Die Verwendung des "Shot-peening"-Verfahrens in der Flugzeug-Industrie

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

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **98 (1980)**

Heft 3

PDF erstellt am: **20.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-74028

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

Die Verwendung des «Shot-peening»-Verfahrens in der Flugzeug-Industrie

Von J. Horowitz, Zürich

Kommt das Gespräch auf die Anwendungsgebiete des «Shot-peening»-Verfahrens, wendet sich im allgemeinen die Aufmerksamkeit zunächst der Automobilindustrie und ihren Zulieferbetrieben zu. Dies ist zum Teil verständlich, denn auf diesem Gebiet werden Maschinen benötigt, die in der Lage sein müssen, sehr grosse Stückzahlen gleicher oder zum mindestens gleichartiger Werkstücke zu behandeln. Im weitern handelt es sich auch um Anlagen, die in Fliessbändern oder in Transfer-Strassen eingegliedert werden müssen sowie um ähnliche schwierige Probleme. Demgegenüber muss aber darauf hingewiesen werden, dass das Gebiet mit den vermutlich nicht nur zahlreichsten, sondern auch den verschiedenartigsten Anwendungen des «Shot-peening»-Verfahrens wohl der Flugzeugbau sein dürfte. Zwei Gründe sind dafür massgebend: der dem Flugzeugbau notwendigerweise eigene Zwang zur Gewichtseinsparung und die Forderung nach Verlängerung der Lebensdauer der Einzelteile und damit der Erhöhung der Betriebssicherheit der Flugzeuge. Es handelt sich aber keineswegs nur um die hochbeanspruchten Teile aus Aluminium und aus Aluminium-Magnesium-Legierungen. Im Flugzeugbau werden auch Bauelemente aus legierten, hochwertigen Stählen verwendet, die ebenfalls «gepeent» werden müssen (z. B. die Beschaufelungen der Triebwerke, die Bestandteile des Fahrgestells, die Antriebsritzel für die Helikopter-Propeller usw.). Der Hauptanteil der Bauelemente des Flugzeugbaus entfällt jedoch aus Gewichtsgründen auf aus Aluminium oder aus Al-Mg-Legierungen gefertigte Werkstücke. Besonders interessante Probleme vor allem anlagetechnischer Art stellen dabei Teile mit sehr grossen Abmessungen dar (Seiten- und Höhenruder, Bauelemente der Flugzeugzelle, die Beplankungen der Flügel usw.). Für das «Peenen» solcher Teile werden Ausrüstungen benötigt, die in mancher Hinsicht an Anlagen aus dem modernen Grossmaschinenbau erinnern.

Wirkungsweise

Über die Grundbegriffe und die Mess-Methoden des «Shot-peening»-Verfahrens hat der Autor bereits an dieser Stelle berichtet [1]. Ergänzend wird in diesem Beitrag noch der bei seiner Anwendung wirksam werdende Mechanismus erläutert.

Gelegentlich hört man die Vermutung, beim «Shot-peenen» sei die *Erhöhung der Dauerstandfestigkeit auf eine Verfestigung der Oberfläche* zurückzuführen. Dem ist nicht so. Ein Bruch im kritischen Querschnitt wird fast immer durch einen an der Oberfläche auftretenden Anriss eingeleitet, denn dort tritt zu allererst eine Überschreitung der zulässigen Belastung auf. Bei «gepeenten» Werkstücken müssen jedoch die Zug-, Schub- oder Torsionskräfte zuerst die in den äusseren Materialschichten induzierten Druckvorspannungen überwinden. Dadurch wird der Zeitpunkt, bis die zulässige Belastung erreicht wird, wesentlich hinausgeschoben. Den dabei wirksam werdenden Mechanismus veranschaulicht Bild 1. Bild 1a zeigt zunächst die Spannungsverhältnisse in einem «gepeenten», jedoch noch keinerlei äusseren Belastungen unterworfenen Träger. Es herrscht Gleichgewichtszustand. Die von der Spannungsverteilungskurve rechts der Null-Linie im Gebiet der Druckspannungen umschlossenen beiden Flächen A-B-O' und C-D-O müssen zusammen gleich gross sein, wie das auf der Seite der Zugsspannungen von der Kurve eingeschlossene Flächensegment B-C. Ausserdem muss die Summe der Momente aller dieser Flächen den Wert Null ergeben. Demgegenüber veranschaulicht Bild 1b den Zustand, wenn der «gepeente» Balken sodann einer Biegebelastung unterworfen wird, wobei die über die ganze Dicke des Trägers wirkenden Kräfte durch die Linie L-L' gegeben sind. Die resultierende Spannungsverteilung ergibt sich durch algebraische Addition der Abszissen der Biegekräfte und der durch das «Shot-peenen» erzeugten Vorspannungen (in Bild 1b als voll ausgezogene Linie eingezeichnet, während die beiden Komponenten gestrichelt dargestellt sind). Man erkennt, in welch hohem Masse der *Zeitpunkt*, in dem die zulässige Belastung an der Werkstückoberfläche erreicht wird, durch das «Shot-peenen» *hinausgeschoben* wird. Dieser Mechanismus ist besonders dort wirksam, wo Bauelemente aus *hochwertigen Materialien rasch wechselnden, starken Beanspruchungen* ausgesetzt sind. Als Gewinn ergibt sich eine wesentlich *verlängerte Dauerstandfestigkeit*, wobei unter diesem Begriff die Anzahl Lastwechsel bis zum Bruch verstanden wird.

In diesem Zusammenhang sei noch erwähnt, dass nach allgemeiner Ansicht die beim «Shot-peenen» erzeugten *Druckvorspannungen* wesentlich tiefer in das Metall hineinreichen, als in die Zone, in der eine Deformation der Korngrenzen festgestellt werden kann [2]. Experimentelle Untersuchungen haben überdies gezeigt, dass die in den obersten Materialschichten beim «Shot-peenen» erzeugten Druckvorspannungen um ein Mehrfaches grösser sind, als die in den darunterliegenden Schichten des kritischen Querschnitts auftretenden Zug-, Schub- und Tor-

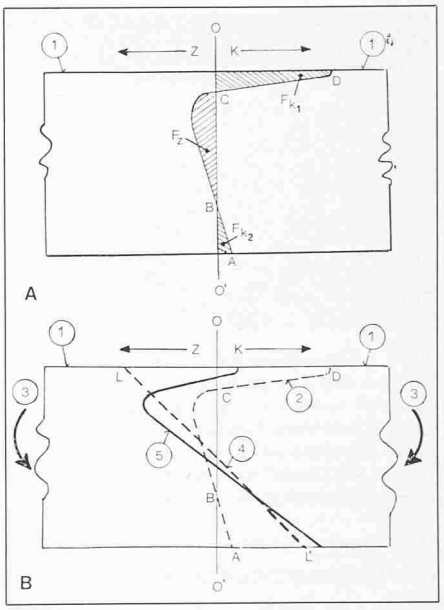

Bild 1. Diagramm der in einem auf der Oberseite nach dem Shot-peening-Verfahren behandelten Träger oder der in einem rechteckigen Balken auftretenden Zug- und Druckspannungen.

A (oben) 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 (unten) Träger unter Biegebelastung.

① *gepeente Oberfläche des Trägers*
0–0' *Nullinie*
Z *Zugspannungen*
D *Druckspannungen*
② *vom Shotpeenen herrührende Zug- und Druckspannungen*
③ *Biegebelastung*
④ *durch Biegebelastung erzeugte Zug- und Druckspannungen*
⑤ *aus Biegebelastung und Shotpeenen resultierende Spannungsverteilkurve*

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 «Shot-peenen» die einen solchen Anriss verursachenden Zugspannungen an der Oberfläche herabgesetzt werden

sionskräfte. Als Beispiel zur Veranschaulichung dieser Verhältnisse zeigt Bild 2 die Mikroaufnahme eines Schliffes durch ein nach dem «Shot-peening»-Verfahren behandeltes Werkstück aus einer Aluminiumlegierung.

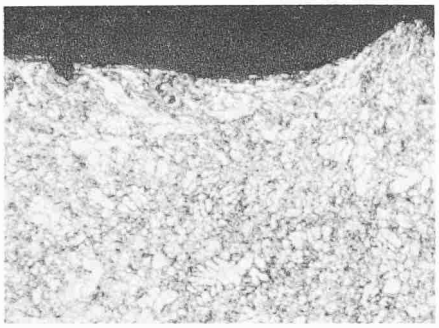

Bild 2. Mikrophotographie eines Schliffes durch ein nach dem Shot-peening-Verfahren behandeltes, aus einer Aluminium-Legierung bestehendes Werkstück. Strahlmittel: kugeliges Stahlschrot. Aufnahme im Mikroskop bei 100facher Vergrösserung. Man beachte die Verdichtung des Korngefüges in den obersten Materialschichten der Randzone

Wie bereits erwähnt, werden jedoch in der Flugzeugindustrie auch sehr viele Teile aus hochwertigen Stählen «gepeent». Zur Ergänzung zeigt Bild 3a einen Mikroschliff in 200facher Vergrösserung durch die Randzone eines nach dem «Shot-peening»-Verfahren behandelten Werkstückes aus Stahl 1020 nach SAE Norm, während Bild 3b

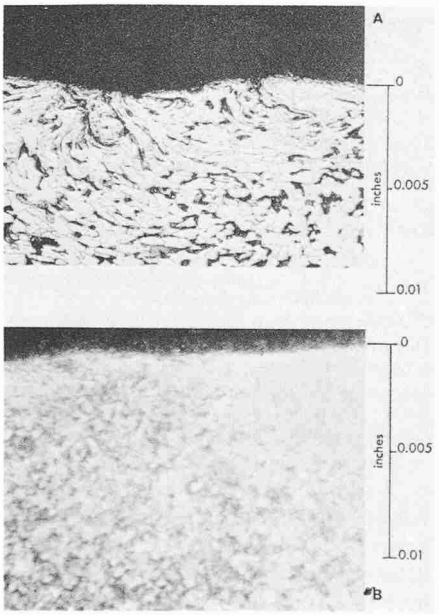

Bild 3. Mikrophotographien von Schliffen durch die Randschichten von nach dem Shot-peening-Verfahren behandeltem Stählen verschiedener Qualität. Strahlmittel: Stahlschrot. Aufnahmen im Mikroskop bei 200facher Vergrösserung. Am Rand eingezeichneter Massstab versteht sich in Zoll: 0,01" = 0,254 mm.

A (oben): Schliff durch Randzone eines Werkstückes aus Stahl 1020 nach SAE-Normen.

B (unten): Schliff durch Randzone eines Werkstückes aus Stahl 1010 nach SAE-Norm (Stahl mit hohem Kohlenstoffgehalt).

N.B. Härtemessungen haben gezeigt, dass insbesondere beim Stahl 1020 nach SAE-Norm die Aufhärtung des Metalls wesentlich tiefer herabreicht als die Materialschichten, in denen in den Mikroschliffen eine Deformation der Korngrenzen festgestellt werden kann

die Verhältnisse in einem Stahl mit hohem Kohlenstoffgehalt gemäss SAE Norm 1010 bei gleicher Vergrösserung nach dem «Peenen» zeigt. Die Strukturänderung zwischen der Randzone und den darunter liegenden Metallschichten ist offensichtlich und tritt besonders deutlich beim Stahl SAE 1020 in Erscheinung. Deutlich ist aber auch, dass die *Qualität des Grundmetalles* eine wesentliche Rolle spielt [3].

Ermittlung der anzuwendenden Strahlintensitäten

Spezifikationen und Pflichtenhefte in der Flugzeugindustrie

Der Erfolg der «Shot-peening»-Behandlung und vor allem die angestrebte Erhöhung der Dauerstandfestigkeit kann nur erreicht werden, wenn sämtliche Parameter genau eingehalten werden. Dies gilt ganz besonders für die *Strahlintensität*. Die Schwierigkeiten liegen jedoch ausschliesslich in der Ermittlung und definitiven Festlegung der bei der «Peening»-Behandlung anzuwendenden Werte. Zu diesem Zwecke müssen ganze Serien von Prüflingen zunächst «gepeent» und sodann auf Dauerstandfestigkeit unter Wechselbeanspruchung geprüft werden. Die Ergebnisse einer solchen Untersuchung werden sodann in Form einer sogenannten *Lebenserwartungs-Charakteristik* [4] des betreffenden Bauteils zusammengefasst. Da zumeist eine ganze Reihe von Parametern variiert werden muss, so ergeben sich in der Regel sehr ausgedehnte und somit aufwendige *Prüfstandversuche*, bis das gesuchte Resultat erreicht ist. Dieser Weg ist zwar langwierig, aber nur auf diese Weise lassen sich die erstaunlichen Leistungen des «Shot-peening»-Verfahrens erzielen. Dies gilt ganz allgemein für alle Anwendungsgebiete des «Shot-peening»-Verfahrens. Um jedoch diese an und für sich sehr zeitraubende Methode nach Möglichkeit abzukürzen, werden für die Vorversuche vielfach *Strahlintensitäts-Richtwerte* zugrunde gelegt, die auf früheren Erfahrungen basierend zusammengestellt sind. Da in der Flugzeugindustrie vielfach Werkstücke aus Stahl «gepeent» werden müssen, wurden in Bild 4 entsprechende Richtwerte in einem Diagramm zusammengestellt. Massgebend ist dabei stets der *Querschnitt mit der geringsten Materialstärke* an der *kritischen Stelle* des zu behandelnden Werkstückes.

In der Flugzeug-Industrie, in ihren Zulieferbetrieben und in den Werken, die sich mit der Herstellung von Düsentriebwerken befassen, müssen noch wesentlich umfangreichere Versuchsreihen gefahren werden, da zumeist noch zusätzliche Faktoren abgeklärt werden müssen. So muss wegen des geforderten hohen Sicherheitsgrades mit Hilfe des «Shot-peening»-Verfahrens und unter Verwendung hochbeanspruchter Werkstoffe von höchster Qualität ein möglichst geringes Stückgewicht erreicht werden. Im weitern sind Faktoren zu beachten, die durch im Verfahren begründete Sicherheitsüberlegungen verursacht werden. So ist man beim «Shotpeenen» von Bauteilen für den Flugzeugbau bestrebt, eine *Strahlmittelsorte* sowie eine *Körnung* zu wählen, die es zwar unter Einhaltung der gegebenen Bedingungen gestatten, die vorgeschriebenen *Almen-Test-Werte* zu erreichen, ohne die angestrebte Strahlintensität wesentlich zu überschreiten, auch nicht bei einer Verlängerung der Strahlzeit. Im englischen Sprachgebrauch bezeichnet man diesen Wert als *«peening intensity at saturation»* oder auch als *«Almen strip saturation intensity»*. Diese sehr treffenden Umschreibungen des Begriffs werden wohl am besten mit *«Strahlintensität bei Sättigung»* übersetzt. Als dritten wichtigen Faktor muss beim Festlegen der Parameter das Bestreben nach *Verfeinerung der Oberflächenstruktur* genannt werden, denn durch die geeignete Wahl der Strahlmittelkörnungen lässt sich überdies eine wesentliche *Verminderung der Oberflächenrauheit* erreichen. Sie wirkt sich im Sinne einer Verbesserung der Oberflächeneigenschaften aus und ergibt gleichzeitig auch eine hier sehr wichtige *Erhöhung der Dauerstandfestigkeit*. Die Glättung der Oberflächenstruktur vermindert zudem zusätzlich die Gefahr von Anrissen und bewirkt dadurch

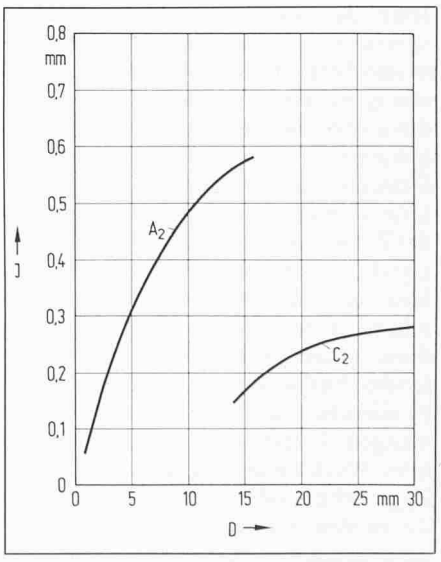

Bild 4. Peenen von Werkstücken aus Stahl. Richtwerte für die Strahlintensität in Funktion der Materialstärke an der kritischen Stelle des zu behandelnden Werkstückes, wobei der Querschnitt mit der geringsten Materialstärke massgebend ist.

