Das "Shot-peening"-Verfahren: Grundlagen und Verwendung von Glas-Strahlperlen

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

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **95 (1977)**

Heft 19

PDF erstellt am: **26.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-73367

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-peening»-Verfahren

Grundlagen und Verwendung von Glas-Strahlperlen

Von **J. Horowitz**, Zürich

Die Glasindustrie stellt schon seit langer Zeit Glasperlen gewöhnlicher Qualität her, wie zum Beispiel *Isolier- und Einschmelzperlen* für die Elektrotechnik, *Nähperlen* usw. Aber erst etwa Mitte der fünfziger Jahre wurden Verfahren entwickelt, die es gestatten, zu annehmbaren Preisen genaue kugelförmige Glasperlen in den Qualitäten und feinen Abmessungen zu fertigen, wie sie zur Verwendung in Strahlanlagen benötigt werden. Im deutschen Sprachgebiet verwendet man gelegentlich auch die Bezeichnung «Micro-Glas-Shot», während in den USA und in England der Ausdruck «Glass Beads» gebräuchlich ist. In Frankreich spricht man von «microbilles de verre» oder auch von «microsphères de verre».

Bevor auf die Verwendungsmöglichkeiten dieses neuartigen Strahlmittels eingegangen wird, müssen die Grundlagen des Verfahrens dargelegt werden.

Feinbearbeitungsverfahren für Werkstückoberflächen

Es handelt sich um ein Fein-Bearbeitungsverfahren, mit dem an der Werkstückoberfläche eine unter *Druckvorspannung stehende Materialschicht* erzeugt wird. Der Zweck ist eine *Erhöhung der Dauerstandfestigkeit*, d. h. der Lebensdauer und somit auch der Betriebssicherheit von auf Wechselspannungen hochbeanspruchten Bauelementen und Bestandteilen. Es handelt sich um ein hochspezialisiertes Teilgebiet der sogenannten «Strahltechnik». Diese Bezeichnung, ebenso wie der Ausdruck «Strahlanlagen», sind verhältnismässig neu.

Unter «Strahltechnik» versteht man heute die Gesamtheit der Verfahren zur Behandlung von Werkstückoberflächen unter Verwendung von unter der Bezeichnung «Strahlmittel» oder «Strahlmedia» zusammengefassten, feinkörnigen Media verschiedener Art, die mit hoher Geschwindigkeit aufgeschleudert werden. Um einen Begriff über die Grössenordnung dieser Abwurfgeschwindigkeiten zu vermitteln, sei erwähnt, dass in der Praxis Werte zur Anwendung gelangen, die etwa im Bereich zwischen 30 m/s bis ungefähr 120 m/s liegen dürften. Höhere Abwurfgeschwindigkeiten sind selten.

Aus zwingenden, im Verfahren liegenden Gründen können nur kugelige Strahlmittel-Sorten verwendet werden. Sie müssen nicht nur eine einwandfreie Kugelform aufweisen, sondern sich überdies durch eine lange Standzeit sowie durch eine von Fall zu Fall zwar verschiedene, immer jedoch möglichst gleichförmige Körnung auszeichnen. Aus diesen Gründen ist die Auswahl auf ganz wenige Qualitäten begrenzt. Wegen der Kugelform des verwendeten Strahlmittels wird in Deutschland für das Shot-peening-Verfahren gelegentlich auch die Bezeichnung «Kugelstrahlen» verwendet. Sie ist jedoch irreführend, denn sphärische Strahlmedia werden in überwiegendem Ausmasse auch für viele andere Anwendungsgebiete der Strahltechnik verwendet, und zwar in einem viel grösseren Ausmass als für das Shot-peening-Verfahren. Im französischen Sprachgebiet hat sich die Bezeichnung «Shot-peening» eingebürgert. Gelegentlich hört man dort auch den Ausdruck «grenaillage de précontrainte», der dem Sinn nach der Umschreibung des eigentlichen Behandlungszweckes wesentlich näher kommt.

Wirkungsweise und Beispiele für die erzielten Ergebnisse

Gelegentlich hört man die Vermutung, die Erhöhung der Dauerstandfestigkeit beim Shot-peening-Verfahren sei auf eine Verfestigung und Verdichtung der Werkstückoberfläche zurückzuführen. Dem ist jedoch nicht so.

Ein *Bruch im kritischen Querschnitt* wird fast immer durch einen an der Werkstückoberfläche auftretenden Anriss eingeleitet. Handelt es sich dabei um Zug-, Schub- oder Torsionskräfte, müssen diese in den mit dem Shot-peening-Verfahren behandelten Werkstücken zunächst die in den äusseren Materialschichten vorhandenen Druckvorspannungen überwinden. Der Augenblick bis die zulässige Belastung an der Werkstückoberfläche erreicht ist, wird so wesentlich hinausgeschoben. Dieser Mechanismus wird dort besonders augenfällig wirksam, wo Werkstücke oder Bauelemente aus hochwertigen Materialien rasch wechselnden starken Beanspruchungen ausgesetzt sind. Der Gewinn äussert sich in einer wesentlich verlängerten Dauerstandfestigkeit. Man versteht darunter die Zahl der Lastwechsel bis zum Eintreten des Bruches. Es handelt sich jedoch keineswegs um einen statistisch ermittelten Durchschnittswert, sondern es wird eine repräsentative Anzahl Musterstücke in besonders für diesen Zweck gebauten Prüfmaschinen immer wiederkehrenden gleichartigen Wechselbelastungen unterworfen, bis der Prüfling zu Bruch geht. Gezählt wird die Zahl der Lastwechsel. Die Untersuchung einer Serie wird auf Grund einer Kurve als «Lebenserwartungs-Charakteristik» ausgewertet, wobei auf der Ordinate die Zahl der Lastwechsel bis zum Bruch und auf der Abszisse ein geeigneter Vergleichswert aufgetragen werden. In Bild 1 ist eine derartige Darstellung wiedergegeben, wobei aus dem Beispiel gleichzeitig auch die durch die Shot-peening-Behandlung erreichten Vorteile veranschaulicht werden.

Ausgedehnte, nach dieser Methode durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass durch das Shot-peening-Verfahren die Dauerstandfestigkeit vornehmlich solcher Teile wesentlich verbessert werden kann, die einer *Wechselbelastung*

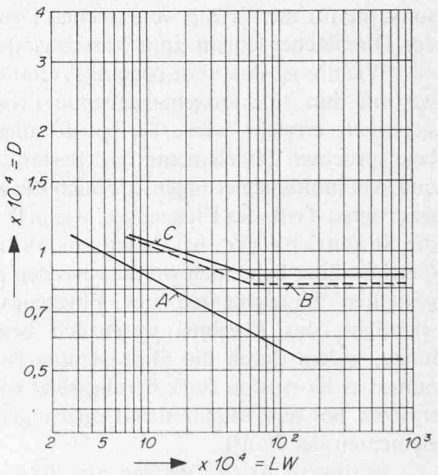

Bild 1. Lebenserwartungs-Charakteristik bei immer wiederkehrenden gleichartigen Wechselbelastungen in einer Pulsator-Prüfmaschine. Die Kurven geben die Dauerstandfestigkeit von aus ¼" dickem Federstahl mit einer Härte von 40–45 Rockwell C (nach Wärmebehandlung) gefertigten Blattfeder-Prüflingen wieder. 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 = Anzahl Lastwechsel bis zum Bruch des Probestückes. B = Dauerstandsfestigkeit von Probestücken, die nach dem Shot-peening-Verfahren, jedoch mit einer zu geringen Strahlintensität behandelt wurden. A = Dauerstandsfestigkeit von nicht nach dem Shot-peening-Verfahren behandelten Probestücken. C = Dauerstandsfestigkeit von Probestücken, die mit optimaler Strahlintensität nach dem Shot-peening-Verfahren behandelt wurden.

durch Biege-, Torsions- oder Schubkräfte ausgesetzt sind. Hier lassen sich zumeist ausserordentlich gute Ergebnisse und eine grosse Verlängerung der Lebenserwartung erzielen. Die erreichte Verbesserung ist jedoch gering, wenn das Werkstück nur einer zwischen Druck und Zug ständig wechselnden Belastung ausgesetzt ist.

Bei den nach dem Shot-peening-Verfahren behandelten Teilen handelt es sich zumeist um aus *Stahl* hergestellte Werkstücke. Zahlreiche Anwendungsgebiete betreffen jedoch auch aus Nicht-Eisen-Metallen hergestellte Teile, so z. B. aus *Bronze, Aluminium* und *Aluminium-Magnesium-Legierungen,* aus Titan usw. In allen Fällen sind es unter Wechselbeanspruchungen stehende, aus hochwertigen Materialien bestehende, hochbeanspruchte Werkstücke. Was die *Anwendungsgebiete* anbelangt, so seien als Beispiele genannt: *Automobil-, LKW- und Fahrzeugbau, Federnherstellung, gehärtete und ungehärtete Zahnräder* aller Art, *Flugzeugbau* usw. Die Aufzählung ist jedoch bei weitem nicht vollständig, um so mehr als die Verwendung des Shot-peening-Verfahrens in ständigem Zunehmen begriffen ist, bedingt durch die *grosse Verlängerung der Dauerstandfestigkeit,* die damit erreicht werden kann. Dies wird an den folgenden Beispielen gezeigt, wobei nur einige besonders bemerkenswerte Ergebnisse herausgegriffen worden sind:

	Verlängerung der Dauerstandfestigkeit[1])
Kurbelwellen	900 %
Blattfedern	600 %
Pleuelstangen	1000 %
Schrauben und Spiralfedern	1370 %
Zahnräder	1500 %
Betätigungsnocken	475 %
Nockenwellen	1400 %

Die Shot-peening-Behandlung stellt in der Regel die *allerletzte Bearbeitungsstufe in der Fertigung* dar. Nicht nur spanabhebende Bearbeitungen, wie Drehen, Fräsen usw., sondern auch Schleifen, Härten und ähnliche Verfahren sollten grundsätzlich immer vor dem Shot-peenen durchgeführt werden, da sonst die für den Erfolg wesentlichen Druckvorspannungen in der Oberflächenschicht zum Verschwinden gebracht würden.

