl und Eisen 88, Nr. 26: 1454.

[8] *Ehrat, R.* (1974): «Wirtschaftliches Drahtentzundern nach dem mechanischen Schleuderstrahlverfahren». Drahtwelt 80, Nr. 4 und Nr. 5: 127–128, 176–179, insbesondere Bild 11, S. 126.

[9] *Ehrat, R.* (1979): «Draht-, Stahl- und Profilentzunderung durch Schleuderstrahlen – ein technisch beherrschtes und kostengünstiges Verfahren». Draht, Jg. 30, Heft Nr. 5. Es wird besonders auf die Bilder 10 und 11 verwiesen mit Angaben über verschiedene Zusammenhänge.

[10] *Göhner, O.* (1930): Ing. Archiv, Bd. 1: 619–644.

[11] *Huhnen, J.* (1967): Draht, Bd. 18: 592–612.

[12] *Muhr, K.-H.* (1970): «Einfluss von Eigenspannungen auf das Dauerschwingungsverhalten von Federn aus Stahl. Bericht des Werkstoffausschusses des VDEh». Stahl und Eisen 90, Nr. 12: 631–636.

[13] *Straub, J.C. & May, D. jr.* (1949): «Stress Peening». The Iron Age, Vol. 66: 66–70.

[14] *Oicles, C.W. & Landecker, F.K.* (1950): «Multiply Spring Life without Changing Design». The Iron Age.