J: Strahlintensität nach Almen-Test; D: Materialstärke (Dicke) in mm im schwächsten Querschnitt des zu behandelnden Bauteils; A_2: Richtwerte für die Strahlintensität nach Almen-Test mit Plättchen A_2; Richtwerte für die Strahlintensität gemessen mit Almen-Test-Plättchen C_2

auch die sehr erwünschte zusätzliche Erhöhung der Dauerstandfestigkeit.
Versucht man einen Überblick über diese verschiedenen Anforderungen zu gewinnen, muss man feststellen, dass es sich vielfach um *zueinander im Gegensatz stehende Faktoren oder Auflagen* handelt. Zum Beispiel sind bei vielen für den Flugzeugbau bestimmten Bauteilen aus Aluminium oder Al-Mg-Legierungen Strahlintensitäten vorgeschrieben bzw. erforderlich, die sich mit einer für die Oberflächenverfeinerung erwünschten Glasperlenkörnung gar nicht mehr erreichen lassen. In solchen Fällen wird gelegentlich die «Shot-peening»-Behandlung nach dem Zwei-Stufen-Verfahren durchgeführt [5]. In einem ersten Arbeitsgang werden die Teile unter Verwendung von *Stahlschrot* geeigneter Körnung behandelt, um so die gewünschte Strahlintensität zu induzieren. Sodann folgt ein *Nachstrahlen* mit *Glasstrahlperlen,* womit sich durch die Wahl einer geeigneten Körnung eine sehr wirksame Verminderung der Oberflächenrauheit erzielen lässt. Durch die Glättung der Oberfläche wird die oben erwähnte zusätzliche Verbesserung der Dauerstandfestigkeit und somit der Lebensdauer der behandelten Werkstücke erreicht.
Um die beste Lösung unter Berücksichtigung der genannten Faktoren zu ermitteln, ist es zunächst unumgänglich, ausgedehnte *Prüfstandversuche* auszuführen, bevor man an das Festlegen der Abmessungen dieser hochbeanspruchten Teile und der Parameter für das «Shot-peenen» herantreten kann. Hierzu gehört auch die Untersuchung ganzer Serien behandelter Teile auf *Dauerstandfestigkeit unter Wechselbeanspruchungen*. Je grösser die Anzahl der zu berücksichtigenden Faktoren, desto umfangreicher wird auch die Zahl der zu untersuchenden Varianten und somit auch die Dauer und der Umfang der Prüfstandversuche. Dieser Weg ist zwar sehr langwierig, aber nur auf diese Weise lassen sich gerade im Flugzeugbau die erstaunlichen Leistungen des «Shot-peening»-Verfahrens und die angestrebte Erhöhung der Lebensdauer erreichen. Die Ergebnisse solcher Untersuchungen werden in Form von *Lebenserwartungs-Charakteristiken* zusammengefasst, die sodann zur Festlegung der anzuwendenden Parameter usw. ausgewertet werden. Dieses ganze Verfahren ist sehr zeitraubend. Man ist deshalb bemüht, es nach Möglichkeit abzukürzen, indem für die Vorversuche vielfach zur Verfügung stehende Strahlintensitäts-Richtwerte zu Grunde gelegt werden, wie sie für Werkstücke aus Stahl als Funktion der Materialstärke in Bild 4 in einem Diagramm zusammengefasst sind. Wegen der verschiedenen zusätzlichen Auflagen werden im Flugzeugbau jedoch zumeist wesentlich niedrigere Strahlintensitäten als sonst üblich angewendet. Dies gilt ganz besonders für Bauteile aus Aluminium, Al-Mg-Legierungen und aus Titan. Auf diesem Gebiet geht man deshalb bei den Vorversuchen im allgemeinen von den in Bild 5 zusammengefassten Richtwerten aus, die sich ebenfalls stets als Funktion der Materialstärke im kritischen Querschnitt des zu behandelnden Bauteils verstehen.

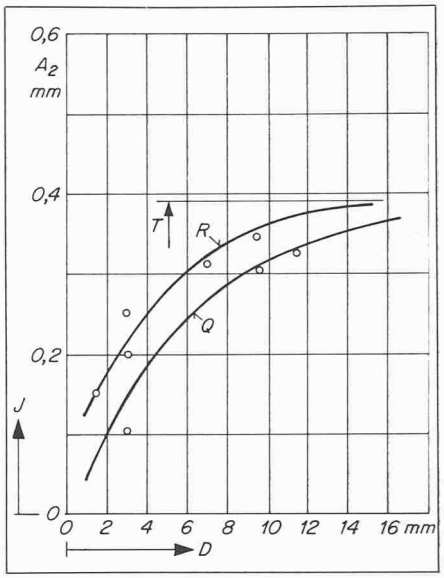

Bild 5 Peenen von Flugzeug-Bauelementen aus Aluminium- und Al-Mg-Legierungen. Richtwerte für die Strahlintensität an der kritischen Stelle des zu behandelnden Werkstückes, wobei der Querschnitt mit der geringsten Materialstärke massgebend ist.
J: Strahlintensität in mm gemessen mit Almen-Test-Plättchen A_2; D: Materialstärke (Dicke) in mm im schwächsten Querschnitt des zu behandelnden Bauteils; Q: im Flugzeugbau im allgemeinen übliche Almen-Test-Werte für Teile aus Aluminium und Al-Magnesium-Legierungen; R: Maximalwerte der Strahlintensität, die im Flugzeugbau beim Peenen von Teilen aus Aluminium und aus Al-Mg-Legierungen nicht überschritten werden; T: im Flugzeugbau werden auch bei grösseren Materialstärken als 15 mm und darüber keine höheren Strahlintensitäten als etwa A_2 = 0,39 bis 0,40 mm angewendet; Anmerkung: Die Strahlintensitäten gemäss Kurve R werden vor allem für Flugzeugbauteile aus Titan oder aus Stahl angewendet

«Shot-peening»-Arbeiten müssen jedoch nicht nur in den eigentlichen Herstellerwerken der Flugzeugindustrie durchgeführt werden, sondern auch in den mit *«Unterhaltsarbeiten»* an Flugzeugen, Flugmotoren und Strahltriebwerken beauftragten Werkstätten. Hier liegen jedoch ganz andere Verhältnisse vor. Die Wartungsvorschriften sehen in genau vorgeschriebenen Abständen die erforderlichen Unterhaltsarbeiten vor, gleichzeitig sind auch die dabei auszuführenden «Shot-peening»-Behandlungen spezifiziert, damit der bei den hochbeanspruchten Teilen erforderliche Vorspannungszustand der Oberflächenschicht im Betrieb gewährleistet bleibt. Die von den Lieferanten der Flugzeugindustrie und ihrer Zulieferbetriebe zur Verfügung gestellten Wartungsvorschriften sind sehr ausführlich gehalten und enthalten auch alle für das «Shot-peenen» erforderlichen Angaben, wie Strahlintensität sowie die übrigen Parameter. Prüfstandversuche usw. entfallen somit vollständig.

Anforderungen an die Anlagentechnik

Aus den Eigentümlichkeiten des «Shot-peening»-Verfahrens ergeben sich ganz besondere Anforderungen an die zu verwendenden Ausrüstungen. Das «Peenen» von Werkstücken lässt sich deshalb in Strahlanlagen wie sie allgemein für die verschiedensten Zwecke gebaut werden, nicht durchführen. Dafür sind eigens für diesen Zweck gebaute und den besonderen Anforderungen des Verfahrens genau angepasste Ausrüstungen erforderlich. Über die mit diesen Fragen zusammenhängenden Probleme hat der Autor kürzlich an dieser Stelle ausführlich berichtet und es sei hier deshalb auf diesen Bericht ausdrücklich hingewiesen. [6].

Bekämpfung der Spannungsrisskorrosion

Ausser den schon erwähnten klassischen Anwendungen wird das «Shot-peening»-Verfahren im Flugzeugbau auch mit grossem Erfolg zur Bekämpfung der Spannungsrisskorrosion vor allem bei Aluminiumlegierungen benützt. Es handelt sich hier um eine Erscheinung, die an unter *Zugbeanspruchung* stehenden *Oberflächen* von unter starker Dauerlast stehenden Bauteilen auftritt. Gerade im Flugzeugbau sind mit der Spannungsrisskorrosion Gefahren verbunden, denen ganz besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muss, wie aus nachfolgendem Beispiel hervorgeht. Es handelt sich um eines der grössten je im Flugzeugbau verwendeten Aluminium-Schmiedestücke im Gewicht von ca. 320 kg. Das aus der Legierung 7075-T 6 hergestellte Bauelement bildete einen Bestandteil des Haupt-Landefahrgestells. Während der ersten 15 000 Betriebsstunden waren keine Korrosionserscheinungen aufgetreten, obschon die Werkstücke vorher nicht gepeent worden waren. Zu diesem Zeitpunkt wurde bei einer Kontrolle ein Riss im Schmiedestück festgestellt. Bild 6 zeigt die kritische Stelle. Der Riss hatte seinen Anfang von einer Zapfenbohrung genommen, in die eine Gewindebüchse eingepresst war [7]. In Bild 7 sind die beiden einander gegenüberliegenden Bruchflächen zu sehen. Hier wurden drei Stellen zur Untersuchung im Elektronenmikroskop ausgewählt. An zwei Orten wurde eine spröde interkristalline Materialstruktur festgestellt mit eindeutigen Beweisen für das Vorliegen von Korrosionserscheinun-

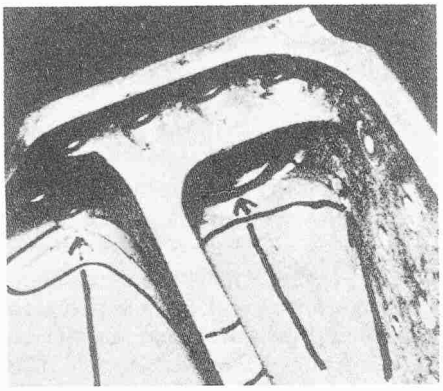

Bild 6. Spannungsrisskorrosion an einem 320 kg schweren Hauptbestandteil eines Landefahrgestells. Schmiedestück aus hochwertiger Aluminium-Legierung 7075-T 6. Ausgangsort der Rissbildung sind Zapfenbohrungen, in die Gewindebüchsen eingepresst waren. Die Korrosionserscheinung trat erst nach etwa 15 000 Betriebsstunden auf. (Photo: Metal Improvement Co., Carlstadt N.J.; USA)

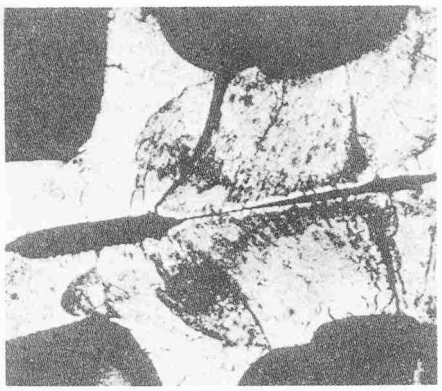

Bild 7. Spannungsrisskorrosion an einem grossen Schmiedestück aus einer hochwertigen Aluminium-Legierung. Das Bild zeigt die beiden einander gegenüberliegenden Bruchflächen des Materialrisses am Hauptbestandteil eines Landefahrgestells (siehe auch Bild 6). (Photo: Metal Improvement Co., Carlstadt, N.J.; USA)

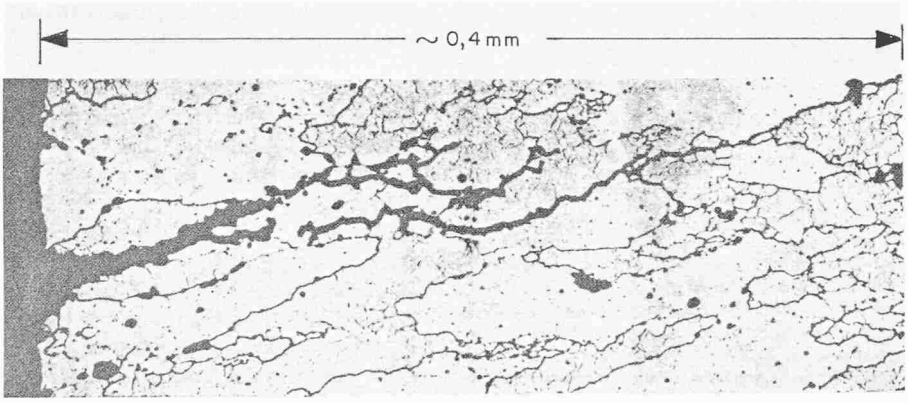

Bild 8. Spannungsrisskorrosion an einer rinnenförmigen Verstrebung zu einem Flügel-Querspant. Schmiedestück von etwa 2,4 m Länge aus der Aluminium-Legierung 7079-T 6. Die Breite der Rinne nimmt von 126 mm an einem Ende bis zu 32 mm am anderen Ende ab, gleichzeitig nimmt auch die Materialstärke von 3,2 auf 1,5 mm ab. Aufnahme im Mikroskop bei 500facher Vergrösserung. (Photo: Metal Improvement Co., Carlstadt, N.J.; USA)

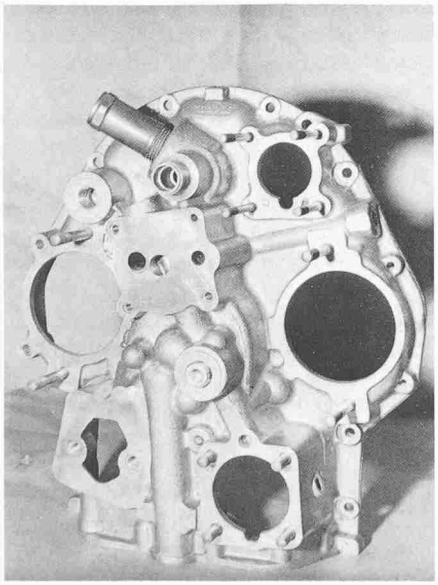

Bild 9. Aus einer Aluminium-Magnesium-Legierung gefertigter Gehäusedeckel eines Kolben-Flugzeugmotors nach der Strahlbehandlung mit Glas-Strahlperlen. (Photo: Sovitec SA. B-1170 Bruxelles)

gen. An der dritten Stelle wurde eine Übergangszone zwischen spröder und duktiler Metallstruktur festgestellt. In der Nähe der Bruchstelle wurden überdies zahlreiche weitere durch Spannungsrisskorrosion verursachte Anrisse beobachtet. Überdies wurde am gleichen Aluminium-Schmiedestück, aber an einem ganz anderen Teil des gleichen Werkstückes, ein weiterer massiver, durch den Querschnitt vollständig hindurchreichender Korrosionsriss festgestellt. Ein weiteres Beispiel ist in Bild 8 erläutert. Auf Grund dieser Untersuchungsergebnisse wurde für diese Aluminium-Schmiedestücke eine genau spezifizierte Shot-peening-Behandlung sämtlicher Oberflächen vorgeschrieben. Nur gepeente Teile dürfen seither verwendet werden. Es wurde auch angeordnet, dass an in Betrieb befindlichen Maschinen die Werkstücke ausgebaut und nachträglich gepeent werden müssen oder durch neue, bereits gepeente Stücke zu ersetzen sind. Die Massnahmen brachten den gewünschten Erfolg und mit ihm die entsprechend grosse Verlängerung der Lebensdauer. Auf Grund dieser Erfahrungen wurde sodann ganz allgemein für aus der Aluminium-Legierung 7079 - T6 hergestellte Schmiedestücke die Behandlung sämtlicher Oberflächen nach dem Shot-peening-Verfahren vorgeschrieben.