Wichtig ist das Shot-peening-Verfahren im Flugzeugbau, wo mit ihm eine ausschlaggebende Erhöhung der Betriebssicherheit erreicht wird. Es betrifft dies sowohl die hochbeanspruchten Bauelemente und Bestandteile aus Aluminium und Aluminiumlegierungen, als auch die zahlreichen aus Stahl gefertigten Teile des Flugzeuges, wie z. B. das Fahrgestell und die Strahltriebwerke, bei denen vor allem die Schaufeln und Getrieberäder behandelt werden. Bei den aus Leichtmetall hergestellten Bauelementen des Flugzeugs kommt noch ein wichtiger, das Ergebnis wesentlich begünstigender Faktor hinzu, indem durch die Shot-peening-Behandlung die Spannungsriss-Korrosion stark herabgesetzt wird. Dies ist ganz besonders bei aus Magnesium-Legierungen hergestellten Bauelementen der Fall[2]).

In diesem Artikel werden nur die Grundlagen des Shotpeening-Verfahrens dargestellt. Dazu gehören auch die Begriffe, jedoch nicht die Technologie. Des weiteren sollen aber auch die Möglichkeiten und Grenzen der Verwendungsmöglichkeiten von Glas-Strahlperlen besprochen werden.

Struktur der behandelten Werkstückoberfläche

Das mit einem *Schleuderrad oder mit Druckluft* auf hohe Geschwindigkeit beschleunigte kugelförmige Strahlmittel-Korn erfährt beim Auftreffen auf die Werkstückoberfläche eine plötzliche Änderung seiner Flugrichtung bei gleichzeitiger Umwandlung seiner kinetischen Energie. Der Aufprall des Korns

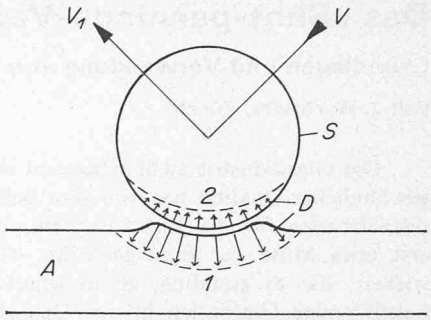

Bild 2. Beanspruchungen und örtliche Deformationen von Korn und Werkstückoberfläche beim Aufprall eines kugelförmigen Strahlmittelkorns auf das Werkstück.

A = Werkstück. D = Deformations-Zonen im Schrotkorn und an der Werkstückoberfläche. S = Schrotkorn. 1 = bleibende Deformation an der Werkstückoberfläche. 2 = bleibende Deformation der Schrotkornrandzone. v = Aufprallgeschwindigkeit. v_1 = Geschwindigkeit mit der das Schrotkorn nach dem Aufprall wegfliegt.

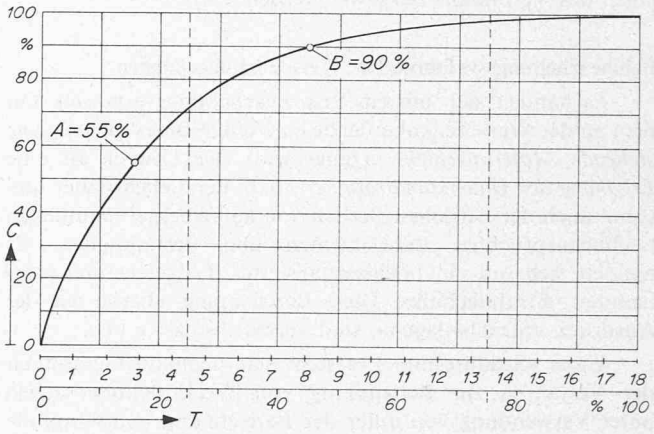

Bild 3. Zunahme der Flächenüberdeckung (Überdeckungsgrad) in Funktion der Strahlzeit. Diagramm erstellt auf Grund der von der Wheelabrator Corporation abgeleiteten Formel: $C = 1 - (1 - C_1)^n$. C = Flächenüberdeckung in Prozenten des theoretischen Maximalwertes von 100 %. In der Formel versteht sich der Wert von C nach n Durchgängen unter dem Strahl. C_1 = Flächenüberdeckung nach einem einzigen Durchgang unter dem Strahl. n = Anzahl der Durchgänge unter dem Strahl. T = Strahlzeit. Im Diagramm sind für die Strahlzeit zwei Massstäbe aufgetragen. Oberer Massstab: in willkürlichen Einheiten. Unterer Massstab: in Prozenten der totalen Strahlzeit, die für das Erreichen einer vollständigen, hundertprozentigen Flächenüberdeckung erforderlich sein würde. A = Strahlzeit für eine Flächenüberdeckung von 55 % (siehe Mikrophotographie A in Bild 4). B = Strahlzeit für eine Flächenüberdeckung von 90 % (siehe Mikrophotographie B in Bild 4).

wirkt wie der Schlag eines winzigen Hämmerchens. Der Vorgang ist schematisch in Bild 2 dargestellt. Die oberste Materialschicht des aus Stahl oder aus einem N-E-Metall (Aluminium- oder Al-Magnesium-Legierungen) bestehenden Werkstückes wird an dieser Stelle radial gestreckt, wobei die Streckgrenze örtlich überschritten wird, so dass eine Einbuchtung als bleibende Deformation entsteht. Ein Teil der kinetischen Energie des Korns wird von der Werkstückoberfläche aufgenommen, was eine momentane, örtliche Temperaturzunahme an der Auftreffstelle zur Folge hat. Trotzdem spricht man beim Shot-peening-Verfahren von einer *Kaltbehandlung*.

Nach dem Aufprall fliegt das Strahlmittelkorn mit verminderter Geschwindigkeit weiter. Die vom Schrotkorn verursachte, konkave Einbuchtung ist verhältnismässig flach und ihr Durchmesser ist demzufolge auch wesentlich kleiner als der Durchmesser des aufprallenden Kügelchens. Rings um die Einschlagstelle wölbt sich die Randzone, wie in Bild 2 dargestellt, wulstförmig leicht hervor. Um die für das Shot-

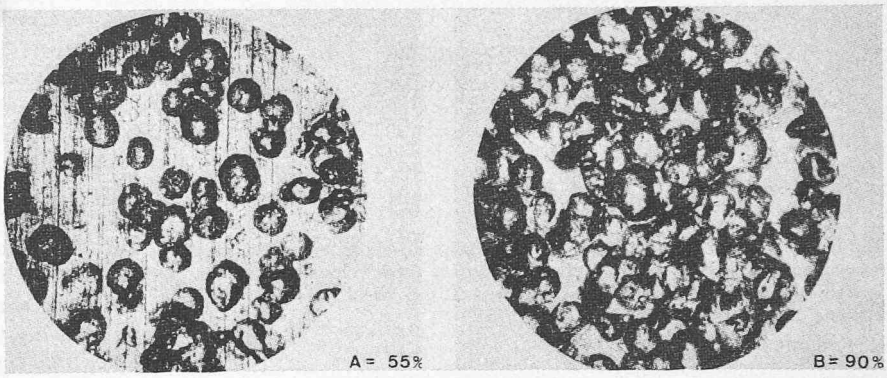

Bild 4. Mikrophotographien einer gestrahlten Werkstückoberfläche bei zwei verschiedenen Flächenüberdeckungsgraden.

Bild A: Flächenüberdeckung 55%, entspricht Punkt A in Diagramm Bild 3. Bild B: Flächenüberdeckung 90%, entspricht Punkt B in Diagramm Bild 3.

peening-Verfahren erforderliche Druckspannung und auch eine gleichmässige Behandlung der kritischen Stellen zu erreichen, sind *hohe Trefferzahlen pro Flächeneinheit* erforderlich. Um die in der Praxis zur Anwendung gelangenden Grössenordnungen zu veranschaulichen, sei erwähnt, dass Stahlschrott der Nennkorn-Grösse 0,3 mm ungefähr $0{,}8 \cdot 10^7$ einzelne Kügelchen pro Kilogramm enthält. Bei den üblichen Behandlungen ergibt sich als statistischer Mittelwert eine theoretische Belegung der Oberfläche von etwa 80000 bis 160000 Treffer auf den Quadratzentimeter. Unter dem Lupenmikroskop erscheint deshalb die gestrahlte Werkstückoberfläche mit Einschlägen und Einbuchtungen dicht übersät.

Die *Hämmerwirkung* der aufschlagenden Schrotkügelchen hat nicht nur eine Deformation der Korngrenzen des Materialgefüges in den obersten Schichten zur Folge. Gleichzeitig werden auch *Druckspannungen* erzeugt, die nach allgemeiner Auffassung tiefer in das Metall herabreichen, als die Zone, in der eine Deformation der Korngrenzen festgestellt werden kann[3]). Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass die in den obersten Materialschichten durch die Shot-peening-Behandlung erzeugten Druckspannungen um ein mehrfaches grösser sind, als die in den darunterliegenden Schichten des kritischen Querschnittes auftretenden Zug-, Schub- und Torsionskräfte. Diese Feststellungen gelten ganz allgemein, sowohl bei der Verwendung von Strahlmitteln auf Stahlbasis, als auch für Behandlungen mit Glas-Strahlperlen.

Die Flächenüberdeckung (Überdeckungsgrad)

Wie schon gesagt, sind beim Shot-peening-Verfahren *ausserordentlich hohe Trefferzahlen pro Flächeneinheit* erforderlich, um eine genügend gleichmässige Behandlung der Werkstückoberfläche zu erreichen. Dabei kommen die Gesetzmässigkeiten der Wahrscheinlichkeitsrechnung voll zur Geltung. Auch in automatisch arbeitenden Anlagen und unter Beachtung besonderer Vorsichtsmassnahmen wird man unter dem Mikroskop auch bei sehr hohen spezifischen Trefferzahlen immer wieder Stellen finden, die noch überhaupt keine Einschläge aufweisen, während an anderen Stellen zahlreiche einander überlappende Treffer in sehr grosser Zahl festgestellt werden können.

Daher versteht man unter dem Begriff der «Flächenüberdeckung» das in Prozenten ausgedrückte Verhältnis zwischen der durch Treffer bedeckten Fläche *und* der gesamten gestrahlten Oberfläche. Es ist eine Funktion der aufgewendeten *Strahlzeit*[4]), deren Bedeutung am besten graphisch veranschaulicht wird (Bild 3). Die Zusammenhänge zwischen Flächenüberdeckung und Strahlzeit beeinflussen massgebend alle strahltechnischen Arbeitsverfahren. Dies trifft in besonders hohem Masse auch für das Shot-peening-Verfahren zu. Auf diesem Gebiet werden deshalb in den meisten Fällen Minimalwerte für die Flächenüberdeckung in den Pflichtenheften vorgeschrieben, die unbedingt eingehalten werden müssen.

Die praktische Bedeutung der Flächenüberdeckung wird am besten durch die beiden in Bild 4 einander gegenübergestellten Mikrophotos beleuchtet. Bild 4A zeigt eine Flächenüberdeckung von 55%, Bild 4B den Zustand nach Erreichen einer Flächenüberdeckung von 90%. Die entsprechenden Punkte sind auch in Bild 3 eingetragen. Es muss also die Strahlzeit verdreifacht werden, um an Stelle einer Flächenüberdeckung von 55% eine solche von etwa 90% zu erreichen. Bei automatisch arbeitenden Strahlanlagen muss deshalb die Maschinenleistung verdreifacht werden, wenn der geforderte Arbeitsrhythmus in der gleichen Zeit, jedoch mit der höheren Flächenüberdeckung eingehalten werden soll. Beim Shot-peening-Verfahren werden sehr oft noch wesentlich höhere Werte von etwa 97–98% Flächenüberdeckung vorgeschrieben. Dies bedingt eine ungefähr fünfmal längere Strahlzeit oder eine entsprechend grössere Maschinenleistung als im Falle A bei einem Überdeckungsgrad von nur 55%. Statt der Bezeichnung «Flächenüberdeckung» wird im deutschen Sprachgebiet gelegentlich auch der Ausdruck *Überdeckungsgrad* verwendet.

Ermittlung der Flächenüberdeckung

Die messtechnische Bestimmung des durch die Einschläge der Strahlmittelkörner bedeckten Flächenanteils erfolgt am besten unter einem *binokularen Lupenmikroskop,* wobei die seinerzeit von der Wheelabrator Corporation USA ausgearbeitete Methode die Verwendung einer etwa 50fachen Vergrösserung empfiehlt. Nur selten dürfte es möglich sein, das gestrahlte Werkstück selber unter das Mikroskop zu bringen. Man behilft sich deshalb zumeist mit einer *indirekten* Methode,

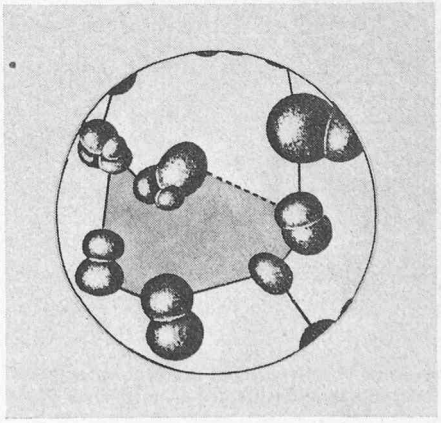

Bild 5. Ausmessen der Flächenüberdeckung einer gestrahlten Oberfläche mit Hilfe eines Planimeter-Gerätes.

Der Planimeterstift darf bei der Auswertung nicht entlang der im Bild gestrichelt gezeichneten Linie geführt werden, da sonst die im Bild dunkel abgelegte Leerfläche mit eingeschlossen würde, was eine Fehlmessung zur Folge hätte.

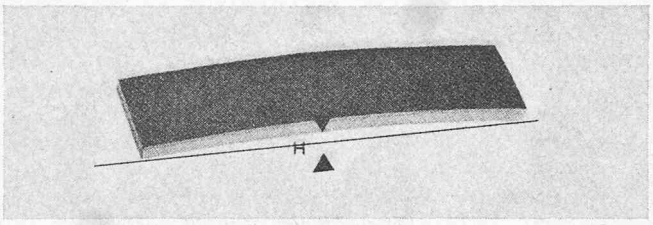

Bild 6. Die im Bild veranschaulichte Bogenhöhe «H» eines standardisierten, aus Stahlblech hergestellten Messstreifens dient beim «Almen-Test»-Verfahren als Mass für die Strahlintensität d.h. für die Hämmerwirkung der aufprallenden Strahlmittelkörner.

H = Bogenhöhe.

indem ein sogenanntes *«Almen-Test-Prüfplättchen»* zunächst unter genau identischen Bedingungen gestrahlt und anschliessend unter dem Mikroskop ausgemessen wird. Um die Beobachtung zu erleichtern, ist es empfehlenswert, das Prüfplättchen vor dem Strahlen zu polieren. Einwandfreie Resultate können selbstverständlich nur erzielt werden, wenn das Prüfplättchen tatsächlich unter ganz genau denselben Arbeitsbedingungen gestrahlt wird wie das Werkstück.

Zu empfehlen ist ein Mikroskop mit einer *Zeicheneinrichtung*. Mit dem sogenannten «Zeichentubus» lassen sich die Konturen der beobachteten Einschläge bequem aufzeichnen. Mit dieser Vorrichtung sieht der Beobachter die zu untersuchende Oberfläche und gleichzeitig seine Zeichnung, ferner den Zeichenstift, aufrecht stehend und seitenrichtig übereinander eingespiegelt. Auf dem Zeichenpapier erblickt er ein Bild, das den beiden in Bild 4 ähnlich ist. Die Einschläge heben sich als dunklere Flecken von der hell polierten Oberfläche des Prüfplättchens ab. Der Beobachter zeichnet danach mit einem spitzen Bleistift die Umrisse der Einschläge nach.

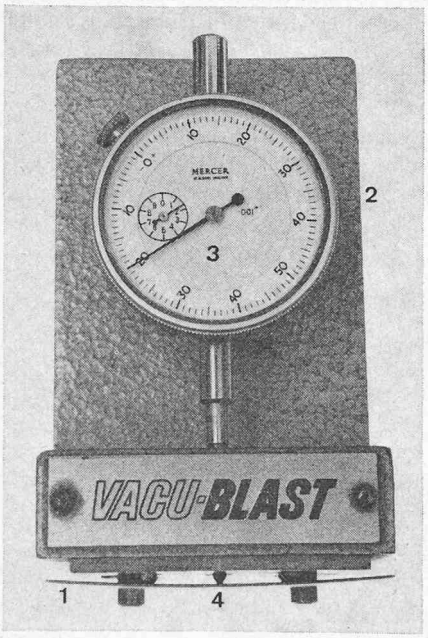

Bild 7. Messen der Bogenhöhe (Durchbiegung) des genormten Messstreifens nach der Strahlbehandlung mit Hilfe des «Almen-Test»-Mess-Tasters.

1 = gestrahltes Almen-Test-Prüfplättchen. 2 = Gestell des Almen-Test-Messgerätes. 3 = Messuhr mit Skalaeinteilung in Tausendstel Zoll. 4 = Dorn der Messuhr.

Der Apparat ist mit vier Anschlagbolzen ausgerüstet, durch welche die Lage des Prüfplättchens während des Messvorgangs genau fixiert ist. Werkfoto: Vacu-Blast Ltd.

Wird für das Ausmessen der gestrahlten Fläche ein *Planimeter* verwendet, dürfen keine Leerflächen mitgezählt werden. Bild 5 veranschaulicht die im allgemeinen angewendete Methode. Ein Ausgangspunkt wird angezeichnet, darauf die mit Treffern belegten Flächenpartien miteinander durch Striche verbunden. Vom Fixpunkt ausgehend wird nun der Planimeterstift in der üblichen Weise den Konturen der mit Einschlägen bedeckten Flächenpartien entlanggeführt, während die Verbindungslinien für den Übergang von einer Flächenpartie zur nächsten benützt werden. Da diese Linien in beiden Richtungen durchfahren werden, wird das Messergebnis nicht beeinflusst. Es ist aber darauf zu achten, keine Leerflächen mit einzuschliessen, wie dies durch Verwendung der gestrichelten Linie in Bild 6 der Fall sein könnte. Bei einem hohen Überdeckungsgrad ist es manchmal vorteilhaft, mit dem Planimeter die von Treffern unberührt gebliebene Fläche auszumessen.

Eine einfachere, wenn auch etwas arbeitsintensivere Methode verzichtet auf die Verwendung eines Planimeters. Für die Zeichnung wird Millimeterpapier benützt. Die Auswertung erfolgt durch Auszählen. Die zu ermittelnde Bestimmungsgrösse bleibt stets der prozentuale Anteil der mit Einschlägen bedeckten Partien im Verhältnis zur Gesamtfläche des auszuwertenden Bildes.

Strahlintensität – Potentielle Strahlintensität – Effektive Strahlintensität – Einfallswinkel

Unter der Strahlintensität versteht man die durch die aufprallenden Strahlmittelkügelchen ausgeübte Einwirkung auf die bestrahlte Stelle der Werkstückoberfläche. Die Tiefe der Zone in der noch eine Wirkung festgestellt werden kann, hängt offensichtlich vom Anteil der kinetischen Energie ab, der von den aufschlagenden Schrotkügelchen an die obersten Materialschichten übertragen wird. Ganz allgemein wird die Auffassung vertreten, die durch das Strahlen hervorgerufenen, für das Shot-peening-Verfahren so wichtigen Druckspannungen reichten tiefer in das Material hinein, als gerade nur in die Schicht, in der eine Deformation der Korngrenzen des Materialgefüges festgestellt werden kann.

Nach der Theorie des Shot-peening-Verfahrens versteht man unter potentieller Strahlintensität die durch die aufprallenden Schrotkörner ausgeübte Einwirkung auf die Werkstückoberfläche, wie sich diese aus der Abwurfgeschwindigkeit des Strahlmittels *und* aus der Härte des Strahlmediums und der Grösse und der Masse der einzelnen Schrotkügelchen ergibt. Diese Bestimmungsgrösse ist unabhängig von der Anzahl von Kügelchen, die sich zu einem gegebenen Zeitpunkt im Strahlbündel befinden, ebenso auch von der Bestrahlungsdauer. Die potentielle Strahlintensität wird gelegentlich auch als Momentan-Charakteristik des Strahlenbündels umschrieben und die englische Bezeichnung lautet denn auch «instantaneous characteristic of a blast of shot».

Demgegenüber ist die effektive Strahlintensität als die *eigentliche Wirkung* des auf die Werkstückoberfläche aufprallenden Strahlenbündels definiert. Diese Bestimmungsgrösse ist eine Funktion der potentiellen Strahlintensität und des Sinus des Einfallwinkels unter dem das Strahlenbündel auf die Oberfläche aufprallt. Da der Sinus des Einfallwinkels bei 90° den Wert 1 annimmt, werden bei einem senkrecht auf die Oberfläche auftreffenden Strahl die effektive und die potentielle Strahlintensität gleich gross sein.