Auf der Suche nach Wegen, die mit der Spannungsrisskorrosion verbundenen Gefahren zu beheben oder zum mindesten stark einzuschränken, war es eine naheliegende und logische Schlussfolgerung, die gefährdete, unter Dauerzugbelastung stehende Seite des Werkstückes durch Shot-peenen zu behandeln, um so durch in die obersten Materialschichten induzierte Druckvorspannungen der die Rissbildung verursachenden Beanspruchung auf Zug entgegenzuwirken. Es soll auf diese Weise ein analoger Mechanismus zur Wirkung gebracht werden, wie er zuvor für die Biegebelastung eines Trägers beschrieben worden ist (vgl. Bild 1a und 1b). Die auf dem «Shot-peening»-Verfahren beruhende Methode hat sich seither für die Bekämpfung der Spannungsrisskorrosion («Stress corrosion-cracking») als sehr wirksam erwiesen, denn sie führt zu ungewöhnlich grossen Verlängerungen der Dauerstandfestigkeit der behandelten Werkstücke.

Shot-peenen von Gehäusen aus Aluminiumguss

Flugzeugmotorengehäuse werden einschliesslich der *Ölwanne* zumeist in dünnwandigem Aluminiumguss ausgeführt. In Anbetracht des Verwendungszwecks müssen Massnahmen ergriffen werden, um *Ölverluste* auszuschliessen. Daher werden aus Aluminiumlegierungen hergestellte Gussstücke nach dem «Shot-peening»-Verfahren behandelt, da auf diesem Wege in den obersten Materialschichten die Poren geschlossen und so die Dichtigkeit der Gusswände wesentlich verbessert wird. Bild 9 zeigt einen so behandelten, aus einer Al-Mg-Legierung gefertigten Gehäusedeckel eines Flugzeugmotors nach der Peening-Behandlung. Als Strahlmittel wurden in diesem Falle Glasstrahlperlen verwendet, um aus Sicherheitsgründen auch die bei Verwendung von Strahlmitteln auf Stahlbasis stets bestehende Gefahr des durch eisenhaltige Staubreste verursachten Lochfrasses einwandfrei auszuschliessen.

Innenverzahnungen in den Stutzen eines Nabengehäuses

Im Flugzeugbau handelt es sich oft um die Behandlung *sehr kompliziert geformter Werkstücke*, an denen überdies

zumeist *nur ein Teil der Flächen* zu peenen ist, während die anderen Oberflächen vor der Einwirkung des Strahlmediums geschützt werden müssen. Die dabei auftretenden Schwierigkeiten werden wohl am besten durch Bild 10 veranschaulicht. Es sei noch erwähnt, dass das Beispiel den Wartungsvorschriften entnommen wurde, die von einem bekannten Flugzeughersteller zuhanden der Unterhaltswerkstätten herausgegeben wurden. Es handelt sich um ein Nabengehäuse, in dem nur die im Innern der drei Gehäusestutzen befindlichen *Zahnkränze* gepeent werden müssen. Alle übrigen Innenflächen, da bereits bearbeitet, müssen mit Hilfe geeigneter *Schutzabdeckungen* vor der Wirkung des Strahlmittels geschützt werden. Die Behandlung ist in einer nach dem *Gravitationssystem* arbeitenden, mit einem Drehtisch geeigneter Grösse ausgerüsteten Strahlkabine auszuführen, unter Verwendung einer Injektorstrahlpistole, die mit Hilfe einer speziellen, in Bild 10 eingezeichneten Haltevorrichtung, in verschiedenen Arbeitsstellungen montiert werden kann. Im Pflichtenheft ist als wesentliche Auflage spezifiziert, dass sämtliche gestrahlten Flächen und insbesondere die beiden Zahnflanken eine vollständig gleichartige Behandlung erhalten müssen. Für die Montage des Nabengehäuses auf dem Drehtisch der Strahlkabine ist eine spezielle Aufspannvorrichtung erforderlich, die in Bild 10 teilweise zu sehen ist. Das Peenen der Verzahnung in jedem der drei Gehäusestutzen erfordert jeweilen ein neues Ausrichten des Werkstückes auf der Hilfseinrichtung. Für jede dieser drei Einspannungen sind zwei verschiedene Düsenstellungen gemäss der Skizze D in Bild 10 erforderlich. Die vollständige «Shot-peening»-Behandlung des Nabengehäuses umfasst somit insgesamt *sechs Strahloperationen*, die unter sonst gleichen Arbeitsbedingungen (Strahlzeit, Arbeitsdruck, Strahlmittelkörnung usw.) durchgeführt werden müssen. Nur so ist die geforderte identische Behandlung aller Zahnflanken gewährleistet. Was die nach dem Druckluftsystem arbeitende Strahlkabine selber anbelangt, so sei auf den an dieser Stelle erschienenen Aufsatz des Autors über «das ‹Shotpeening›-Verfahren und die Anlagetechnik» verwiesen [6].

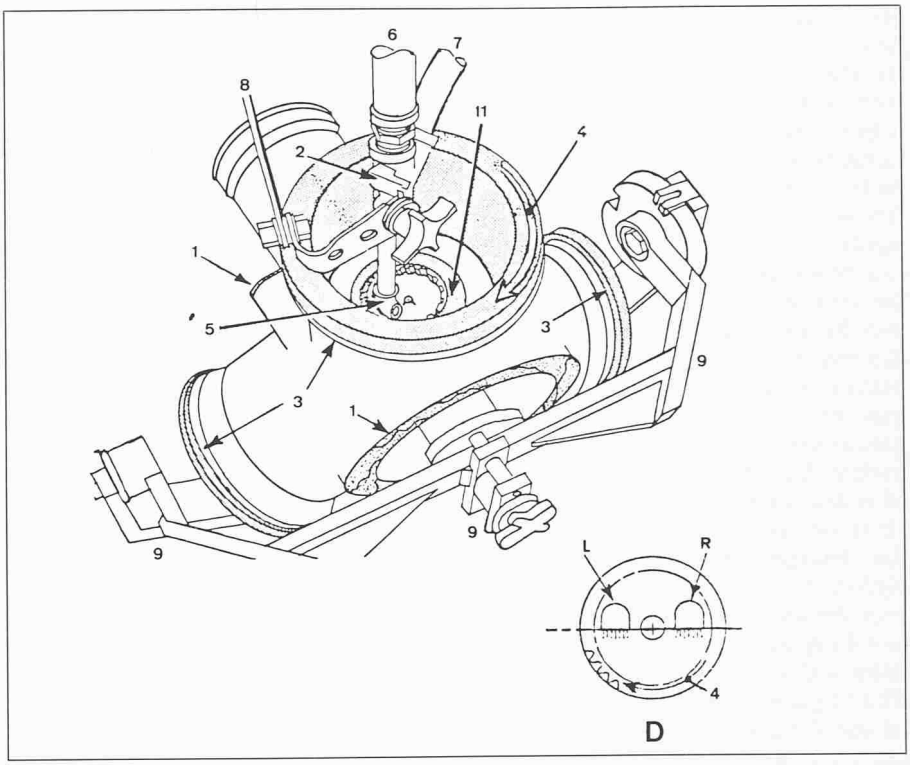

Bild 10. Shotpeenen der Zahnkränze im Innern des Nabengehäuses in einer nach dem Druckluftsystem arbeitenden Strahlkabine.
1: mit Gummiklebbändern abgedeckte Stirnflächen; 2: Injektor-Strahlpistole; 3: Schutzabdeckungen für Innenflächen und Schraubengewinde der drei Gehäusestutzen; 4: Drehrichtung des Werkstückes; 5: Strahldüse zur 90°-Umlenkung des Strahls in die Horizontalebene; 6: Druckluftzuleitung aus Stahlrohr zur Pistole Pos. 2; 7: Gummischlauch für Strahlmittel-Zuführung; 8: Haltevorrichtung für Pistole; 11: Schutzabdeckung für bearbeitete Seitenflächen der Verzahnung; D: Skizze über die beiden nacheinander durchzuführenden Arbeitsstellungen der Strahldüse.
N.B. Vollständig gleiche Behandlung aller Flächen und insbesondere der beiden Zahnflanken ist erforderlich. Dazu sind die in Skizze D angegebenen beiden Düsenstellungen unter sonst identischen Arbeitsbedingungen erforderlich

Bild 11. Linksseitiges Haupt-Fahrgestell des Überschallflugzeuges «Concorde». 1: Haupt-Zylinder des Fahrgestells mit eingebauter Stossdämpfung (siehe Bild 12); H: Hilfs-Zylinder für das Einziehen des Fahrgestells während des Fluges ins Innere des Flugzeugflügels; N: zweiter Hilfszylinder; E: grosses, zum Herunterlassen des Fahrgestells aufklappbares Segment der Flügel-Unterseite.
Man beachte die an der mit «R» bezeichneten Stelle besonders gut sichtbare, durch Fräsen hergestellte, profilartige starke Verrippung der dem Flügelinnern zugekehrten Innenseite des Beplankungssegments. (Photo: Pneumatiques Kleber-Colombes S.A. Paris. Hersteller des Fahrgestells sind die zur SNECMA-Gruppe gehörenden Hispano-Suiza-Werke)

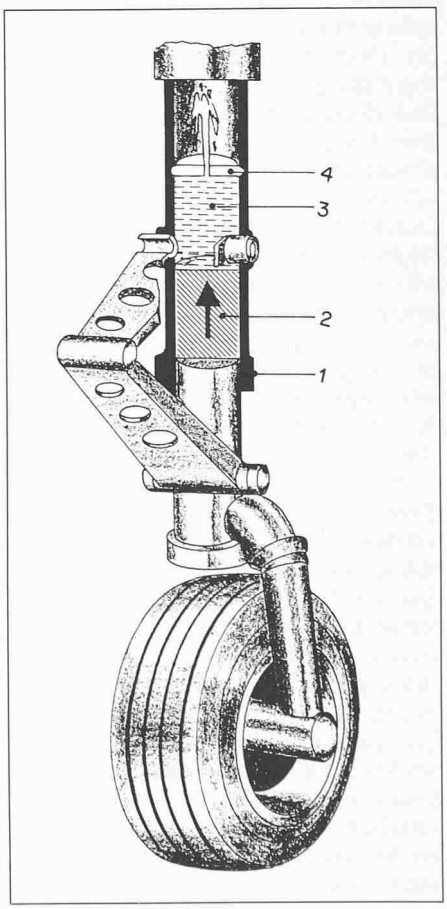

Bild 12. Grundprinzip der Stossdämpfung für Flugzeugfahrgestelle. 1: Aussenzylinder des Stossdämpfers; 2: Kolben; 3: Hydrauliköl; 4: Abschlusswand mit Bohrung

Teile des Fahrgestells

Praktisch alle Flugzeuge werden heute mit Fahrgestellen nach dem *3-Rad-Prinzip* ausgerüstet. Gemäss den Sicherheitsvorschriften müssen alle Verkehrsflugzeuge zum mindesten mit *doppelbereiften Rädern* ausgerüstet sein, während alle grossen Verkehrsmaschinen zumeist *vierfache Bereifungen* erhalten. Bild 11 zeigt als Beispiel das linke Hauptfahrgestell des Überschall-Passa-

gier-Flugzeuges «Concorde No. 001». Sowohl bei der hier gezeigten Konstruktion wie bei fast allen anderen Systemen gelangt das in Bild 12 veranschaulichte Grundprinzip zur Anwendung, bei dem das im Zylinder enthaltene Hydrauliköl als Stossdämpfer dient. Bei jeder Landung und bei jedem Start werden alle Teile des Fahrgestells starken Stossbeanspruchungen ausgesetzt. Bei den meisten Konstruktionen sind sowohl der Aussenzylinder als auch der Kolben aus hochwertigem legiertem Stahl gefertigt und werden in der Regel gepeent. Dies gilt auch für die Achslagerung der Vielfach-Räder und für viele andere Bestandteile des Fahrgestells. Was den *Aussen-Hauptzylinder* betrifft, ist er im Grunde genommen das Bein des Fahrgestells und hat somit die eigentliche *Hauptbelastung* aufzunehmen. Bei allen Konstruktionen für grössere Flugzeuge handelt es sich um verhältnismässig lange Stücke, wie aus Bild 12 gut ersichtlich ist (in der Skizze ist der Zylinder oben abgebrochen gezeichnet), deren kritische Zone auf der Aussenseite gepeent werden muss. Deshalb wird in der Regel der Zylinder nicht auf der ganzen Länge der Aussenseite, sondern nur der Sektor mit den höchsten Belastungen behandelt. Aber nicht nur das eigentliche Bein des Fahrgestells, sondern auch die Hilfs- und Betätigungszylinder sind starken Belastungen und Stossbeanspruchungen ausgesetzt, wenn auch nicht in gleich hohem Masse (siehe Bild 11, Pos. H und N). Deshalb werden sie in der Regel ebenfalls gepeent. Da es sich um zylinderförmige Werkstücke von beachtlicher Länge handelt, die eine allseitig gleichförmige Behandlung erhalten müssen, gibt man vielfach für die Durchführung des Shot-peening-Verfahrens sogenannten «Car-Type»-Maschinen den Vorzug, wobei der mit einem in der Längsrichtung angeordneten Walzenpaar ausgerüstete Werkstückwagen der Anlage eine den Abmessungen der zu behandelnden Zylinder entsprechende Länge haben muss. Die zu behandelnden Teile können jedoch durchaus nicht immer direkt auf diese sich drehenden Walzen gelegt werden. Es werden dann geeignete Hilfseinrichtungen verwendet. Im übrigen hat der Autor über «Car-Type»-Strahlmaschinen in dem an dieser Stelle bereits erschienenen Aufsatz über «Shot-peening-Verfahren und Anlagetechnik» berichtet [8].

Eine ganz andere Lösung des Problems des Shot-peenens von Teilen des Fahrgestells wird gelegentlich von Flugzeugunterhalt-Werkstätten bevorzugt, wobei besonders für diese Zwecke angepasste, mit *Drehtischen* grossen Durchmessers sowie mit *Siebstationen* ausgerüstete Anlagen verwendet werden. Solche Ausrüstungen bieten wesentlich vielseitigere Möglichkeiten. Bild 13 vermittelt einen Blick in das Innere einer solchen Maschine. Der 4,5 m im Durchmesser messende Drehtisch ist auf einem Fahrwagen aufgebaut und kann somit zum Be- und Entladen aus der Anlage nach vorn ausgefahren werden. Die Ladefähigkeit beträgt 1000 kg. Im Bild 13 ist auf dem Drehtisch der Mittelteil eines vierachsigen Fahrgestells, bereit zum Shot-peenen, zu sehen. Die Maschine ist mit vier Schleuderrädern von je 15 PS-Antriebsleistung ausgerüstet, von denen zwei auf dem Dach des Maschinengehäuses und die restlichen zwei an der Seitenwand angeordnet sind. Die Anlage ist mit einer leistungsfähigen, auf dem Dach der Kabine aufgebauten Rotations-Sieb-Anlage ausgerüstet, die so ausgelegt ist, dass wahlweise mit den zwei normgerecht kalibrierten Schrot-Körnungen S-110 und S-230 gearbeitet werden kann. Die eindrucksvolle Grösse der Maschinenanlage geht aus folgenden Abmessungen hervor: Grundfläche des Maschinengehäuses: 5,4×8,4 m. Gehäusehöhe: 3 m. Gesamthöhe der Anlage einschliesslich Siebstation, Aufbauten und Becherwerke: ca. 11 m. Im Bild 13 ist nur der hell beleuchtete vordere Teil im Innern der Strahlmaschine zu sehen.