Bestimmung der Strahlintensität nach dem «Almen-Test»-Messverfahren

Aus offensichtlichen Gründen ist es nicht möglich, die Wirkung des Strahls auf die Werkstückoberfläche und somit auch die Strahlintensität auf direktem Wege zu messen. Man

ist deshalb gezwungen, ein *indirektes* Messverfahren zu verwenden. Es hat sich hierfür weltweit die seinerzeit von *J. O. Almen* von der Research Laboratories Division der General Motors Corp. entwickelte und nach dem Namen seines Erfinders als «Almen-Test» bekannte Messmethode eingebürgert. Sie wird heute überall für die Bestimmung von Strahlintensitäten angewendet. Als Massstab dient die *Durchbiegung* oder genauer, wie aus Bild 6 hervorgeht, die *Bogenhöhe,* die ein *standardisierter Stahlblech-Streifen* unter der Hämmerwirkung der Strahlmittelkörner annimmt. Es ist dabei peinlich auf das Einhalten identischer Arbeitsbedingungen für Prüf- und Werkstück zu achten. Das «Almentest-Prüfplättchen» wird in eine ebenfalls genormte Haltevorrichtung eingespannt. Nach dem Strahlen werden die Schrauben der Einspannvorrichtung gelöst und das Prüfplättchen herausgenommen. Es wird jetzt die Durchbiegung der Unterseite gemessen, wofür ein speziell für diesen Zweck entwickelter, ebenfalls standardisierter Mess-Taster zu verwenden ist. Bild 7 veranschaulicht den Messvorgang.

Im Gegensatz zu den USA wird in Europa die gemessene Bogenhöhe in Hundertsteln Millimeter angegeben. Das ganze Messverfahren steht und fällt mit der strikten Verwendung von genau dem Standard entsprechenden Zubehörteilen[5]). Da es sich um eine indirekte Messmethode handelt, muss, damit der ermittelte Messwert auch tatsächlich der Strahlintensität entspricht, auch sorgfältig darauf geachtet werden, nicht nur das Strahlmittel und seine Körnung, ebenso wie die Strahldauer, sondern überdies auch alle anderen Parameter, wie z. B. der Strahlabstand, Arbeitsdruck, Anstellwinkel usw., die den tatsächlichen Verhältnissen am gestrahlten Objekt entsprechen müssen, während der Messung unverändert zu halten.

Der mit dem Taster gemessene Wert der Bogenhöhe entspricht jedoch der effektiven Strahlintensität nur, wenn am Werkstück *und* beim Prüfplättchen eine vollständige Flächenüberdeckung erreicht worden ist. Der Vollständigkeit halber sei hier noch auf gelegentliche Spezifikationen im Pflichtenheft hingewiesen, die einen niedrigeren Überdeckungsgrad und gleichzeitig auch die dazugehörige einzuhaltende Bogenhöhe vorschreiben. In diesen Fällen handelt es sich dann aber nicht um die effektive Strahlintensität.

Insgesamt stehen *drei verschiedene Grössen* von «Almen-Test-Plättchen» zur Verfügung, die alle eine Länge von 3″ und eine Breite von 0,745 bis 0,750″ haben und sich voneinander nur durch die Materialstärke unterscheiden. Im allgemeinen verwendet man vor allem das «Almen-Test»-Plättchen «A_2» mit einer Dicke von 0,0510″. Die wesentlich dickere Ausführung «C_2» mit einer Dicke von 0,0938″ wird zur Messung hoher Strahlintensitäten benötigt. Typ «N» wird nur dort verwendet, wo besonders kleine Strahlintensitäten genau erfasst werden müssen, beispielsweise bei der Verwendung von Glas-Strahlperlen. Im allgemeinen hat sich auch in Europa die Benützung der von der Wheelabrator Corp. in den Vereinigten Staaten hergestellten Original-Plättchen eingebürgert. Die mit diesen ermittelten Werte und die darauf beruhenden Literaturangaben können deshalb auch international miteinander verglichen werden.

Strahlintensität bei Sättigung

Es ist erforderlich, zwischen dem Begriff der Strahlintensität an und für sich sowie der als Massstab dienenden Bestimmungsgrösse der *Bogenhöhe* genau zu unterscheiden. Wie aus Bild 8 hervorgeht, nimmt die gemessene Bogenhöhe mit zunehmender Strahlzeit zunächst rasch zu, bis eine praktisch vollständige Flächenüberdeckung erreicht ist. Beide Kurven im Diagramm gehen von der Voraussetzung aus, die Behandlung erfolge mit einem «homogenen Strahl» (pure blast of shot), der somit einheitlich aus Schrotkügelchen besteht, die sämtlich mit derselben Geschwindigkeit und unter dem gleichen Einfallswinkel auf die Oberfläche aufprallen und überdies auch untereinander von gleicher Grösse, gleichem Gewicht, Kornform und Härte sind. Sobald eine vollständige Flächenüberdeckung erreicht ist, nimmt die gemessene Bogenhöhe nicht mehr weiter zu und die Kurve geht in eine Horizontale über. Der erreichte Messwert der Bogenhöhe entspricht

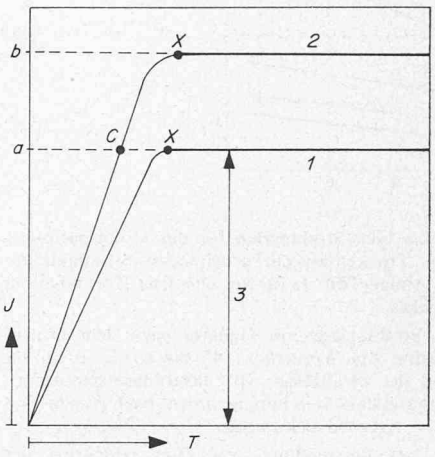

Bild 8. Strahlintensität in Funktion der Strahlzeit für zwei in sich «homogene» Strahlen (pure blast of shot), jedoch von unterschiedlicher kinetischer Energie. Die Strahlintensitäten, gemessen in Bogenhöhe nach dem «Almen-Test»-Verfahren.

J = Strahlintensität, gemessen in Bogenhöhe nach dem «Almen-Test»-Verfahren. T = Dauer der Strahlzeit. 1 = Charakteristik eines «homogenen» Strahls, bestehend aus Schrotkügelchen mit einer bestimmten einheitlichen kinetischen Energie. 2 = Charakteristik eines «homogenen» Strahls, bestehend aus Schrotkügelchen mit einer gleichfalls einheitlichen, aber höheren kinetischen Energie als im Falle «1». 3 = Strahlintensität des «homogenen» Strahls «1» im Beharrungszustand nach Erreichen der vollständigen Flächenüberdeckung (gemessene Bogenhöhe = a). X = Punkt, bei dem vollständige Flächenüberdeckung erreicht worden ist. a = Bogenhöhe nach «Almen-Test», gemessen nach Erreichen der vollständigen Flächenüberdeckung mit dem Strahl «1». b = Bogenhöhe nach «Almen-Test», gemessen nach Erreichen der vollständigen Flächenüberdeckung mit dem Strahl «2». C = Die der Bogenhöhe «a» entsprechende Strahlintensität wird beim Strahl «2» bereits bei einer nur partiellen Flächenüberdeckung erreicht.

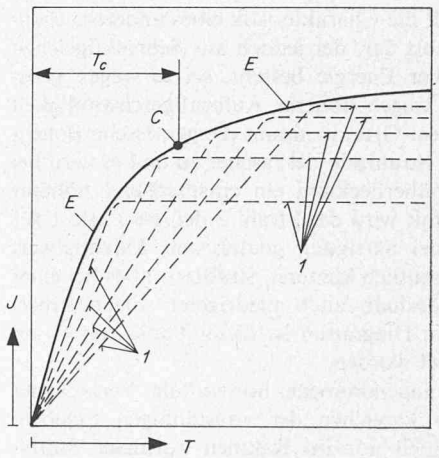

Bild 9. Charakteristik der Strahlintensität in Funktion der Strahlzeit für einen «nicht-homogenen» Strahl, gemessen in Bogenhöhe nach dem «Almen-Test»-Verfahren.

J = Strahlintensität, gemessen in Bogenhöhe nach dem «Almen-Test»-Messverfahren. T = Dauer der Strahlzeit. 1 = Individuelle Charakteristiken der verschiedenen in einem «nicht-homogenen» Strahl enthaltenen Kornfraktionen, wobei jede als ein in sich «homogener» Strahl angenommen wurde. E = Charakteristik eines «nicht-homogenen» Strahls, bestehend aus Schrotkügelchen mit unterschiedlicher kinetischer Energie, verschiedenen Kornfraktionen usw. C = Punkt, an dem vollständige Flächenüberdeckung erreicht worden ist. T_c = Strahlzeit bis zum Erreichen einer vollständigen Flächenüberdeckung.

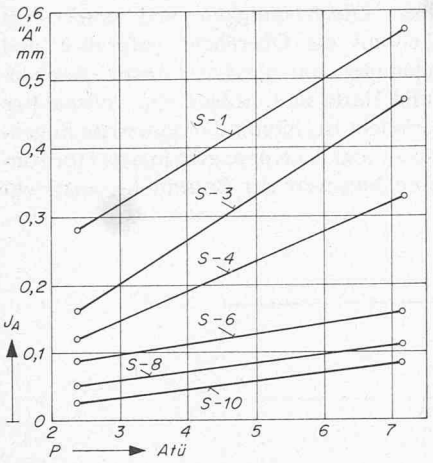

Bild 10. Verwendung von Glas-Strahlperlen für das «Shot-peening»-Verfahren in nach dem Trocken-System arbeitenden Strahlanlagen. Strahl-Intensitäten nach Almen-Test A_2 für verschiedene Körnungen in Funktion des Arbeitsdruckes.

Verwendete Apparatur: Strahlanlage mit Gebläse nach dem Drucksystem. Abstand Strahldüse bis Werkstück: 4″ bis 6″ = 101,6 bis 152,4 mm. Anstellwinkel der Strahldüse: 90°. Strahldüse (Bohrung): ⅜″ = 9,525 mm. J = Strahlintensität in mm, gemessen nach Almen-Test mit Prüfplättchen A_2. P = Arbeitsdruck in atü.

S-1 = Strahlintensität bei Verwendung von Glasstrahlperlen der Körnung Nr. 1 (Kornfraktionen ca. 1,2 bis 1,4 mm). S-3 = Strahlintensität bei Verwendung von Glasstrahlperlen der Körnung Nr. 3 mit Kornfraktionen von ca. 0,6 bis 0,8 mm ⌀. S-4 = Strahlintensität bei Verwendung von Glasstrahlperlen der Körnung Nr. 4 mit Korngrössen von 0,4 bis 0,6 mm ⌀. S-6 = Strahlintensität bei Verwendung von Glasstrahlperlen der Körnung Nr. 6 mit Korngrössen von ca. 0,2 bis 0,3 mm ⌀. S-8 = Strahlintensität bei Verwendung von Glasstrahlperlen der Körnung Nr. 8 mit den Korngrössen von ca. 0,15 bis 0,2 mm ⌀. S-10 = Strahlintensität bei Verwendung von Glasstrahlperlen der Körnung Nr. 10 mit den Korngrössen von ca. 0,09 bis 0,15 mm ⌀. N.B. Was die Bezeichnung der Körnungen anbelangt, so beziehen sich die Angaben auf die ASTM-Norm Nr. D-1214-58.

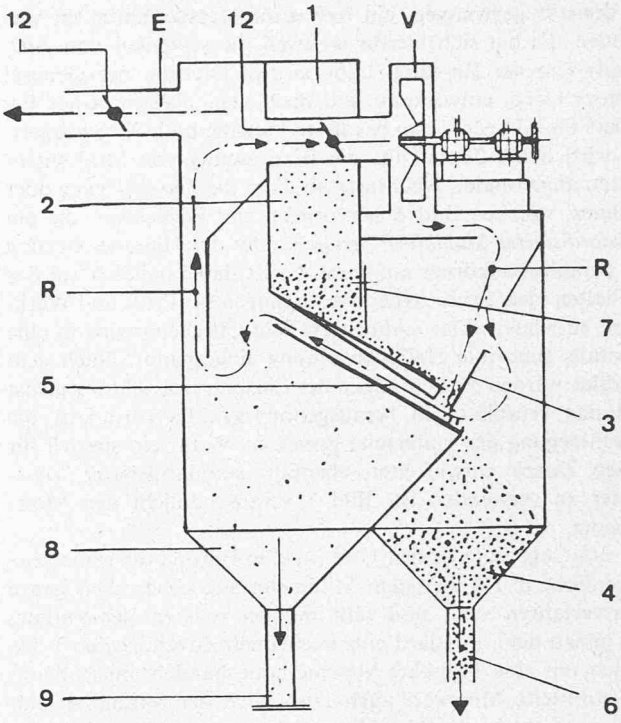

Bild 11. Schema eines modernen, nach dem Windsichterprinzip arbeitenden «Hochleistungs-Shotseparator» mit eingebautem Ventilator und geschlossenem Spühlluft-Kreislauf, Bauart Maschinenfabrik Graber + Wening AG, Neftenbach ZH, Schweiz.

1 = Strahlmittel-Zulauf vom Becherwerkskopf aus. 2 = Aufzubereitendes Strahlmittel. 3 = verstellbare Anschlag-Leiste für das Abbremsen des herabrieselnden Strahlmittels. 4 = Zwischensilo für das aufbereitete und gereinigte Strahlmittel. 5 = Abscheidekanal. 6 = Rückführung des aufbereiteten Strahlmittels in die Strahlanlage. 7 = Gewichtsbelastete Klappe zur gleichmässigen Verteilung des Strahlmittels auf die ganze Breite des Abscheiders. 8 = Zwischensilo für ausgeschiedene Grobteile. 9 = Entleerungsleitung mit Läppventil für ausgeschiedene Grobteile. 12 = Regulierklappe in Absaugleitung zur Entstaubungs-Anlage. Eine analoge Regulierklappe befindet sich auch in der Zuleitung zum eingebauten Ventilator V und dient zur Beeinflussung der Menge der im geschlossenen Kreislauf strömenden Spülluft. E = Absaugleitung, die den Kaskadenabscheider mit der Entstaubungsanlage verbindet. R = Verlauf der im geschlossenen Kreislauf strömenden Spülluft. V = Spülluftventilator mit Regulierantrieb für Drehzahlverstellung.

nunmehr der effektiven Strahlintensität. Die für diesen Punkt in den USA verwendete Bezeichnung «peening intensity at saturation» wird wohl am besten mit «Strahlintensität bei Sättigung» übersetzt.

Die Kurve 2 stellt die Charakteristik eines anderen, ebenfalls homogenen Strahls dar, der jedoch aus Schrotkügelchen mit höherer kinetischer Energie besteht, sei es wegen grösserem Gewicht oder wegen höherer Aufprallgeschwindigkeit der Körner. Aus diesem Grunde nimmt die gemessene Bogenhöhe in Funktion der Strahlzeit viel rascher zu und es wird bei vollständiger Flächenüberdeckung ein entsprechend höherer Endwert erreicht. Somit wird der Strahl 2 den im Falle 1 für die Strahlintensität bei Sättigung gemessenen Maximalwert der Bogenhöhe in wesentlich kürzerer Strahlzeit aber bei einer nur partiellen und deshalb auch niedrigeren Flächenüberdeckung erreichen. Im Diagramm ist dieser Punkt mit C auf der Kurve 2 bezeichnet worden.

Der in Bild 8 angenommene horizontale Verlauf der Charakteristika nach Erreichen der vollständigen Flächenüberdeckung gilt jedoch nur im Rahmen normaler Strahlzeiten. Bei überlanger Strahldauer kann eine Materialabtragung an der Oberfläche des Prüfplättchens auftreten, was zwangsläufig zu falschen Messwerten führen muss.

Die oben für einen homogenen Strahl aufgezählten Bedingungen sind im praktischen Betrieb in ihrer Gesamtheit nur sehr schwer, wenn überhaupt voll zu erfüllen. Dies gilt insbesondere für die Forderung, alle Schrotkügelchen sollten von gleicher Grösse, gleichem Gewicht, Form und Härte sein. Am ehesten dürfte einwandfrei vorgerundeter Stahldraht-Schnitt diese Bedingungen erfüllen. Auch für «Shot-peening»-Arbeiten werden jedoch zumeist Gussstahl-Schrot und für gewisse Sonderfälle auch Glas-Strahlperlen verwendet, bei denen neues, ungebrauchtes Strahlmittel stets Kornfraktionen verschiedener Grösse und somit auch von unterschiedlicher kinetischer Energie umfasst. Ähnliche Überlegungen gelten aber auch für die Härte des Strahlmediums.

Die Charakteristik eines solchen nun nicht mehr homogenen Strahls zeigt denn auch einen grundsätzlich anderen Verlauf der gemessenen Bogenhöhe in Funktion der Strahlzeit. Wie aus Bild 9 hervorgeht, lässt sich diese als resultierende Hüllkurve der Gesamtheit der individuellen Charakteristika der verschiedenen im Strahl enthaltenden Fraktionen definieren, die jede als in sich homogen angenommen und im Diagramm durch gestrichelte Linien angedeutet worden sind. Der Punkt, bei dem im praktischen Betrieb vollständige Flächenüberdeckung erreicht worden ist, wurde in Bild 9 mit dem Buchstaben C gekennzeichnet. Beim «nicht homogenen» Strahl, der verschiedene Kornfraktionen enthält, verläuft von diesem Punkt an die Charakteristik nicht mehr horizontal, wie dies bei einem homogenen Strahl der Fall sein würde, sondern die gemessene Bogenhöhe nimmt bei Verlängerung der Strahldauer immer noch weiter zu, auch wenn die Kennlinie in diesem Teil der Kurve doch verhältnismässig flach verläuft.

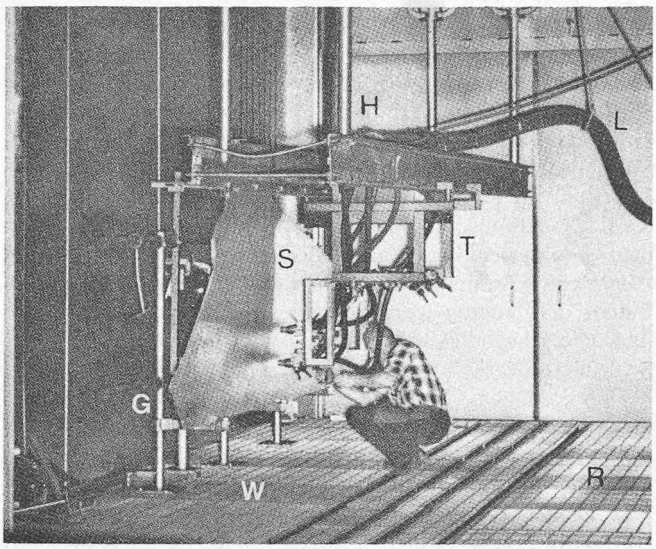

Bild 12. Blick in einen grossen, nach dem Druckluft-System arbeitenden, für die Behandlung von Flugzeugteilen nach dem Shot-peening-Verfahren bestimmten Strahlraum in den Unterhalts-Werkstätten einer kanadischen Flugverkehrsgesellschaft. Drucksystem mit 6 von einem gemeinsamen, kontinuierlich arbeitenden Zweikammer-Gebläse gespeisten Strahldüsen, die, wie aus dem Bild ersichtlich, nach Bedarf in einem Rahmengestell angeordnet werden können. Strahlmittel-Rücktransport mit Materialsammeltrichter, Becherwerk und Hochleistungs-Kaskadenabscheider sowie anschliessender Sortierstation für drei verschiedene Strahlmittelkörnungen. Die zu behandelnden Flugzeugteile werden ausserhalb des Strahlraumes auf einen Werkstückwagen geladen und an den Tragsäulen des Wagens mit geeigneten Haltevorrichtungen befestigt, wobei die zu strahlende Oberfläche eine möglichst vertikale Lage erhalten soll. Sodann wird der Wagen in den Strahlraum eingefahren und bleibt in dieser Stellung während der ganzen Strahlbehandlung stehen. Zunächst werden noch die Strahldüsen ausgerichtet und im Gestell verteilt, um eine gleichmässige Flächenbelegung zu erhalten. Das Rahmengestell mit den Strahldüsen hängt seinerseits an einer in der Höhe verstellbaren, fahrbaren Bühne, die während der Strahlbehandlung parallel zur Längsachse des Werkstückwagens hin und her fährt. Durch diese Translationsbewegung wird eine gleichmässige Bestrahlung der Oberfläche gewährleistet. Die Einstellung des Fahrweges, die Höhenverstellung der Bühne usw. werden durch Fernbetätigung mit Hilfe von Druckknöpfen vorgenommen. Nach dem Einschalten der Steuerapparatur läuft sodann der ganze Bearbeitungsvorgang selbsttätig ab. *G* = Tragsäulen des Werkstückwagens zur Befestigung der zu behandelnden Flugzeugteile. *H* = In der Höhe verstellbare Fahrbühne für die Translationsbewegung der Strahldüsen. *W* = Werkstückwagen in Arbeitsstellung im Strahlraum. *R* = Bodenrost im Strahlraum. *T* = Rahmengestell der in der Höhe verstellbaren Fahrbühne, an dem die Strahldüsen nach Bedarf befestigt werden. *S* = Flugzeugteil (Teil eines Seitenruders), der nach dem Shot-peening-Verfahren behandelt wird. *L* = Förderleitung für die Zuführung des Strahlmittels vom Zweikammergebläse zu den 6 Strahldüsen. Werkfoto: The Carborundum Company.