Einen Überblick über den Gesamtaufbau von Anlagen dieser Art vermittelt Bild 14. Es handelt sich allerdings um eine etwas kleinere Maschine der Bau-

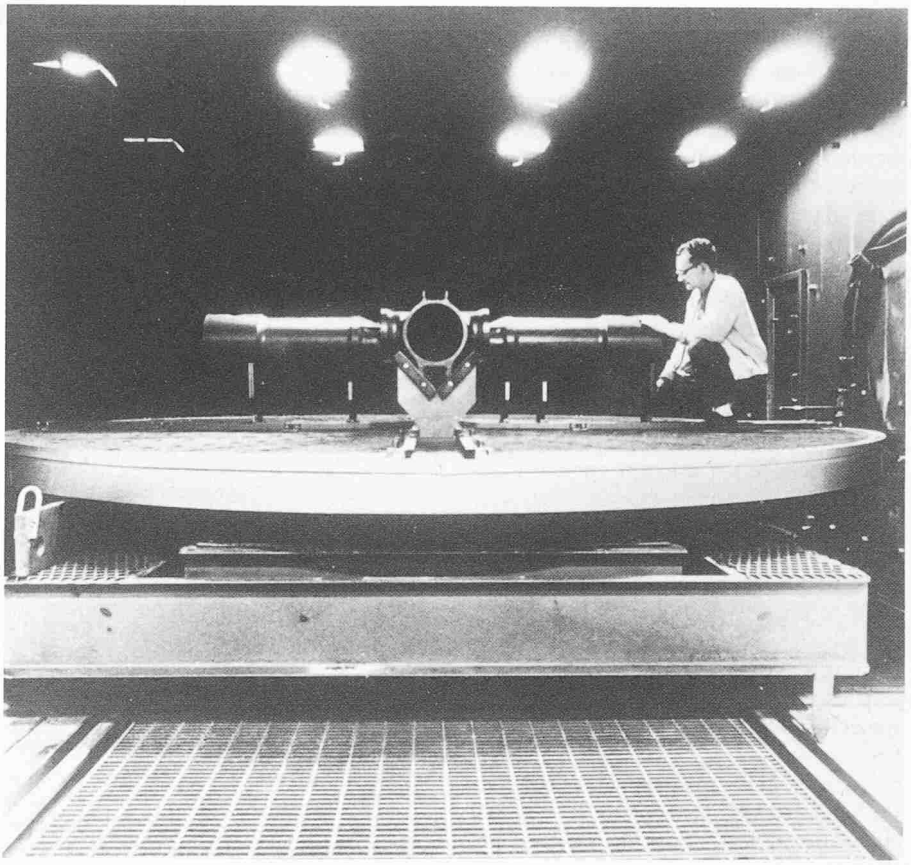

Bild 13. Mit vier Schleuderrädern von je 15 PS bestückte Peening-Anlage für die Behandlung von Fahrgestellteilen in den Werkstätten der Bendix Corp. in USA mit auf einem Fahrwagen aufgebauten grossen Drehtisch von 4,5 m Durchmesser und 1 t Tragkraft. Der vordere Teil des Kabinengehäuses ist mit einer leistungsfähigen Beleuchtungseinrichtung zu Inspektionszwecken versehen. Auf dem Drehtisch liegt im Bild das grosse Mittelstück eines schweren, vierfach bereiften Fahrgestells. (Photo: Wheelabrator Corp. Mishawaka, Indiana USA)

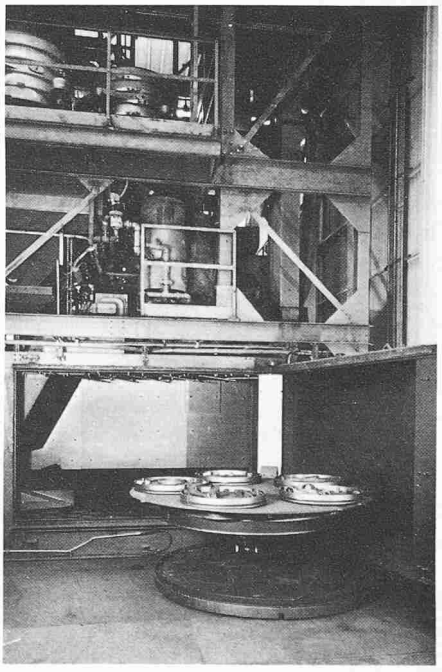

Bild 14. Shot-peening-Anlage für die Behandlung von Teilen des Fahrgestells in den Unterhaltswerkstätten einer Fluggesellschaft (United Airlines). Mit zwei Schleuderrädern bestückte «Swing-Table»-Maschine mit an der Vordertüre angebautem, ausschwenkbarem Drehtisch von 2,45 m Durchmesser. Das Bild zeigt auf dem Tisch zahlreiche, verschiedene kleinere Teile, die für allseitige Behandlung mehrfach gewendet werden müssen. Auf dem Dach der Strahlkabine die Strahlmittel-Siebstation mit zwei fünfstöckigen Rotationssieb-Gruppen. (Photo: Wheelabrator Corp. Mishawaka, Indiana, USA)

art «Swing-Table», die mit einem an der Vordertüre befestigten und somit ausschwenkbaren Drehtisch von 96″ (2,45 m) Durchmesser sowie mit nur zwei Schleuderrädern ausgerüstet ist. Zur Ausrüstung gehört eine besonders leistungsfähige Siebanlage, die mit Rotationssieben arbeitet und für die Kalibrierung von fünf verschiedenen Schrotkörnungen ausgelegt ist.

Die Verwendung von nach dem *Drehtischprinzip* arbeitenden, mit Schleuderrädern bestückten Strahlmaschinen für das Peenen von Teilen zu Fahrgestellen, hat einen gewichtigen *Nachteil*, auf den bei den Arbeiten sorgfältig geachtet werden muss, ist doch bei diesem Verfahren eine gleichartige Behandlung aller Flächen Voraussetzung des Erfolges [9]. Dies gilt für alle Parameter und vor allem für Strahlintensität und Flächenüberdeckungsgrad. Aber gerade diese Forderungen lassen sich auf Drehtischmaschinen in der Praxis nicht erfüllen. So wird beispielsweise die in Bild 13 gezeigte Achslagerung eines vierfach bereiften Landefahrgestells zwar in zwei Malen, d. h., je einmal auf jeder der beiden Seiten gestrahlt. Es ist jedoch offensichtlich, dass eine auch nur einigermassen gleichartige Beaufschlagung aller Oberflächen sich gar nicht erreichen lässt. Ein weiteres Wenden des Werkstückes bringt keine Verbesserung des Resultates. Etwas günstiger liegen die Verhältnisse gelegentlich bei den Haupt- und Hilfszylindern, sofern sie mindestens zweimal gewendet und so in insgesamt in drei Stellungen behandelt werden können. Aber auch dann ist das Ergebnis weit von der geforderten Gleichmässigkeit von Strahlintensität und Flächenüberdeckung entfernt. Somit lassen sich auf Drehtischmaschinen Shot-peening-Behandlungen nur spezifikationskonform durchführen, wenn «Strahlintensitäten bei Sättigung» angewendet werden und Strahlmittelsorte und -körnung entsprechend gewählt werden, damit auch an den überstrahlten Stellen die vorgeschriebenen Almen-Test-Werte nicht wesentlich überschritten werden. Beim Arbeiten mit Drehtischmaschinen ist somit die Betriebsführung mit zusätzlichen Auflagen und Einschränkungen verbunden.

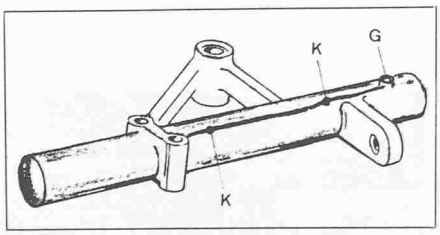

Bild 15. Spannungsrisskorrosion an einem aus der Aluminium-Legierung 7075-T 6 geschmiedeten Hauptzylinder eines Landefahrgestells. Der Riss «K» verläuft entlang dem von der Schmiedeform herrührenden Brauen und endigt an der Stelle «G», wo eine Gewindebüchse eingepresst ist

Im Verlauf der letzten Jahre sind immer wieder Untersuchungen bekannt geworden, in denen sich als *Ursache von Brüchen im Fahrgestell* die *Spannungsrisskorrosion* nachweisen liess. Zu ihrer Bekämpfung wird heute in vermehrtem Masse und an fast allen Teilen des Fahrgestells eine geeignete Shot-peening-Behandlung vorgeschrieben. Als Beispiel sei folgender Fall erwähnt. Ein seit einiger Zeit in normalem Betrieb stehendes Kampfflugzeug wurde zur regelmässigen, in bestimmten Intervallen stets wiederkehrenden Routinewartung in die Werft zurückgeschoben, wo zunächst nichts besonders an den Fahrgestellen bemerkt wurde. Noch während der Servicearbeiten jedoch sackte eines der Fahrgestelle plötzlich zusammen. Bei der anschliessenden Untersuchung wurde an einem der Zylinder ein durchgehender Längsriss festgestellt. Wie aus Bild 15 hervorgeht, beginnt der Riss in der linken unteren Bildecke an einer Zapfenbohrung, in die eine Gewindebüchse eingepresst ist, und verläuft sodann den von der Schmiedeform herrührenden Brauen entlang bis zu der am anderen Ende des Zylinders befindlichen Gewindebüchse. Der Zylinder ist als Schmiedestück aus Aluminium 7075-T 6 gefertigt. Genaue Untersuchungen der Bruchflächen und des Materials ergaben als Ursache einwandfrei Spannungsrisskorrosion. Zu ihrer Behebung wurde mit bestem Erfolg das Shot-peenen aller Bestandteile des Fahrgestells eingeführt [14].

Helikopter-Propeller und ihre Antriebselemente

Die Propellerblätter von Helikoptern haben eine Länge von bis zu 8 m und manchmal sogar mehr. Sie werden aus Rohlingen gefertigt, die nach dem Schmiedeverfahren hergestellt wurden. Sie sind an der Wurzel im Innern hohl. Es sind sehr hoch beanspruchte, aus legiertem, hochwertigem Material hergestellte Bauelemente. Die kritische Zone erstreckt sich im allgemeinen über das wurzelseitige erste Fünftel bis Viertel der gesamten Propellerblattlänge. Daher wird das wurzelseitige Ende des Propellerblattes auf dieser Länge nach dem Shot-peening-Verfahren behandelt, und zwar auf der Aussen- und auch auf der hohlen Innenseite. Dazu wird eine Anlage verwendet, die das Problem in kombinierter Arbeitsweise löst. Für das Peenen der Innenseite des hohlen Wurzelendes gelangen zwei nach dem Druckluftsystem arbeitende Strahldüsen zum Einsatz, während die Aussenflächen der Propeller mit Hilfe eines Schleuderrades gestrahlt werden. Die nach dem Prinzip der «Car-Type»-Maschinen aufgebaute Anlage[10] hat eine Gesamtlänge von 13,5 m und eine Breite von 3,0 m, während der im Innern des Maschinengehäuses unter dem einzigen Schleuderrad hin- und her fahrende, mit zwei Tragwalzenpaaren bestückte Werkstückwagen eine Länge von 5,2 m aufweist. Bild 16 veranschaulicht das Arbeitsprinzip. Der Werkstückwagen ist somit mit vier Walzen

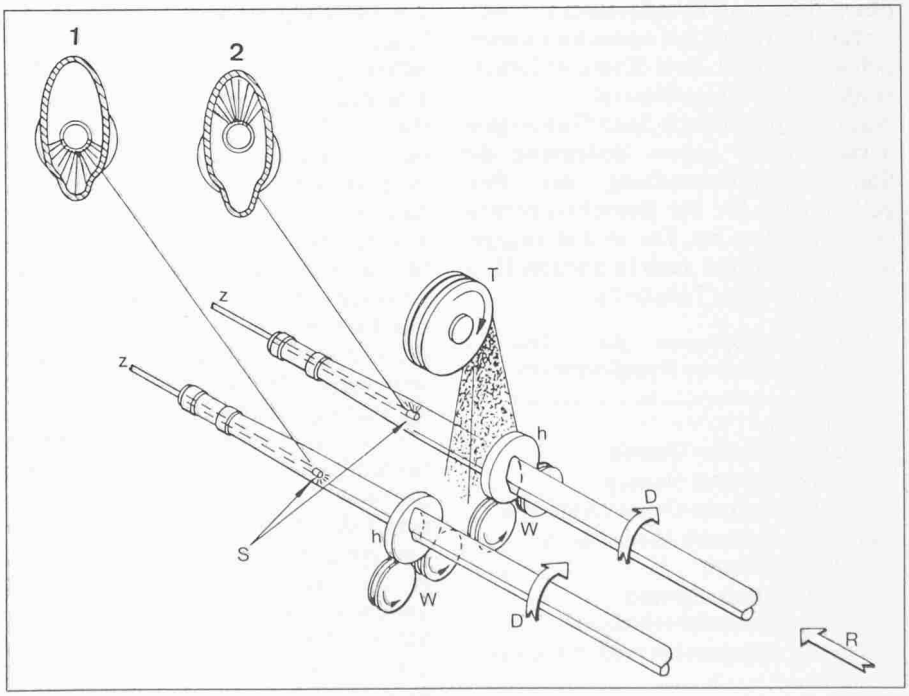

Bild 16. Arbeitsprinzip der Wheelabrator-Anlage zum Peenen der Helikopter-Propeller in den Werken der Boeing Comp., Vertol Division, mit Schleuderrad zur Behandlung der Aussenseite, während die Wurzelenden mit Druckluft-Strahldüsen gepeent werden. W: Auflagerollen der vier Walzen zur Aufnahme von zwei nebeneinanderliegenden Propellerblättern; D: Drehrichtung der Propellerblätter auf dem Werkstückwagen; R: Vorschubrichtung des Werkstückwagens mit den darauf liegenden Propellerblättern; S: nach dem Druckluftsystem arbeitende Strahldüsen für das Peenen der Innenseite der Wurzelenden.
1: Schnitt durch Wurzelende mit der ersten nach unten strahlenden Strahldüse; 2: Schnitt durch das Wurzelende des zweiten Propellers mit nach oben wirkender Strahldüse (1 und 2 in vergrössertem Massstab gezeichnet). T: Schleuderrad

zur Aufnahme von zwei nebeneinanderliegenden Propellerblättern ausgerüstet. Es ergibt sich folgender *Arbeitszyklus:* Bei geöffneter Beladetüre wird ein Propellerblatt auf die Mitnehmerscheiben des ersten, vorderen Walzenpaares aufgelegt. Die Beschickungsstation wird geschlossen. Danach fährt der Werkstückwagen mit hoher Vorschubgeschwindigkeit in die Strahlzone, während das Propellerblatt sich um die eigene Längsachse dreht. Die Rückfahrt des Wagens in die Beladestellung erfolgt langsam. Während der Rückfahrt ist die erste der beiden Strahldüsen in Betrieb und peent einen Teil der Innenfläche der Propellerwurzel. Nach beendigtem Rücklauf des Werkstückwagens wird das Propellerblatt vom ersten auf das zweite, hintere Walzenpaar hinübergelegt und sodann der Wagenvorschub wieder eingeschaltet. Beim Einlaufen in die Strahlzone fährt nunmehr das erste Propellerblatt mit hoher Geschwindigkeit unter dem eingeschalteten Schleuderrad hindurch und die Aussenseite wird gepeent. Der Rücklauf erfolgt wiederum langsam, wobei die hintere der beiden Strahldüsen die restliche Innenfläche fertig behandelt. Somit können nach Inbetriebnahme zwei Propellerblätter gleichzeitig aussen und innen gepeent werden. Die Einfahrgeschwindigkeit des Wagens kann im Bereich zwischen 0,3 bis 0,9 m/min und die Rückfahrt aus der Strahlzone d. h. die langsame Bewegung beim Druckluftstrahlen zwischen 0,1 und 0,3 m/min einreguliert werden. Es sei noch erwähnt, dass die beiden Strahldüsen nach dem Drucksystem arbeiten, wofür die Anlage mit einem kontinuierlich arbeitenden Zwei-Kammer-Druckstrahlgebläse ausgerüstet ist.

Aus der *Pflichtenheft-Spezifikation* geht hervor, welch grosse Bedeutung die Shot-Peening-Behandlung der Propellerblätter für die Betriebssicherheit der Helikopter hat. Die in ihm angegebenen Daten sind auch in anderer Hinsicht interessant (Tabelle 1).

Tabelle 1. Spezifikation für «Shot-peening»-Behandlung von Propellerblättern

Strahlmittel: Stahlschrot erster Qualität
Körnung nach SAE-Normen: S-330 (Nennkorn-Grösse 0,8 mm [14]
Strahlintensität nach Almen-Test A_2: 0,25 bis 0,35 mm
Flächenüberdeckungsgrad: **doppelte** Flächenüberdeckung!
Länge der zu peenenden Propellerwurzel: 1,5 m

Gemäss der Spezifikation ist somit an der Wurzel eine erste Zone von 1,5 m Länge zu peenen. Die Strahlanlage ist jedoch so ausgelegt, dass hier eine Zone von bis 3,0 m Länge behandelt werden kann. Aus der verlangten *doppelten Flächenüberdeckung* geht hervor, dass die angegebene Strahlintensität als im Sättigungszustand vorgeschrieben verstanden werden muss. Die im Pflichtenheft angegebene doppelte Flächenüberdekkung bedarf zudem der Erläuterung, steht doch der verwendete Ausdruck mit der Theorie und mit der Praxis im Widerspruch.

Die Flächenüberdeckung, d. h. der Überdeckungsgrad, nimmt zwar mit länger werdender Strahlzeit ständig zu, nähert sich aber dem theoretischen Maximalwert von 100 Prozent asymptotisch und kann ihn somit innerhalb einer praktisch anwendbaren Strahlzeit nicht erreichen. Unter der in der Spezifikation vorgeschriebenen doppelten Flächenüberdeckung ist somit eine Shot-peening-Behandlung mit *doppelt so lange Strahlzeit* zu verstehen als für das Erreichen eines Überdeckungsgrades von etwa 98–99 Prozent notwendig sein würde. Die Vorschrift kann nur als die Auflage eines *hohen Sicherheitsfaktors* zusätzlich zu einer Strahlintensität bei Sättigung verstanden werden. In der Praxis werden heute sämtliche Bauelemente des Propellerantriebes von Helikoptern gepeent (Bilder 16 A und 16 B). In Anbetracht der im Helikopterbau üblichen, verhältnismässig kleinen Stückzahlen, werden diese Teile in nach dem Druckluftsystem arbeitenden Shot-peening-Kabinen behandelt. Es sei insbesondere auf die dort beschriebene Kabine zum Peenen von hochbeanspruchten Antriebritzeln mit Helikoidverzahnung verwiesen, die oft den Bestandteil des Propellerantriebs von Helikoptern bilden.

Aus hochwertigen Leichtmetall-Legierungen gefertigte Teile des Propellerantriebs müssen der sehr grossen qualitativen Anforderungen wegen vielfach nach dem Zwei-Stufen-Verfahren gepeent werden [11]. Die vorgeschriebene Strahlintensität wird in einem ersten

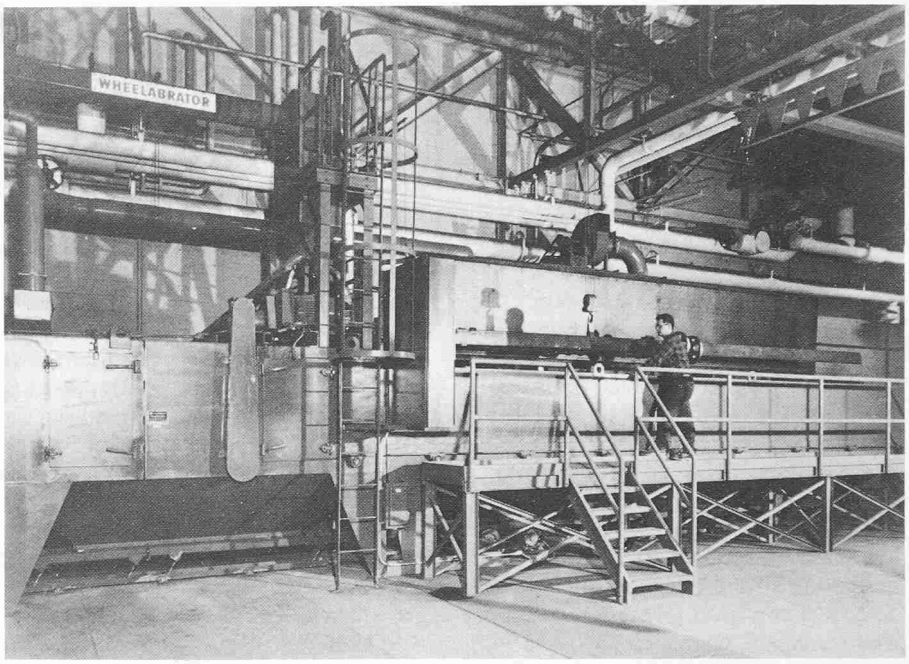

Bild 16 A. Gesamtansicht der Wheelabrator-Anlage zum Peenen von Helikopter-Propellern. Sie ist ausgerüstet mit einem Schleuderrad für das Peenen der Aussenseite und zwei nach dem Druckluftsystem funktionierenden Strahldüsen zur Behandlung der Innenseite der Wurzelenden. Arbeitsweise siehe Diagramm Bild 16. Das Photo zeigt das Einbringen eines Propellers mittels Hebezug. Gesamtlänge der Maschine 13,5 m bei einer Breite von 3 m.
(Photo: Wheelabrator Corp. Mishawaka Indiana USA)

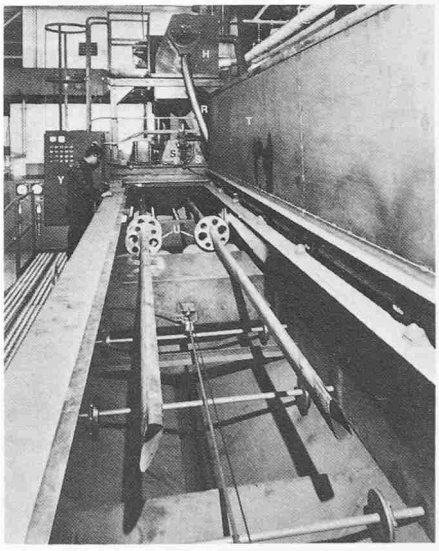

Bild 16 B. Blick in die geöffnete Beladestation der Anlage zum Shot-peenen von Helikopter-Propellern. Arbeitsweise siehe Diagramm Bild 16. Bei geöffnetem Deckel der Beladestation sind die beiden Propeller mit den aufgesteckten Mitnehmerscheiben «U» auf den beiden Walzenpaaren des Werkstückwagens aufliegend gut zu sehen. Im Hintergrund das Gehäuses des Schleuderrades und darüber der Hochleistungs-Kaskaden-Abscheider für die Aufbereitung des Strahlmittels.
T: Deckel der Beladestation (geöffnet); H: Hochleistungs-Kaskadenabscheider; R: Überlauf-Leitung für das Strahlmittel vom Kaskaden-Abscheider zum Becherwerksfuss; S: Schleuderrad; J: Strahlmittel-Zuleitung vom Silo des Kaskaden-Abscheiders zum Schleuderrad; Y: Schalt- und Steuerschrank.
(Photo: Wheelabrator-Frye Inc. Materials Cleaning Systems Div. Mishawaka, Indiana USA)

Arbeitsgang unter Verwendung eines Strahlmittels auf Stahlbasis geeigneter Körnung erzielt. Sodann folgt in einem zweiten Arbeitsgang ein Nachstrahlen mit Glastrahlperlen. Man erreicht dadurch eine wirksame Reinigung der Werkstückoberfläche von eventuell noch anhaftenden Eisenstaubresten, auch wird so eine wesentliche Verbesserung der Oberflächeneigenschaften und eine beachtliche Reduktion der Oberflächenrauheit erzielt. Die Glättung der Oberfläche wirkt sich wie eine zusätzliche Verbesserung der Dauerstandfestigkeit und somit auch der Lebensdauer aus, da die Gefahr von Anrissen stark vermindert wird. Bei für den Helikopter-Antrieb bestimmten Teilen folgt sodann zumeist eine Plattierung im galvanischen Bad.

Flügelbeplankungen und ähnlich grosse Elemente

Überall, wo Flugzeuge hergestellt werden, müssen heute mancherlei Bauelemente aus Aluminium oder aus Al-Mg-Legierungen mit sehr beachtlichen Abmessungen gepeent werden, zum Beispiel Seiten- und Höhenruder, Flügelbeplankungen, Teile der Zelle usw. Für die Bewältigung dieser Aufgaben werden Ausrüstungen benötigt, die in mancher Hinsicht an Anlagen aus dem Grossmaschinenbau erinnern. In den *Fabrikationsbetrieben* der Flugzeugindustrie muss man überdies jederzeit in der Lage sein, jedes Bestandteil oder Werkstück in genau gleicher Ausführung wieder anzufertigen, sei es für die Lieferung von Ersatzteilen, sei es bei der Auflage einer neuen Serie des gleichen Baumusters. Diese Forderung gilt in vollem Umfang auch für die Durchführung der Shot-peening-Behandlung, deren einwandfreie und genaue Reproduzierbarkeit unter allen Umständen gewährleistet sein muss. Auch in den mit dem *Unterhalt* und der *Reparatur* der Flugzeuge beauftragten Abteilungen grösserer Fluggesellschaften müssen Bauelemente mit sehr beachtlichen Abmessungen gepeent werden. Dazu werden Anlagen benötigt, die es der betreffenden Werkstatt gestatten, die in den von den verschiedenen Lieferanten zur Verfügung gestellten Handbüchern spezifizierten Daten und Parameter einwandfrei zu reproduzieren. Es handelt sich dabei immer um *Wiederinstandstellungsarbeiten* an vereinzelten Stücken verschiedenster Art, Form und Grösse. Bild 17 zeigt eine Anlage dieser Art.

In den Herstellerwerken werden hingegen wesentlich grössere und vor allem auch leistungsfähigere Ausrüstungen benötigt. Mit der Forderung nach einwandfreier und sicherer Reproduzierbarkeit der Shot-peening-Behandlung sind vielschichtige Probleme verbunden, die zu sehr unterschiedlichen Lösungen geführt haben. Hier soll darüber anhand von drei besonders bemerkenswerten Beispielen berichtet werden. Was die grossen Elemente des Flugzeugbaus anbelangt, muss noch auf einen wichtigen Faktor hingewiesen werden. Es handelt sich dabei mit wenigen Ausnahmen um Bestandteile der *Aussenhaut*, wie Segmente der Flügelbeplankungen, Teile zu Seiten- und Höhenruder usw. Eine Fläche, welche die Aussenseite des Flugzeuges bildet, muss eine zwar verschiedene Krümmungsradien aufweisende, jedoch im übrigen glatte Oberfläche aufweisen. Die dem Innern des Flügels bzw. des Ruders zugewandte Seite weist demgegenüber fast immer ein stark ausgeprägtes, durch Fräsen hergestelltes Profil auf. Diese seinerzeit für Jagdflugzeuge und Jagdbomber entwickelte Technik wird heute ganz allgemein auch beim Bau von Passagier- und Frachtflugzeugen angewandt. In diesem Zusammenhang sei auf Bild 12 hingewiesen. Zum Hinunterlassen des Fahrgestells aus dem Flügelinnern muss ein entsprechend grosses Segment der Flügelunterseite aufgeklappt werden. Im Bild ist deshalb die sonst dem Flügelinnern zugewandte Seite der Flügelbeplankung zu sehen mit den durch Fräsen hergestellten profilähnlichen, starken Verrippungen. Bei der Festlegung der Parameter für die Shot-Peening-Behandlung muss in vielen Fällen diesem Umstand Rechnung getragen werden.

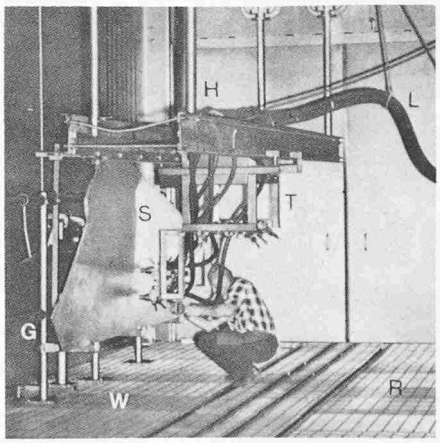

Bild 17. Grosse nach dem Druckluft-System arbeitende Shot-peening-Anlage für Flugzeug-Bauteile in den Unterhaltswerkstätten einer kanadischen Flugverkehrsgesellschaft. Mit sechs vom gemeinsamen, kontinuierlich nach Drucksystem arbeitendem Zwei-Kammer-Strahlgebläse aus gespiesenen Strahldüsen, die nach Bedarf in einem Rahmen angeordnet werden können. Strahlmittel-Rückförderung mit Sammeltrichter unter Boden, Becherwerk und Kaskadenabscheider. Siebstation für drei verschiedene Körnungen. Die zu behandelnden Stücke werden ausserhalb des Strahlraumes auf Werkstückwagen geladen und an den Tragsäulen so befestigt, dass die zu strahlende Fläche eine vertikale Lage erhält. Sodann wird der Wagen in den Strahlraum eingefahren und bleibt dann während der ganzen Strahlbehandlung in dieser Stellung stehen. Die Strahldüsen werden ausgerichtet und so verteilt, dass sich eine gleichmässige Beaufschlagung ergibt. Das Rahmengestell mit den Strahldüsen hängt in der Höhe verstellbar an einer Bühne, die während dem Peenen der Stücke parallel zur Längsachse des Wagens hin und her fährt. Durch diese Translationsbewegung wird eine gleichmässige Bestrahlung der Oberfläche gewährleistet. Alle anderen Einstellungen werden durch Fernbetätigung mit Druckknöpfen vorgenommen. Nach Einschalten der Steuerapparatur läuft sodann die ganze Behandlung automatisch ab. G: Tragsäulen zur Befestigung der Flugzeugteile; H: in der Höhe verstellbare Fahrbühne für die Translationsbewegung der Strahldüsen; W: Werkstückwagen in Arbeitsstellung im Strahlraum; R: Bodenrost; T: Rahmengestell zur Befestigung der Strahldüsen an der Fahrbühne; S: Flugzeugteil (Teil zu Seitenruder) vor dem Peenen; L: Strahlmittelzuleitung vom Zwei-Kammer-Gebläse zu den 6 Strahldüsen.
(Photo: The Carborundem Comp. Pangborn Division, Hagerstown USA)

Shot-peening-Anlage nach dem Druckluftsystem

Beim Projektieren der Anlage in Fort Worth, USA, handelte es sich zunächst vor allem um das Peenen der hochbeanspruchten *Querträger zur Flügelkonstruktion* des US-Kampfbombers F-111. Es wurde eine nach dem Druckluftsystem arbeitende Anlage gewählt und gleichzeitig festgelegt, dass die beim Bau numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen üblichen Grundprinzipien zur Anwendung gebracht werden. Um eine vielseitige, möglichst wirtschaftliche Verwendung zu erreichen, wurde die Anlage so ausgelegt, dass durch einfaches Auswechseln des die numerische Steuerung betätigenden Programmstreifens die verschiedensten Werkstükke behandelt werden können, vom kleinen, komplizierten Schweissteil mit tiefen Rillen und/oder Hohlräumen bis zum gefrästen, 25 Fuss (7,5 m) langen Segment der Flügeloberhaut. Durch Auswechseln des Programmstreifens ist es somit möglich, jederzeit nach Bedarf ein bestimmtes Werkstück immer wieder auf die genau gleiche Art nach dem Shot-peening-Verfahren zu behandeln. Bei Bedarf kann die Anlage für die Durchführung von Versuchen auch auf manuelle Steuerung umgestellt werden, wobei der Arbeiter den Strahlvorgang durch ein Beobachtungsfenster verfolgen kann (Bild 18).