Strahlmittel-Sorten

Die *Anforderungen,* die an das *Strahlmedium* beim Shot-peening-Verfahren gestellt werden, sind *sehr hoch*. Die zur Verfügung stehende Auswahl ist dementsprechend klein. An erster Stelle steht die Forderung nach *einwandfreier Kugelform der Körner,* die überdies eine möglichst lange Standzeit haben müssen. Das letzte ist wichtig, denn die durch Kornzerfall entstehenden Bruchstücke müssen sofort aus dem Kreislauf entfernt werden, weil die bei einem Bruch entstehenden Kanten Anrisse auf der Werkstückoberfläche hervorrufen können, was die Shot-peening-Behandlung vollständig in Frage stellt. Der Strahl soll nach Möglichkeit aus Kügelchen gleicher Grösse und gleicher kinetischer Energie zusammengesetzt sein, während die Bruchstücke nur noch einen Bruchteil der ursprünglichen Masse aufweisen.

Für die Behandlung von Werkstücken aus Stahl werden in der Regel Strahlmedia auf Stahlbasis verwendet. Aus schon dargelegten Gründen darf nur konditionierter d.h. einwandfrei vorgerundeter Drahtschnitt oder Stahlschrot erster Qualität gewählt werden.

Im Neuzustand stellt ein Drahtschnittkorn einen zylindrischen Körper dar, dessen Länge theoretisch gleich gross sein sollte wie der Durchmesser des für die Herstellung verwendeten Materials. Im Neuzustand haben die Körner jedoch nicht nur scharfe Kanten, sondern auch vom Schneidvorgang herrührende Brauen und Deformationen und sind daher für eine Shot-peening-Behandlung vollständig ungeeignet. *Drahtschnitt* darf nur dann verwendet werden, wenn er vorher in separaten Anlagen konditioniert wird, bis alle Körner einwandfreie Kugelform angenommen haben. Dabei geht etwa 10% der ursprünglichen Standzeit verloren. Dies muss in Kauf genommen werden, denn nur so ist die notwendige Sicherheit zu erreichen. Der vorkonditionierte Drahtschnitt bietet aber den grossen Vorteil, dass alle Körner praktisch denselben Durchmesser aufweisen. Beim *Stahlschrot* erster Qualität ist schon vom Herstellungs-Verfahren her die einwandfreie Kugelform gegeben. Auch bei sorgfältiger Aussiebung fällt das Produkt jedoch stets als ein *Gemisch verschiedener Kornfraktionen* an. Für das Shot-peening-Verfahren werden deshalb *Spezial-Aussiebungen* mit wesentlich engeren Toleranzen verlangt[6]).

Glas-Strahlperlen fallen bei der Fabrikation ebenfalls als einwandfreie Kügelchen und als ein Gemisch verschiedener Kornfraktionen an. Für ihre Verwendung zum Shot-peenen sind deshalb meistens Spezial-Aussiebungen mit besonders engen Toleranzen nötig. Die Verwendung von Glas-Strahlperlen für das Shot-peening-Verfahren bleibt jedoch trotzdem auf Spezialgebiete begrenzt. Sie wird durch die ganz anderen Eigenschaften des Strahlmediums bestimmt.

Bei gleichbleibenden Bedingungen wird die kinetische Energie des aufprallenden Strahlmittelkorns durch sein *spezifisches Gewicht* bestimmt. Hier gibt es grosse Unterschiede, beträgt doch das spezifische Gewicht von Stahlschrot 7,3 kg/dm³, das von Drahtschnitt etwa 7,85 bis 7,87 kg/dm³ und das von Glas-Strahlperlen nur 2,4 bis 2,6 kg/dm³. Somit sind die mit dem letzten Strahlmedium erzielbaren Strahlintensitäten wesentlich niedriger. Glas-Strahlperlen eignen sich deshalb dort, wo niedrige Amlen-Test-Werte für die Behandlung vorgeschrieben sind. Über die Verwendung von Glas-Strahlperlen für das «Shot-peening»-Verfahren sind zahlreiche Untersuchungen durchgeführt worden. Über sie liegen deshalb bessere Daten vor als für die klassischen Strahlmittel-Sorten. Bild 10 können die Strahl-Intensitäten entnommen werden, die sich mit Glas-Strahlperlen verschiedener Körnung bei verschiedenen Arbeitsdrücken ergeben[7]).

Einfluss der «break-down rate» auf Anlagenbau und Verfahrenstechnik

An kugelförmige Strahlmittel für Shot-peening-Zwecke werden ganz andere Anforderungen gestellt als an die üblichen Media. Dies gilt besonders für Glas-Strahlperlen, denn auch sie müssen eine möglichst lange Standzeit haben, ohne durch den Strahlbetrieb in Brüche zu gehen. Nun ist aber Glas ein hartes und sprödes Material, das leicht zerbricht. *Metallische Werkstoffe* haben die Eigenschaft der *Duktilität,* die dem Glas vollständig fehlt. So tritt bei Stossbeanspruchung am Glaskörper keine örtliche Deformation ein, sondern beim Überschreiten einer gewissen Grenzbeanspruchung bildet sich plötzlich ein Bruch, der die bestehende Form vollständig auflöst[8]). Die Bruchstücke sind sehr scharfkantig; während des Betriebes tritt später keine Rundung oder Stauchung der Kanten mehr auf.

Unter der «break-down rate» versteht man den Prozentsatz der während des Betriebes zu Bruch gehenden Glaskügelchen. Für das Shot-peening ist eine einwandfreie Kugel-

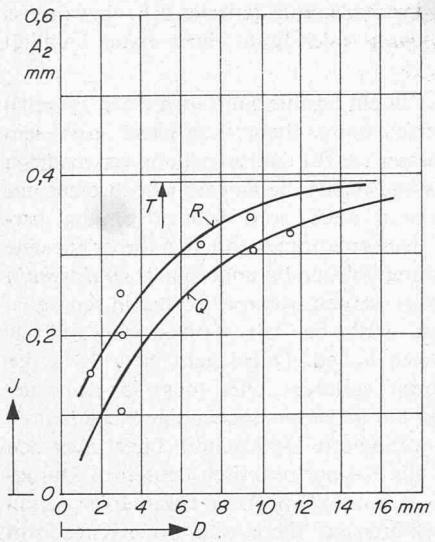

Bild 13. Behandlung von Flugzeugteilen aus Aluminium und Aluminium-Magnesium-Legierungen nach dem «Shot-peening»-Verfahren. Richtwerte für die Strahlintensität in Funktion der Materialstärke an der kritischen Stelle des Werkstückes, wobei der Querschnitt mit der geringsten Materialstärke massgebend ist.
J = Strahlintensität in mm, gemessen mit Almen-Test-Prüfplättchen A_2. D = Materialstärke (Dicke) in mm im schwächsten Querschnitt. Q = Im Flugzeugbau im allgemeinen übliche Almen-Test-Werte für Teile aus Aluminium und Al-Magnesium-Legierungen. R = Maximalwerte der Strahlintensität, die im Flugzeugbau bei der Behandlung von Teilen aus Aluminium und aus Aluminium-Magnesium-Legierungen nicht überschritten werden. T = Auch bei grösseren Materialstärken als 15 mm und darüber werden im Flugzeugbau keine höheren Strahlintensitäten als etwa 0,39 bis 0,4 mm A_2 angewendet. Anmerkung: Die Strahlintensitäten gemäss Kurve R werden vor allem für Flugzeugbauteile aus Titanium oder aus Stahl angewendet.

form Voraussetzung zum Erfolg. Das Betriebsgemisch darf keine scharfkantigen Teilchen enthalten, da diese unweigerlich Anrisse in der zu behandelnden Werkstückoberfläche verursachen. Wesentlich ist eine Qualität mit einer möglichst niedrigen «break-down rate». Dies allein genügt jedoch nicht. In der Strahlanlage selbst muss Vorsorge getroffen werden, um die scharfkantigen Bruchstücke vor ihrem Auftreten auf die Werkstückoberfläche auszuschalten. Das gleiche technische Problem besteht bei allen Shot-peening-Anlagen und auch dort, wo kugeliges Material auf Stahlbasis verwendet wird. Bei der Verwendung von Glas-Strahlperlen muss jedoch die sehr hohe «break-down rate» beachtet werden, was entsprechend leistungsfähigere Bauelemente für das Ausscheiden der Bruchstücke erforderlich macht. Es sind dies nach dem Windsichterprinzip arbeitende, unter dem Namen «Kaskadenabscheider» bekannte Apparate. Um eine einwandfreie Aufbereitung des Strahlmediums zu gewährleisten, müssen die Apparate über einen genügend grossen Einstellbereich verfügen. Wichtig ist eine ausreichende Genauigkeit und eine gute Reproduzierbarkeit der Einstellungen, damit die durch den herabrieselnden Strahlmittelschleier strömende Spülluft sämtliche zerbrochenen Körner und auch andere Verunreinigungen mit sich wegführt und mit Sicherheit aus dem Betriebs-Strahlmittelgemisch entfernt. Die im Laufe der Jahre entwickelten Hochleistungs-Separatoren sind tatsächlich in der Lage, die oben genannte Forderung zu erfüllen.

In Bild 11 ist schematisch der Aufbau eines modernen Abscheiders dargestellt. Die Drehzahl des eingebauten Ventilators lässt sich mit einem Regulierantrieb verstellen, damit die Geschwindigkeit der durch den Strahlmittelschleier strömenden Spülluft unabhängig von äusseren Einflüssen auf den gewünschten Wert eingestellt und konstant gehalten werden kann. Die Zuführung des Strahlmittels zum Shot-Separator erfolgt mit Hilfe eines Becherwerks.