Die Anlage ist nur mit einer Strahldüse ausgerüstet. Sie hat eine Bohrung von ½ Zoll und wird von einem nach dem Drucksystem arbeitenden Zwei-Kammer-Strahlgebläse mit automatischer Umschaltapparatur aus gespiesen, bei Strahldrücken zwischen 0,8 bis 7 bar. Die im Bild 18 gezeigte Anlage misst 9,3 m in der Länge und hat eine Tiefe von 4,8 m. Wie aus den Bildern 19 A und B ersichtlich, befindet sich die bewegliche Düse vorn an der Spitze des auf einem grossen, massiven Maschinensupport sitzenden Düsenhalters. Bild 20 zeigt den Vorderteil des Düsenhalters mit der von der numerischen Steuerungsapparatur aus fernbetätigten Verstellung des Anstellwinkels der Düse sowie der gekapselten Drehvorrichtung.

Durch die numerische Steuerungsapparatur werden sämtliche den Shot-peening-Prozess bestimmenden Düsenein-

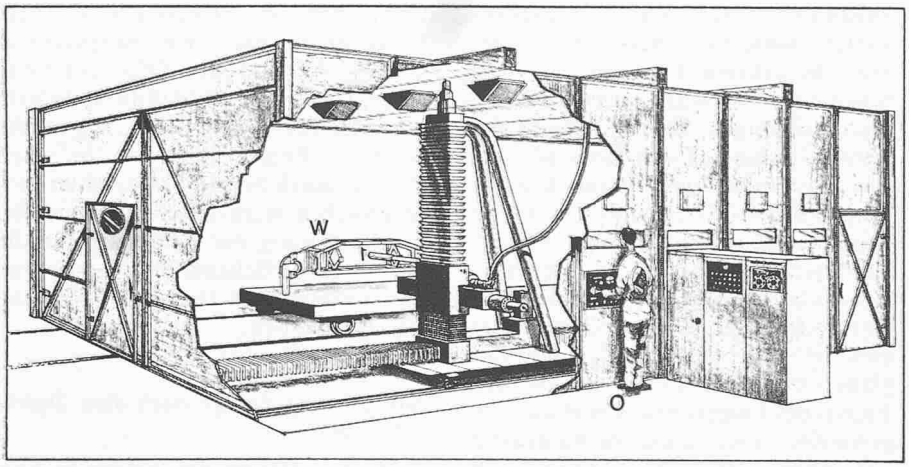

Bild 18. Gesamtansicht der Shot-peening-Anlage für die Behandlung grosser Flugzeug-Bauelemente aus Aluminium bzw. Al-Mg-Legierungen mit bis zu 7,5 m Länge. Raumlänge 9,3 m bei einer Raumbreite von 4,8 m. Drucksystem mit einer Strahldüse von ½" = 12,7 mm Bohrung und Zwei-Kammer-Druck-Strahlgebläse. Numerische Steuerung der Düsenbewegungen gemäss den im Werkzeugmaschinenbau angewandten Arbeitsprinzipien. Anlage geliefert durch Vacu-Blast Corp. in Belmont Calif. USA. W: Werkstück; 1: Düsenhalter mit Düse; 0: Beobachterstand

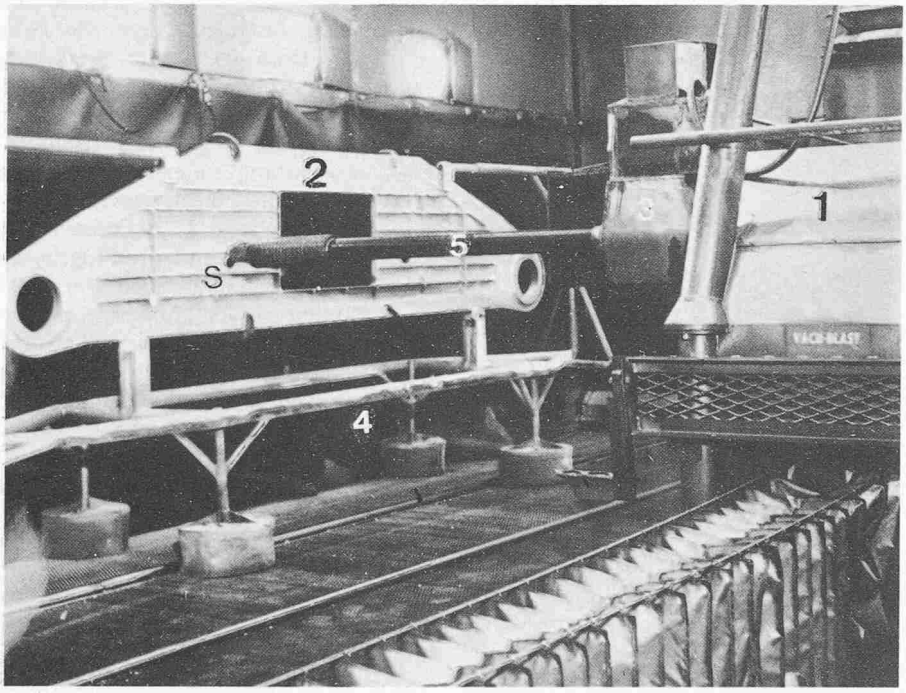

Bild 19 A. Peening-Anlage für Flugzeug-Bauelemente. Blick ins Innere mit dem massiven Maschinensupport und der vorne darauf sitzenden Strahldüse, deren Anstellwinkel über 135° verstellt werden kann. 1: Maschinensupport; 2: Werkstück mit starker Verrippung, wobei trotzdem vollständig gleichmässiges Peenen der gesamten Oberfläche verlangt wird; 3: Einspann-Support zum Düsenhalter mit fernbetätigter Verdrehung des Düsenhalters um seine Längsachse und Fernsteuerung des Düsenanstellwinkels; 4: Hilfsvorrichtung für Montage des Werkstückes in senkrechter Lage; 5: Düsenhalter mit fernbetätigter Verstelleinrichtung für Anstellwinkel der Düse beim Strahlen; S: Strahldüse. (Photo: Vacu-Blast Corp. Belmont, Calif. USA)

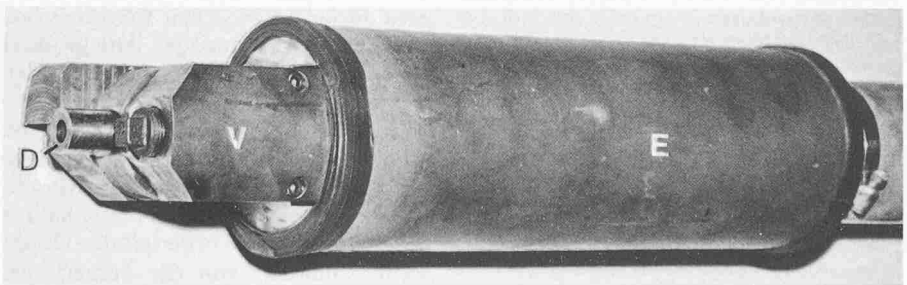

Bild 20. Peening-Anlage für grosse Flugzeug-Bauelemente. Vorderteil des Düsenhalters mit der gekapselten Drehvorrichtung der Strahldüse um die Längsachse des Düsenhalters und fernbetätigter Verstellung des Anstellwinkels mittels numerischer Steuerungs-Apparatur. D: Strahldüse; V: Verschalung aus verschleissfestem Material für Verstell-Einrichtung des Anstellwinkels der Düse; Verstellungs-Möglichkeit total 135°, hiervon von der im Bild sichtbaren horizontalen Lage bis max. 45° nach rückwärts. E: zylindrische Verschalung aus verschleissfestem Material mit eingebauter Vorrichtung für Drehbewegung des Düsenkopfes über 360° um die Längsachse des Düsenhalters, betätigt durch die numerische Steuerungs-Apparatur. (Photo: Vacu-Blast Corp. Belmont, Calif. USA)

stellungen und Bewegungsabläufe mit Hilfe von fünf Parametern beherrscht

Tabelle 2. Parameter für die numerische Steuerung der Düseneinstellungen und der Bewegungsabläufe für den Shot-peening Prozess

Weg der Strahldüse auf der x-Achse:	max. 25 Fuss = 7,5 m
Weg der Strahldüse auf der y-Achse:	max. 5 Fuss = 1,5 m
Weg der Strahldüse auf der z-Achse:	max. 5½ Fuss = 1,65 m
Anstellwinkel der Strahldüse schwenkbar über:	135°
hiervon nach rückwärts:	max.45°
Rotationsbewegung der Strahldüse um ihre Längsachse über volle:	360°

Nach dem Aufprall auf die Werkstückoberfläche fällt das Strahlmittel auf den mit einer rostartigen Abdeckung beleg-

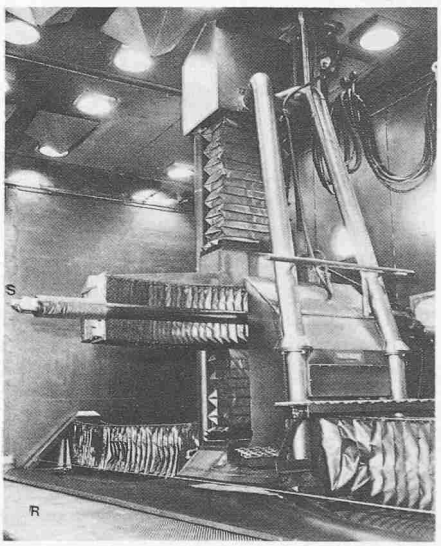

Bild 19 B. Peening-Anlage für grosse Flugzeug-Bauelemente. Blick ins Innere auf den massiven Maschinensupport mit vorn aufgebautem verstellbarem Düsenkopf sowie auf Verstell-Einrichtung für einen Weg von 7,5 m in der x-Achse, von 1,5 m in der y-Achse und von 1,65 m in der z-Achse. Vorne Bodenabdeckung mit Rost «R» für Strahlmittel-Rückfördersystem. S: Strahldüse (siehe auch Bild 20). (Photo: Vacu-Blast Corp. Belmont, Calif. USA)

ten Boden der Kabine und gelangt so zu einer Rücktransporteinrichtung, die ohne mechanische Hilfsmittel auf pneumatischem Wege arbeitet. Vor dem Wiedereintritt in das automatische Zwei-Kammer-Gebläse wird das Strahlmittel zunächst noch über eine Siebstation geleitet und durchläuft sodann einen Hochleistungs-Kaskadenabscheider. Für die Entstaubung der gesamten Maschinenanlage sorgt eine entsprechend bemessene Schlauchfilteranlage.

«Shot-peening»-Anlage mit Schleuderrädern

Bei der Projektierung und der Erstellung einer Anlage im Flugzeugwerk der Boeing Co. in Auburn (USA) musste in bezug auf die Abmessungen der zu behandelnden Werkstücke und in bezug

auf die erforderliche Produktionsleistung auf die sich aus der Herstellung des Grossraum-Passagierflugzeuges Boeing 747 «Jumbojet» ergebenden Daten abgestellt werden. Wegen der erforderlichen grossen Flächenleistungen wurden eine Lösung unter Verwendung von Schleuderrädern gewählt. Im Schleuderrad erfolgt die Beschleunigung des Strahlmittels auf Abwurfgeschwindigkeit durch Zentrifugalkraft. Die Arbeitsweise und die Verwendung dieser Apparatur sind früher beschrieben worden [12].

Ein vollständiger Flügel der Boeing 747 «Jumbojet» besteht aus sechs oberen und zehn unteren tafelförmigen Beplankungssegmenten, die aus den Al-Legierungen 2024-T351 sowie 7075-T651 hergestellt werden und sämtlich gepeent werden müssen. Zum Arbeitsprogramm der Anlage gehört überdies auch die Behandlung von sechs unteren Beplankungsteilen zum Flügel der Boeing 727, die aus einer ähnlichen, ebenfalls hochwertigen Al-Legierung hergestellt sind. Diese Werkstücke sind von unterschiedlicher Grösse und messen bis zu 105 Fuss (31,5 m) in der Länge und bis zu 7 Fuss (2,1 m) in der Breite, wobei die Dicke zwischen 1/4 und 3/4 Zoll (6,35 bis 19,05 mm) schwankt [13].

Auf Grund dieses Programmes wurde eine Anlage gemäss der in Bild 21 veranschaulichten Disposition gewählt, bei der die Werkstücke in vertikaler Stellung an einem Monorail-Konveyor hängend, gepeent werden. Die Maschine wurde so ausgelegt, dass Beplankung bis zu einer Breite von 12 Fuss (3,60 m) behandelt werden können. Die Dicke der Beplankungen überschreitet zwar 1 Zoll (25,4 mm) nicht. Um jedoch eine bessere Auslastung zu erreichen und auch andere Komponenten in der gleichen Maschine peenen zu können, wurden die Ein- und Austrittsöffnungen so bemessen, dass Teile bis zu einer Dicke von 16 Zoll (406 mm) durchgeschleust werden können. Die Maschine ist mit insgesamt 14 Schleuderrädern von 15 Zoll (360 mm) Durchmesser ausgerüstet, deren Anordnung aus dem Strahlschema in Bild 22 hervorgeht, wobei jedes Rad einen Sektor von 21 Zoll (530 mm) bestreicht. Um eine genügende Gleichmässigkeit von Strahlintensität und Überdeckungsgrad über die ganze Breite von 3,60 m zu erreichen, muss jedes Schleuderrad so eingestellt werden, dass in der Mitte jedes Sektors der Strahl im rechten Winkel auf die Oberfläche der Beplankung auftrifft. An den Aussenseiten jedes Fächers beträgt dann die Strahlintensität immer noch etwa 95 Prozent des Maximalwertes in der Mitte des Fächers. Da benachbarte Fächer an den Aussenseiten einander leicht überlappen, ergibt sich schliesslich eine sehr gleichmässige Behandlung der gestrahlten Oberflächen. Jedes Schleuderrad wird von einem Gleichstrommotor von 15 PS Leistung angetrieben, wodurch sich ein Drehzahlbereich von 320 bis 2400 t/min am Rad ergibt. Bei n = 2250 t/min setzt jedes Schleuderrad bis zu 180 kg/min Strahlmittel (Stahlschrot) durch. Mit Hilfe der Drehzahlregulierung kann der für die Strahlintensität wichtige Faktor Abwurfgeschwindigkeit des Strahlmittels im Verhältnis von 1:7,5 verändert werden.

Bild 23 vermittelt eine Gesamtansicht der mitten in der Werkstatt aufgestellten Strahlanlage. An der Hängebahn ist eine durch die Maschine laufende Flügelbeplankung zu sehen. Die Monorail-Hängebahn steht sowohl auf der Belade- als auch auf der Entladeseite der Anlage etwa um 21,5 m über das 7,2 m lange eigentliche Maschinengehäuse vor, so dass genügend Platz für das Handling von Werkstücken mit bis zu 30 m Länge zur Verfügung steht. Bemerkenswert ist, dass die Maschine für bodenebene Aufstellung ohne Fundamentgrube ausgelegt wurde. Wie aus der schematischen Darstellung in Bild 21 ersichtlich, werden die langen Flügelbeplankungen nicht unmittelbar an den beiden Laufkatzen des Konveyors aufgehängt, sondern an einem als Hilfseinrichtung und Kupplungsstange dienenden 24 m langen Doppelbalken. Jede der beiden Laufkatzen ist mit einem eingebauten 5-Tonnen-Elektrohebezeug ausgerüstet. Die Fahrge-

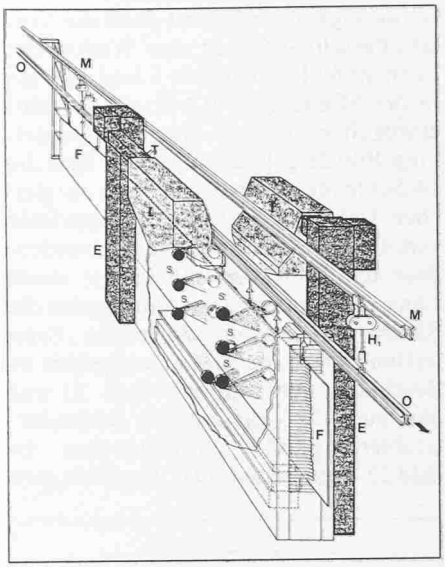

Bild 21. Perspektivische Skizze einer Peening-Anlage zur Behandlung langer, plattenförmiger Flugzeug-Flügel-Beplankungen zur Boeing 747 (Jumbojet) und 727 mit bis zu 31,6 m Länge und bis zu 3,6 m Breite. Maschine geliefert durch Wheelabrator Corp. Mishawaka USA und ausgerüstet mit 14 Schleuderrädern.
E: Becherwerke für die Hochführung des Strahlmittels; T: Förderschnecken für den Transport des Strahlmittels vom Becherwerkskopf zum Kaskadenabscheider; I: Kaskadenabscheider; S: Schleuderräder. Die an der dem Beschauer zugewandten Längswand montierten 7 Schleuderräder sind voll angelegt, die Räder der gegenüberliegenden Längswand sind gestrichelt gezeichnet; F: Flügelbeplankung beim Durchlauf durch Maschine; 0–0: Doppelbalken als Hilfseinrichtung zum Aufhängen der Werkstükke; H1 + H2: mit je einem Hebezug von 5 t Tragkraft ausgerüstete Laufkatzen der Transporteinrichtung; M: Monorail-Hängebahn-Konveyor für Transport der Werkstücke durch die Anlage

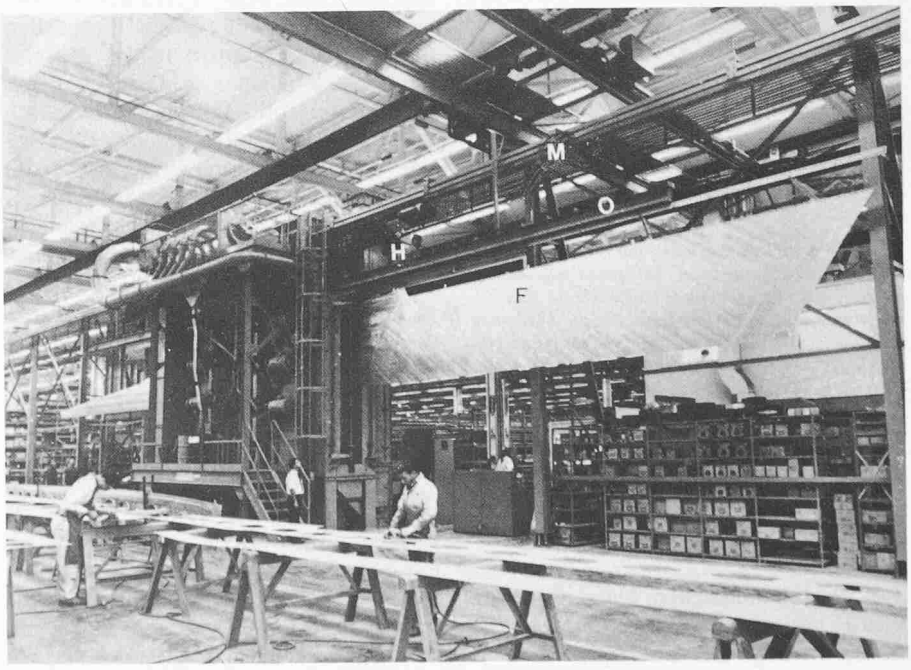

Bild 23. Peening-Anlage zur Behandlung langer Flügelbeplankungen bis etwa 3,6 m Breite. Arbeitsweise gemäss Darstellung Bild 21. M: Monorail-Hängebahn-Konveyor für Werkstück-Transport; 0: Hilfseinrichtung zum Aufhängen der Beplankungen; H: mit Elektrozug von 5 t Tragkraft ausgerüstete Laufkatzen des Monorail-Konveyors. F: Flügelbeplankung
Hinweis: Auf dem Photo sieht man die die Innenseite des Flügels bildende Seite der Beplankung. Sie weist durch Fräsen hergestellte, profilartige Verrippungen auf, während die die Aussenfläche des Flügels bildende Gegenseite glatt ist. (Photo: Wheelabrator Corp. Mishawaka, Indiana USA)

schwindigkeit und somit auch die Vorschubgeschwindigkeit der Werkstücke kann stufenlos zwischen 1 und 16 Fuss in der Minute (v = 0,3 bis 4,8 m/min) einreguliert werden. Aus der Darstellung Bild 21 geht auch hervor, dass die 14 Schleuderräder der Anlage zu gleichen Teilen auf die beiden Längswände verteilt sind. Dabei ist beachtet worden, dass die Schleuderstrahlen der einen Längsseite unter keinen Umständen die Räder der gegenüberliegenden Seite treffen dürfen, da dies unweigerlich zu Beschädigungen führen würde. Es war aber auch die Verteilung der Schleuderstrahlen gemäss Strahlschema in Bild 22 einzuhalten. Das Ergebnis geht

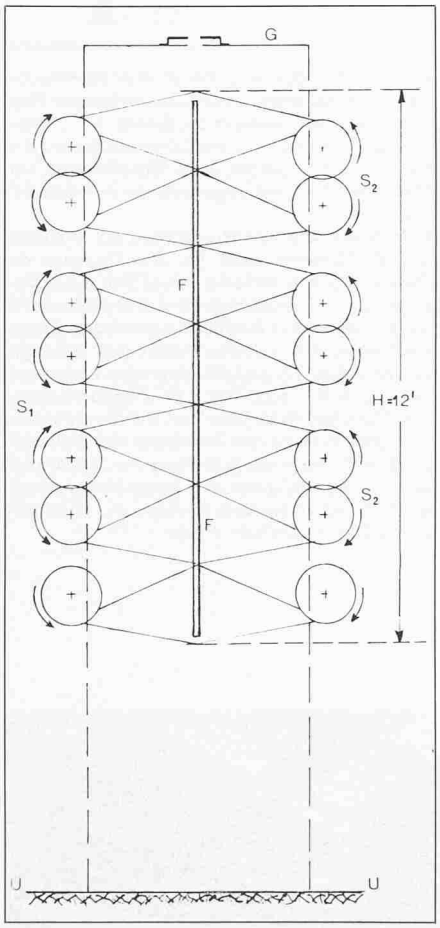

Bild 22. Strahlschema einer mit 14 Schleuderrädern ausgerüsteten Peening-Anlage zur Behandlung langer Flügel-Beplankungen (siehe Skizze Bild 20). Die Anordnung der Räder muss auf die Forderung nach Gleichmässigkeit von Strahlintensität und Flächenüberdeckung über die ganze Breite der durchlaufenden Werkstücke Rücksicht nehmen.
S_1: Schleuderräder der linken Maschinenseite (7 Stück); S_2: Schleuderräder der rechten Maschinenseite (7 Stück); G: Dach des Maschinengehäuses; F: Flügel-Beplankung während Durchlauf durch Anlage; H: Max. Werkstückbreite = 12′ = 3,6 m; U: Werkstattboden (Anlage benötigt keine Fundamentgrube)

aus der schematischen Darstellung in Bild 21 hervor.

In der Anlage bei Boeing wird auch zum Peenen von Al-Legierungen Stahlschrot erster Qualität als Strahlmittel verwendet. Mit einer Schrotkörnung S-330 (Nennkorngrösse 0,8 mm [14]) und bei einer Durchlaufgeschwindigkeit von 0,45 m/min werden sowohl die vorgeschriebene Strahlintensität nach Almen-Test von A_2= 0,18 mm als auch eine Flächenüberdeckung von 98 Prozent einwandfrei erreicht. Wird Strahlschrot feinerer Körnung verwendet, lassen sich diese Daten bereits mit wesentlich höheren Verschubgeschwindigkeiten erzielen. Für das Peenen der oben erwähnten Flügelbeplankungen der Boeing 727 von 31,5 m Länge wird hingegen Stahlschrot S-230 (Nennkorngrösse 0,6 mm [14]) verwendet. Da diese Teile nur eine Breite von 2,1 m aufweisen, wird nur mit 10 Rädern, d. h. mit fünf Rädern je Seite, gefahren, statt mit allen 14 Schleuderrädern. Die Umstellung erfolgt mit Hilfe eines in der Schaltausrüstung vorgesehenen Wahlschalters, der je nach Bedarf das Einstellen auf Betrieb mit allen 14 oder mit nur 10 Rädern ermöglicht. Für das Peenen der Beplankungen der Boeing 727 wird die Drehzahl der Räder auf n = 900 t/min herabgesetzt, wobei jedes der 10 Räder etwa 225 kg/min Stahlschrot durchsetzt. Anderseits wird mit einer Hängebahnvorschubgeschwindigkeit von v = 1,2 bis 1,5 m/min gefahren, wobei die vorgeschriebene Strahlintensität A_2 = 0,1 bis 0,18 mm bei einer Flächenüberdeckung von 98 Prozent beträgt. Dies ergibt eine fertig gepeente Oberfläche von 6,5 m² je Minute.

Wie ganz allgemein bei mit Schleuderrädern ausgerüsteten Maschinen erfolgt auch bei dieser nach dem Durchlaufprinzip arbeitenden Anlage die Betätigung der Schleuderstrahlen durch das Öffnen bzw. das Schliessen der Strahlmittelzufuhr zu den Rädern mit fernbetätigten Segmentverschlüssen. In der geschilderten Anlage wird der Beginn und das Ende jedes Werkstückes sowie auch seine Breite durch Fotozellen noch vor dem Eintritt in das Maschinengehäuse abgetastet. Die Schaltausrüstung wertet die Impulse automatisch aus und steuert unter Berücksichtigung der Vorschubgeschwindigkeit des Werkstückes und der Abstände bis zu den betreffenden Schleuderrädern das Öffnen und das Schliessen der zugehörigen Segmentverschlüsse. Diese Anlage amerikanischer Bauart wurde durch die Firma Wheelabrator Corp. USA ausgeführt.

Druckluft-Peening-Anlagen mit feststehendem Werkstücktisch und fahrender Strahlmaschinenanlage

«Metal Improvement Company» ist ein auf die Übernahme und Ausführung von Shot-peening-Behandlungen spezialisiertes Unternehmen, wobei die Aufträge in zehn über die USA verteilten, eigens für diese Aufgabe ausgerüsteten Werkstätten durchgeführt werden. Zur Bearbeitung des europäischen Marktes wird ein Zweigbetrieb in *England* unterhalten, der vor einigen Jahren durch einen weiteren Zweigbetrieb in der Nähe von *Paris* ergänzt wurde. Die für die Durchführung des Shot-peening-Verfahrens benötigten Strahlanlagen werden in einem betriebseigenen Maschinenbau-Unternehmen entwickelt und gebaut. Das Werkstück liegt auf einem schräggestellten, auf dem Boden festgeschraubten Beladetisch und wird somit während der Behandlung nicht bewegt, während eine, die gesamte strahltechnische Ausrüstung enthaltende Maschineneinheit für die Peeningbehandlung dem Beladetisch entlang fährt. Die Anlagen sind mit nach dem Druckluftsystem arbeitenden Injektor-Strahl-Pistolen ausgerüstet. Das Strahlmittel wird nach dem Gravitationssystem mit Hilfe eines Becherwerks zugeführt. Die ganze strahltechnische Ausrüstung einschliesslich Becherwerk und allem Zubehör sowie ein angebauter Bedienungsstand sind zu einer geschlossenen Maschineneinheit zusammengefasst, die sich auf Schienen entlang dem Beladetisch bewegt. Eine solche Lösung bietet eine ganze Reihe von Vorteilen. Besonders fällt die viel kürzere Baulänge der Gesamtanlage und der sich daraus im Vergleich zu klassischen Durchlaufanlagen ergebende wesentlich geringere Platzbedarf stark ins Gewicht. Zu beachten ist auch, dass je Durchlauf nur eine Seite des Werkstückes gepeent wird. Zur beidseitigen Behandlung muss somit das Werkstück gewendet und ein zweites Mal durch den Strahlwagen gestrahlt werden.

Bild 24 zeigt eine Anlage dieser Bauart, die für folgende Daten ausgelegt ist:

Länge des Beladetisches	98′ = ca. 29,2 m
Schrägstellung des Beladetisches	ca. 35°
Werkstückabmessungen:	
Länge maximal	76′ = ca. 23,2 m
Breite maximal	6′ = ca. 1830 mm
Anzahl Injektor-Strahlpistolen	10 Stück

Die Maschine wurde seinerzeit für das Peenen der Flügelbeplankung des Grossbombers B-52 beschafft, deren Dicke von 5/8″ auf 3/32″ d. h. von 15,875 mm auf 2,38 mm auslaufend abnimmt. Die zehn Injektor-Strahlpistolen sind im Innern der fahrenden Maschineneinheit auf einem Rahmengestell versetztgegeneinander angeordnet und können in bezug auf gegenseitigen Abstand sowie in bezug auf den Strahlabstand zum Werkstück verstellt werden. Das Rahmengestell führt zusammen mit den zehn Strahlpistolen im Innern der Maschineneinheit eine hin- und hergehende Bewegung aus. Da die Düsen gegeneinander versetzt angeordnet sind, ergibt die Oszillation zusammen mit der Fahrbewegung der Maschine, dass jede der zehn Pistolen eine andere Partie des Werkstückes bestreicht. Ein Überlappen der Strahlwirkung wird auf diese Weise vermieden.