Die Verwendungsmöglichkeiten von Glas-Strahlperlen für Shot-peening-Zwecke erfahren noch eine weitere Einschränkung. Nach dem heutigen Stand der Anlagetechnik kann dieses Strahlmedium nur in Anlagen verwendet werden, in denen Druckluft für die Beschleunigung des Strahlmittels verwendet wird. Grundsätzlich sind dafür Apparate geeignet, die nach dem Saugsystem und nach dem Druckprinzip arbeiten. Allgemein gibt man der als *Gravitations-System* bekannten Bauart den Vorzug wegen der besseren Regulierbarkeit der Abwurfgeschwindigkeit. Bis heute ist es jedoch nicht gelungen, Schleuderräder zu konstruieren, die sich für das Shot-peening-Verfahren eignen. Ursache dafür ist das Brechen der Glas-Strahlperlen beim Eintritt in das Schleuderrad, hervorgerufen durch den harten Aufschlag der Glaskügelchen auf die Schaufeln bei der Beschleunigung des Strahlmittels. Die sich bildenden scharfkantigen Bruchstücke können nicht mehr rechtzeitig ausgeschieden werden, denn das Strahlmittelgemisch prallt unmittelbar nach dem Austritt aus dem Schleuderrad auf die Werkstückoberfläche auf. Ganz andere Verhältnisse weisen Anlagen auf, die nach dem Druckluftsystem arbeiten. Hier erfolgt die Förderung und die Beschleunigung des Strahlmediums stossfrei durch die strömende Druckluft. Die einzige mechanische Beanspruchung der Glaskügelchen stellt sich beim Aufprall auf die zu behandelnde Werkstückoberfläche ein. Die «break-down rate» ist somit entsprechend niedrig. Sollten beim Aufprall Glas-Bruchstücke entstehen, werden sie vom am Becherwerkkopf angeordneten Hochleistungs-Kaskadenabscheider mit Sicherheit ausgeschieden, bevor das Strahlmedium wieder der Strahldüse zugeführt wird.

Behandlung von Bauelementen

Trotz der geschilderten technischen Schwierigkeiten ist es gelungen, Glas-Strahlperlen in einer Qualität zu erzeugen, die sich in wenigen Jahren nicht nur für verschiedene, neuartige Anwendungen bewährt, sondern sich auch beim anspruchsvollen Shot-peening-Verfahren auf ganz bestimmten Gebieten durchgesetzt haben. Wesentlich dafür waren die perfekte Kugelform und die Tatsache, dass Glas-Strahlperlen das einzige zur Verfügung stehende Strahlmedium sind, das aus einem *chemisch inerten Werkstoff* hergestellt wird, was besonders beim Shot-peenen von Teilen ins Gewicht fällt, die aus Aluminium, aus Al-Magnesium-Legierungen oder aus Titan bestehen (z. B. für Bauelemente im Flugzeugbau und in der Raumfahrt). Hier bevorzugt man allgemein die Verwendung von Glas-Strahlperlen vor allem aus *Sicherheitsgründen,* denn mit Strahlmitteln auf Stahlbasis besteht bei diesen Metallen stets die Gefahr von *Lochfrass,* hervorgerufen durch eisenhaltige Staubreste an der Werkstückoberfläche. Für Bauelemente dieser Art sind überdies zumeist auch wesentlich niedrigere Strahlintensitäten als üblich vorgeschrieben (vgl. Bild 13). Bei der Behandlung von Flugzeugbauteilen ist man auch bestrebt, eine Strahlmittelsorte und eine Körnung zu wählen, die es gestattet, unter den vorgeschriebenen Randbedingungen den gewünschten Almen-Test-Wert der Strahlintensität zu erzielen, ohne die angestrebte Strahlintensität wesentlich zu überschreiten –, auch nicht bei verlängerter Strahlzeit. Im angelsächsischen Sprachgebrauch bezeichnet man den diesbezüglichen Almen-Test-Wert als «peening intensity at saturation». Diese treffende Umschreibung kann man wohl am besten mit «Strahlintensität bei Sättigung» übersetzen. Auch in dieser Beziehung bieten Glas-Strahlperlen mit ihrem geringen spezifischen Gewicht wesentliche Vorteile.

Die Behandlung von Bestandteilen und Bauelementen von Flugzeugen mit dem Shot-peening-Verfahren stellt ein wesentlich grösseres Anwendungsgebiet dar, als allgemein ange-

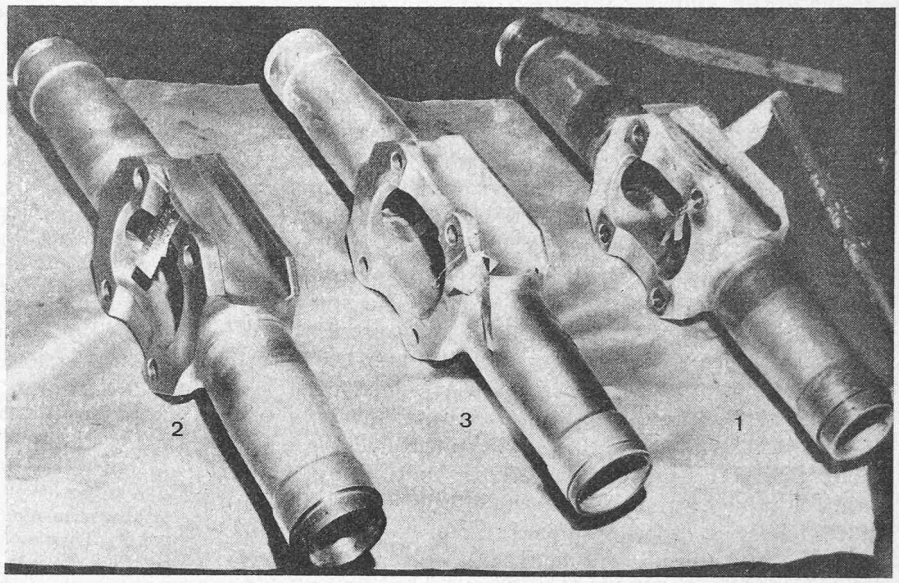

Bild 14. «Shot-peening»-Behandlung in zwei Phasen eines aus einer hochwertigen Leichtmetall-Legierung hergestellten Flugzeugteils (Mittelstück zum Propellerantrieb), wobei für die zweite Stufe Glasstrahlperlen als Strahlmittel verwendet wurden, um die Oberflächenstruktur zu verfeinern.
1 = Das Werkstück ist bereits fertig massgenau bearbeitet, jedoch noch vor der Behandlung nach dem «Shot-peening»-Verfahren.
2 = Werkstück nach der ersten Phase des «Shot-peening»-Verfahrens, wobei ein sphärisches Strahlmittel auf Stahlbasis (Stahlschrot) geeigneter Körnung verwendet wurde.
3 = Werkstück nach der zweiten Phase mit Nachbehandlung durch Strahlen mit Glasstrahlperlen zwecks Verfeinerung und Reinigung der vorher mit Stahlschrot vorbehandelten Oberfläche. Teil ist bereit zur nachfolgenden Plattierung im galvanischen Bad. Werkphoto: Sovitec S.A., Bruxelles

nommen wird. Es wird nicht nur bei der Herstellung von Kampfflugzeugen und Helikoptern, sondern aus Sicherheitsgründen auch beim Bau von Passagier- und Frachtflugzeugen angewendet, ganz zu schweigen von der Erzeugung von Flugmotoren und Strahltriebwerken. Da an Flugzeugen laufend und in genau vorgeschriebenen Abständen Unterhaltsarbeiten durchgeführt werden müssen, sind in den Wartungsvorschriften auch die nötigen Angaben über die bei der Revision durchzuführenden Shot-peening-Behandlungen enthalten. Dadurch bleibt bei hochbeanspruchten Teilen der Vorspannungszustand der Oberflächenschicht im Betrieb gewährleistet.

Grössere Fluggesellschaften und Militärwerkstätten verfügen deshalb über die entsprechenden Anlagen. Bild 12 zeigt eine für Unterhaltsarbeiten bestimmte Shot-peening-Anlage in den Werkstätten einer kanadischen Fluggesellschaft. Einen Eindruck der Abmessungen des Strahlraumes vermittelt der im Bild sichtbare, mit Einstellarbeiten beschäftigte Mann. Die Anlage ist mit sechs nach dem Druck-System arbeitenden Strahldüsen bestückt, die von einem Zwei-Kammer-Druck-Strahlgebläse aus gespiesen werden, womit ein ununterbrochener Betrieb gewährleistet wird. Das Strahlmittel fällt zunächst in den unter dem Bodenrost angeordneten Sammeltrichter und wird sodann mit Hilfe eines Becherwerks zu einem Hochleistungs-Kaskadenabscheider hochgehoben. Nach der Reinigung und Aufbereitung folgt noch eine Siebstation, in der das Strahlmittel in drei verschiedene Korngrössen klassiert und sodann in die zugehörigen drei Sammelsilos geleitet wird. In dieser nach dem Druckluft-System ausgelegten Anlage kann somit je nach Bedarf mit drei verfügbaren Körnungen gestrahlt werden. Beim Übergang von einem Strahlmittel zum andern ist es aber notwendig, die ganze Anlage gründlich zu reinigen, um eine Vermischung und somit Behandlungsfehler zu vermeiden. Beim Wechsel der Körnung eines gleichbleibenden Strahlmittels ist diese Sicherheitsmassnahme nicht nötig.

Ermittlung der anzuwendenden Strahlintensitäten

Das Shot-peenen von Werkstücken gehört zu den *Präzisionsverfahren der Bearbeitungstechnik*. Die angestrebte Erhöhung der Dauerstandfestigkeit kann nur erreicht werden, wenn sämtliche Parameter genau eingehalten werden, was ganz besonders für die Strahlintensität gilt. Das Problem liegt allein in der Ermittlung und Festlegung der bei der Behandlung anzuwendenden Werte. Eine Ausnahme bilden einzig die erwähnten Unterhaltsarbeiten an Flugzeugen, Strahltriebwerken und ähnlichen Objekten, wo die Lieferwerke ausführliche Wartungsvorschriften abgeben, die auch alle erforderlichen Parameter, einschliesslich der Strahlintensitäten für das Shot-peenen, enthalten.

Wesentlich anders liegen die Verhältnisse in den *Herstellerwerken*. Hier müssen zuerst *ausgedehnte Prüfstandversuche* durchgeführt werden, um die Abmessungen der hochbeanspruchten Werkstücke und die Daten der Shot-peening-Behandlung festzulegen. Zu diesem Zwecke müssen ganze Serien auf ihre Dauerstandfestigkeit unter Wechselbeanspruchung geprüft werden, denn nur so lassen sich die erstaunlichen Leistungen des Shot-peening-Verfahrens und die angestrebte Erhöhung der Lebensdauer erreichen. Allgemein gilt dies für *alle* Anwendungsgebiete des Verfahrens. Um das zeitraubende Verfahren nach Möglichkeit abzukürzen, werden für Vorversuche zumeist *Richtwerte* der Strahlintensität zugrunde gelegt. Die graphische Darstellung (Bild 13) vermittelt als Beispiel Richtwerte für aus Aluminium, aus Al-Mg-Legierungen sowie aus Titan gefertigte Bauelemente im Flugzeugbau, wobei die Almen-Test-Werte als Funktion der Materialstärke im kritischen Querschnitt zu verstehen sind. Aus der Graphik geht hervor, dass auf diesem Gebiete wesentlich geringere Strahlintensitäten zur Anwendung gelangen, was unter anderem mit ein Grund ist, weshalb zur Behandlung von Teilen aus Aluminium und Al-Mg-Legierungen nach dem Shot-peening-Verfahren bevorzugt Glas-Strahlperlen als Strahlmittel verwendet werden. Die Ergebnisse einer solchen Untersuchung werden dann in Form einer *Lebenserwartungs-Charakteristik* des betreffenden Bauteils zusammengefasst. Sie dient dann zur definitiven Festlegung der Strahlintensität. Ähnlich ist auch das Vorgehen bei Teilen aus Stahl usw., wobei jedoch, wie erwähnt, wesentlich höhere Almen-Test-Werte zur Anwendung gelangen.

Das Zwei-Stufen-Verfahren

In vielen Fällen werden im Flugzeug- und im Automobilbau für aus Aluminium oder aus Al-Mg-Legierungen bestehende Bauelemente beim Shot-peenen *höhere* Strahlintensitäten benötigt, die mit Glas-Strahlperlen im direkten Verfahren nicht zu erreichen sind. Dies betrifft vor allem bestimmte Anforderungen an die zu verwendende Körnung. Für die Behandlung solcher Teile muss deshalb Stahlschrot als Strahlmedium benützt werden, trotz der damit verbundenen Nachteile und der Gefahr von Lochfrass-Korrosionen. Früher war man in solchen Fällen gezwungen, die mit Stahlschrot behandelten Teile noch einer sehr gründlichen und ebenfalls

heiklen *chemischen Nachbehandlung* zu unterziehen. Heute zieht man ein anderes Verfahren vor, bei dem statt der chemischen Nachbehandlung in einem zweiten Arbeitsgang durch Nachstrahlen mit Glas-Strahlperlen eine sehr wirksame Reinigung der Werkstückoberfläche erzielt wird. Gleichzeitig erreicht man auch eine wesentliche Verbesserung der Oberflächeneigenschaften. Durch geeignete Wahl der Körnung beim Nachstrahlen mit Glas-Strahlperlen lässt sich überdies auch eine sehr wirksame Verminderung der Oberflächenrauheit erzielen. Die Glättung der Oberfläche wirkt sich als eine zusätzliche Verbesserung der Dauerstandfestigkeit und somit der Lebensdauer der behandelten Werkstücke aus. Ausserdem wird zusätzlich die Gefahr von Anrissen vermindert. In der Praxis wird deshalb das zweite Nachstrahlen mit Glasperlen als Oberflächenverfeinerung bezeichnet. Als Beispiel dieser zweiphasigen Behandlung zeigt Bild 14 die aufeinanderfolgenden Stadien eines so behandelten Werkstücks. Es handelt sich um das aus einer hochwertigen Leichtmetall-Legierung hergestellte Mittelstück eines Propellerantriebes für einen Kampf-Helikopter der US-Luftwaffe. Für die grossen, hochbeanspruchten und dickwandigen Teile sind beim Shot-peenen entsprechend hohe Strahlintensitäts-Werte notwendig, die nur mit Stahlschrot erreicht werden können. Beim Nachstrahlen mit Glasperlen muss nach der Spezifikation eine sehr geringe Oberflächenrauheit erreicht werden, da danach die Teile in galvanischen Bädern elektroplattiert werden müssen. In Bild 14 sind die Unterschiede der Oberflächenstruktur in den drei aufeinanderfolgenden Arbeitsstadien gut zu sehen.

Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass auch an *Werkstücken aus Stahl* gelegentlich die Shot-peening-Behandlung im Zwei-Stufen-Verfahren mit feinkörniger Glas-Strahlperlen-Nachbehandlung durchgeführt wird. In der Praxis sind solche Fälle zwar nicht häufig, weil eine aufeinanderfolgende Strahlbehandlung mit zwei verschiedenen Medien wesentlich aufwendiger ist als das übliche Shot-peening-Verfahren. Schon aus wirtschaftlichen Gründen wird in diesem Fall die Nachbehandlung mit Glas-Strahlperlen nur vorgenommen, um eine wesentliche Verbesserung und Verringerung der Oberflächenrauheit zu erreichen.

Anmerkungen

[1]) Die Angaben über Kurbelwellen, Schraubenfedern und Betätigungsnocken sind dem «*Report NA-115 of the National Defense Research Committee USA*» entnommen, die über Blattfedern und Nockenwellen aus *Hallworth:* «Bond Testing of Silber Plated Engine Bearings» in «Automotive and Aviation Industries», 15. Juli 1946.

[2]) *J. Horowitz:* «Oberflächenbehandlung mittelst Strahlmitteln», in «Oberfläche - Surface», Hefte 10, 11 und 12, 1974.

[3]) *H. F. Mooreä:* «Strengthening Metal Parts by Shot Peening» in Handbuch «Shot-Peening», herausgegeben von der *Wheelabrator Corporation,* Mishawaka, Indiana, USA. 6. Auflage, Kapitel II, S. 55.

[4]) Graphische Darstellung und Formel nach den Untersuchungen der Firma Wheelabrator Corp., Mishawaka, Indiana, USA.

[5]) Messverfahren, entwickelt von *J. O. Almen* von der «Research Laboratory Division of General Motors Corporation», siehe auch «*SAE Manual on Shot Peening*» SP-84 der «Society of Automotive Engineers», New York N.Y., USA.

[6]) Siehe «*SAE-Spezifikationen über die Körnungen P-7 bis P-93*». Ferner: *J. Horowitz:* «Oberflächenbehandlung mittels Strahlmitteln», Band 1, Kapitel 3 aus «Normung und Prüfung metalischer Strahlmittel». Forster-Verlag AG, Zürich, 1976.

[7]) Siehe auch: *USA Department of Defence – Mil-STD-852 (USAF).* «Military Standard Glass Beads Peening Procedures».

[8]) *Hans Jebsen-Marwedel:* «Schmelzen und Formgebung des Glases». Leipzig 1929. Eine ausführliche Studie über die Mechanik des Glasbruches hat *Preston* im «Journal Soc. Glass Technology», Bd. X, Nr. 39, Seiten 234 ff. veröffentlicht. Über Glas-Strahlperlen siehe auch: *J. Horowitz* (Zürich): «Die Herstellung von Glasperlen für technische Verwendungszwecke». Sprechsaal, Bd. 108, Nr. 9–10, S. 257–278, 1975.

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

Phantasie erlaubt – aber nur auf dem Reissbrett

Ein umstrittener Totalumbau im Herzen der Stadt Zürich beschäftigt gegenwärtig die Gemüter ihrer Bürger: Das renommierte und traditionsreiche Hotel Savoy oder Baur en ville beim Paradeplatz entsteht neu. Die Neugestaltung des Hotels bot sich zugleich als ideale akademische Trockenübung bzw. als Thema für die Diplomarbeiten der Architekturstudenten der ETH an. Die fünf besten Arbeiten wurden von der Schweizerischen Kreditanstalt, als Bauherrin des Savoy, prämiiert.

Von 123 Architektur-Studenten nahmen sich 68 für ihre Diplomarbeit das von Prof. Alberto Camenzind vorgeschlagene Thema des Savoy-Hotel-Neubaus vor. Die Aufgabe musste die angehenden Architekten reizen, da sich das Hotel an städtebaulich exponierter Stelle befindet (im Einzugsbereich von geschützter Altstadt einerseits und von Wirtschafts- und Verkehrsschlagadern anderseits) und die Aufgabe daher viel Schwierigkeiten birgt.

«Es ging uns – bei gleichem Raumprogramm – um Alternativvorschläge, die dem Neubau gleichwertig sein sollten; es ging um positive Beiträge zur Bewältigung urbanen Konfliktstoffes», kommentiert Prof. Camenzind. Zu diesem Zweck lockerte man am Poly fiktiv die behördlichen Bauvorschriften. Auch die (geschützte) Fassade durften die Studenten in ihren Projekten neu gestalten. Von diesen «Narrenfreiheiten» durfte das mit dem Umbau betraute Generalunternehmen Karl Steiner nur träumen! Der Umbau beschränkt sich in der Realität nur auf die innere Neuorganisation. Die Denkmalpflege blieb hart – sicher hat auch sie ihre guten Gründe. Das Resultat aber ist *schizophren:* Abbruch der alten Fassade und deren genau Rekonstruktion . . .

Baulinien-Diktatur . . .

Einmal mehr nahm Alberto Camenzind anlässlich der Vorstellung der Studentenarbeiten kein Blatt vor den Mund, was er von der «Panzerjacke der behördlichen Verordnungen und Schranken», den starren Baulinien, Bauhöhen, Bauabständen, Fensterflächenanteilen usw. hält, die es dem heutigen Architekten fast verunmöglichen, ein wenig schöpferische Phantasie in die Häuserzeilen zu bringen. Camenzind weiss sich mit dieser Klage einig mit dem überwältigenden Mehr der Architekten. «Architektur», sagt er, «ist Kultur, und Kultur ist ohne Freiheit nicht möglich.»

Bei den fünf prämiierten Projekten handelt es sich um die ausgewogensten und reifsten unter den Diplomarbeiten. Die jungen Preisträger sind: Robert Alberati, Doris Christinger, Regina Gonthier-Issakidis, Yves Morin und Christian Sumi. Ihre Projekte sind einer aufmerksamen Betrachtung wert. Die diffizile räumliche Aufteilung (bei grosser Raumknappheit), die Gewährleistung des Ambiente eines erstrangigen Stadthotels und die Integration ins Strassenbild beschäftigten die jungen Leute primär. Die Projekte sind originell, ja zum Teil herausfordernd und zeigen, dass die Mischung aus «grösserer Freiheit» und entsprechender Disziplin Lösungen erlaubt, die das jetzige Bauprojekt qualitativ überflügeln.