Infolge der Schrägstellung des Beladeti-

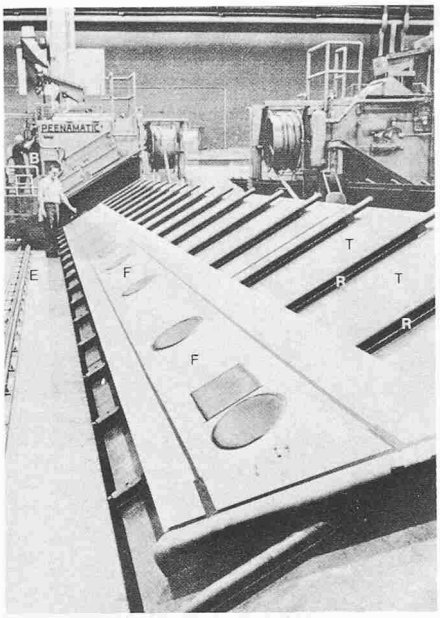

Bild 24. Nach dem Druckluftsystem arbeitende «Peenamatic»-Strahlanlage mit feststehendem Tisch zur Aufnahme der Werkstücke und fahrender Strahlmaschineneinheit zur Behandlung langer, grosser Flügel-Beplankungen im Werk Wichita der Boeing Airplane Comp. USA. T: schräggestellter Beladetisch zur Aufnahme der Beplankungen; Neigung ca. 35°; R: Auflagerollen für das Werkstück, um das Ablaufen des kugeligen Strahlmittels zu gestatten; F: Flügelbeplankung zum Boeing B-52 Bomber; E: rechtsseitige Fahrschiene für die entlang dem Tisch fahrende Strahlmaschinen-Einheit; B: Bedienungs-Stand für den mitfahrenden Arbeiter. (Photo: Metal Improvement Comp. Manufacturing Division: Jersey City, N.J., USA)

sches kann das kugelige Strahlmittel ablaufen und gelangt so wieder in den Strahlmittelkreislauf der Maschine zurück. Die Aufbereitung und Reinigung erfolgt in einem am Becherwerkauslauf angeordneten Kaskadenabscheider. Auch in Europa stehen Maschinen dieser Bauart, so beispielsweise in den Fiat-Werken in Turin.

Schaufeln von Düsentriebwerken

Nicht nur die aus Aluminium- und aus Al-Mg-Legierungen hergestellten Bauelemente des Flugzeuges müssen aus den zahlreichen, eingangs dieses Berichtes dargelegten Gründen nach dem Shot-peening-Verfahren behandelt werden. Es muss in gleichem Masse ebenso für Bestandteile der Düsentriebwerke und dort besonders für die aus hochwertigen und hochlegierten Stahlsorten gefertigten Beschaufelungen der Aggregate angewandt werden. Es gilt dies nicht nur für die den eigentlichen Antriebsteil des Düsentriebwerkes bildende und heisse Gase verarbeitende *Turbine*, sondern ebensosehr auch für den *Kompressor* («cold section compressor»). Bild 25 zeigt den Rotor und die Beschaufelung eines Kompressors. Er wird in verschiedenen Ausführungen in die Mirage eingebaut.

Beim Festlegen der Parameter für das Peenen sowohl der Turbinen- als auch der Kompressorenbeschaufelungen müssen *zwei Zonen* unterschieden werden, die konträren Beanspruchungen ausgesetzt sind und deshalb zumeist auch einer verschiedenen Peening-Behandlung unterzogen werden. Es sei nebenbei erwähnt, dass dies auch für die Schaufeln von Abgasturboladern, stationären Gas-Turbinen usw. gilt. In allen diesen Fällen muss zwischen den durch die strömenden Gase verursachten Kräften und den dadurch erzeugten Beanspruchungen der eigentlichen Schaufelblätter sowie den Anforderungen unterschieden werden, die an die speziell für den zweck der Verankerung der Schaufeln in den Läufer ausgebildeten Wurzelenden, dem sogenannten «Tannenbaum», gestellt werden (siehe Bild 27). In den meisten Fällen ergibt sich daraus die Notwendigkeit, jede der beiden Zonen einer anderen Shot-peening-Behandlung zu unterziehen.

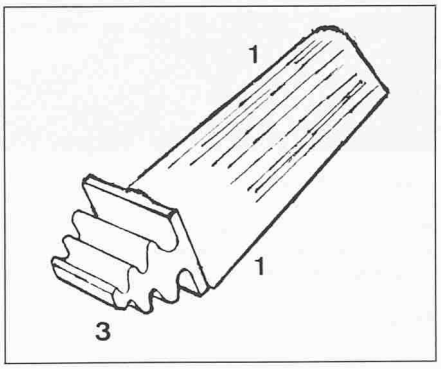

Bild 27. Unterschiedlich zu behandelnde Zonen an Turbinen und Kompressoren-Schaufeln.
1: eigentliche Arbeitsflächen der Schaufeln; 3: Wurzelende der Schaufel (sogenannter «Tannenbaum»).

Die Beschaufelungen der Triebwerke müssen jedoch nicht nur in den Herstellerwerken gepeent werden. In den mit der Revision und dem Unterhalt beauftragten Werkstätten müssen die Laufräder und ihre Schaufeln beim Kompressor und in der Turbine zunächst sorgfältig gereinigt werden. Danach muss aus offensichtlichen Gründen durch Wiederholung der Shot-peening-Behandlung der ursprüngliche Zustand der Oberfläche mit den in den äusseren Materialschichten induzierten Druckvorspannungen wieder hergestellt werden. Die Reinigung erfolgt heute durchwegs durch Strahlen mittels Glasstrahlperlen im Trockenverfahren, wobei zwei Forderungen erfüllt werden müssen: Es darf die Oberflächenrauheit der Schaufeln beim Reinigungsstrahlen nicht erhöht werden und es müssen die engen Toleranzen des Werkstückes erhalten bleiben. Im allgemeinen werden für das Reinigungsstrahlen Glasstrahlperlen mit einer Nennkorngrösse von ca. 50 Mikron und ein Arbeitsdruck von etwa 2,8 bis 3,0 bar angewendet. Bild 26 veranschaulicht die Notwendigkeit der in regelmässigen Zeitabständen auszuführenden Reinigung der Beschaufelungen. Der Verschmutzungsgrad der Turbinenlaufräder ist noch wesentlich stärker als der des Kompressors. Im Bild 26/1 sind überdies deutlich die der Verankerung der Schaufeln in den Laufrädern dienenden Wurzelenden zu erkennen.

Für die Durchführung des Shot-peening-Verfahrens gibt man im allgemeinen und vor allem in den Herstellerwerken speziell für diesen Zweck entwikkelten, nach dem Druckluftsystem arbeitenden, mit Injektor-Strahlpistolen ausgerüsteten Strahlanlagen den Vorzug. Bild 28 zeigt das Innere einer solchen Strahlkabine. Es ist eine in Europa seriemässig gebaute Anlage, die mit insgesamt acht Injektor-Strahlpistolen ausgerüstet ist. Die Foto zeigt die Be-

Bild 25. Beschaufelung des Kompressors des zum Antrieb des Düsenjägers «Mirage» von der «SNECMA» entwickelten Triebwerkes ATAR (Bei der im Bild gezeigten Ausführung handelt es sich um eine in Europa ausserhalb der Schweiz gebaute Variante) [15]

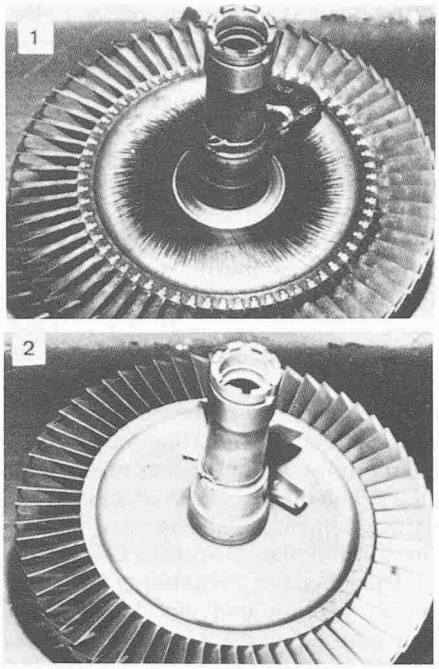

Bild 26. Reinigungsstrahlen mit Glasstrahlperlen der Schaufeln eines Kompressorlaufrades gelegentlich der Revision eines zum Antrieb eines Helikopters dienenden Düsentriebwerkes Type T-55 der amerikanischen Armee («cold section compressor blade assemblies»).
1 (oben): Kompressorlaufrad mit Beschaufelung in verschmutztem Zustand nach dem Ausbau aus dem Düsentriebwerk; 2 (unten): Kompressorlaufrad nach dem Reinigungsstrahlen mit Glasstrahlperlen im Trockenverfahren.
(Photo: Sovitec, S.A. Bruxelles B-1170)

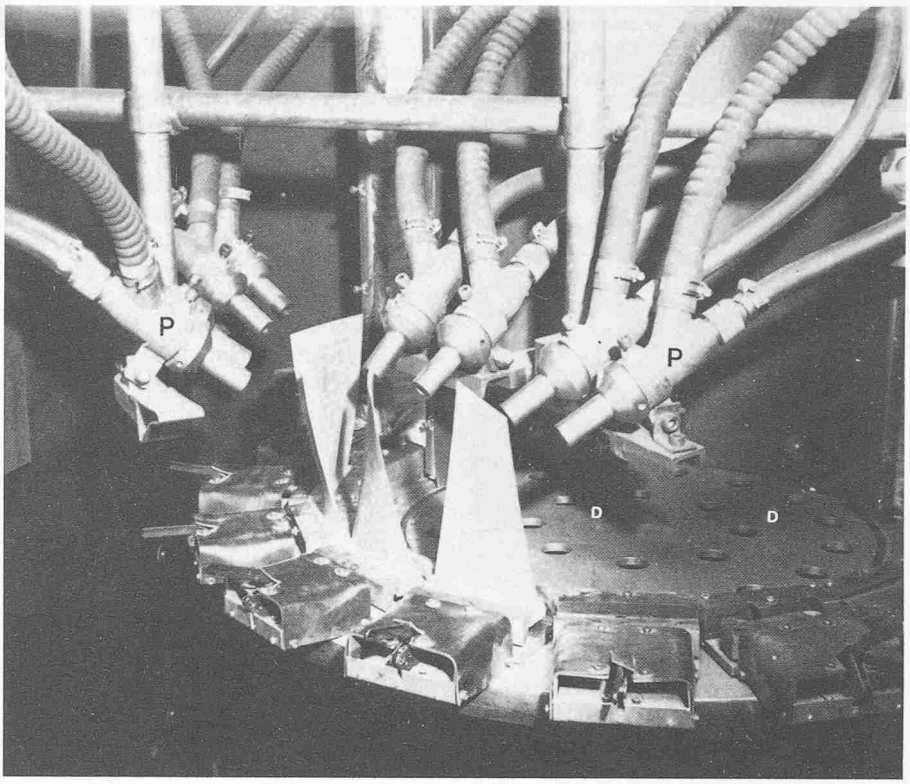

Bild 28. Blick in das Innere einer nach dem Druckluftsystem arbeitenden, mit acht Injektor-Strahlpistolen ausgerüsteten Kabine zum Peenen von Triebwerk- und Kompressorenschaufeln. Drehtisch von 1000 mm Durchmesser mit aussen angebautem Antriebsmotor. Die Strahldüsen führen gemeinsam eine hin- und hergehende, vertikale Translationsbewegung aus.
D: Drehtisch; P: Injektorstrahlpistolen mit Strahlmittelzuführung durch Becherwerk nach dem Gravitationssystem.
(Photo: Société Bugatti S.A. Molsheim [France])

handlung der eigentlichen Staufelflächen. Hierzu sind die Strahlpistolen in zwei Gruppen unterteilt und so angeordnet, dass die Schaufeln von beiden Seiten gleichzeitig behandelt werden, wobei die beiden Gruppen, d. h. alle acht Strahldüsen, gemeinsam eine vertikale Translationsbewegung ausführen. Die zu behandelnden Schaufeln sind am Rand eines mit Aussenantrieb ausgerüsteten Drehtisches von 1000 mm Durchmesser montiert. Die Drehbewegung des Tisches ergibt zusammen mit der Translation der Strahlpistolen eine gleichmässige und gleichzeitige Bestrahlung der beiden Schaufelseiten auf ihrer ganzen Länge. Die über den ganzen Umfang des Drehtisches verteilten Einspannvorrichtungen sind zur Aufnahme der Wurzelenden der Schaufeln (siehe Bild 25) ausgebildet, die ja zumeist vor der Einwirkung der Strahlpistolen während der Behandlung der Seitenflächen geschützt sein müssen. Das Peenen der «Tannenbäume» erfolgt in einem zweiten Arbeitsgang, wozu dann die Kabine durch Auswechseln des Drehtisches bzw. der Einspannvorrichtungen und neues Ausrichten der Strahlpistolen entsprechend umgerüstet werden muss. In manchen Fällen muss aber auch das Strahlmittel gewechselt werden. Das Druckluftsystem bietet hier die Möglichkeit, das Zwei-Stufen-Verfahren durchzuführen und in einem zweiten Arbeitsgang unter Verwendung von Glasstrahlperlen eine Verfeinerung der Oberfläche zu erreichen. Solche Kabinen können somit grundsätzlich auch zur Durchführung des Reinigungsstrahlens unter Verwendung von Glasstrahlperlen im Trockenverfahren verwendet werden.

Ganz andere Bedürfnisse liegen hingegen in den mit dem Unterhalt der Triebwerke beauftragten Werkstätten der grossen amerikanischen Luftverkehrsgesellschaften vor. Hier müssen wesentlich grössere Produktionszahlen bewältigt werden. Auch müssen vielfach Schaufeln der verschiedensten Typen und Abmessungen, ohne grössere Neueinstellungen in ein und derselben Strahlanlage behandelt werden können. Um diesen Anforderungen zu genügen, werden Durchlaufanlagen benötigt, wobei zumeist Lösungen bevorzugt werden, bei denen in mehreren, aufeinanderfolgenden Stationen zunächst das Reinigungsstrahlen mit Glasstrahlperlen und sodann die Shot-peening-Behandlung durchgeführt werden. Je nach dem Arbeitsprogramm erhalten manchmal die Anlagen zwei oder sogar drei Peening-Stationen mit unterschiedlichen Schrotkörnungen um den entsprechenden Spezifikationen der Triebwerkhersteller gerecht zu werden. Als Beispiel über Ausrüstungen dieser Art zeigt Bild 29 eine in den Unterhaltswerkstätten für Triebwerke («Jet Engine Overhaul Shop» in South San Francisco, Calif.) der Fluggesellschaft «United Air Lines» stehende Maschine. Die zu bewältigende Produktion umfasst mehrere Tausend Triebwerk- und Kompressorenschaufeln je Tag, die durch Strahlen mit Glasstrahlperlen zunächst gereinigt und sodann gepeent werden müssen. Als weitere Auflage sind in einer dritten nachgeschalteten Station die Wurzelenden («Tannenbäume») der Schaufeln nach einer anderen Spezifikation mit wesentlich höherer Strahlintensität getrennt zu behandeln. Die Flotte der Fluggesellschaft ist mit Triebwerken Pratt & Whitney ausgerüstet. Das Arbeitsprogramm umfasst deshalb Schaufeln mit unterschiedlichen Abmessungen und Spezifikationen.

Für die Bedienung der ganzen Anlage ist nur ein einziger Mann erforderlich, dem auch das Einlegen und das Entladen der Werkstücke obliegt. Die Schaufeln durchlaufen die Anlage in speziellen, rahmenförmigen Einspannvorrichtungen, die je nach Werkstückgrösse 6 bis 12 Schaufeln aufnehmen. Alle in einem Einspannrahmen befindlichen Schaufeln sind von derselben Grösse und erhalten beim Durchlauf durch die Maschine die genau gleiche Behandlung. Sämtliche Arbeitsabläufe werden von einer ausgeklügelten automatischen Steuerung aus befehligt, wobei alle wesentlichen Verfahrensfaktoren

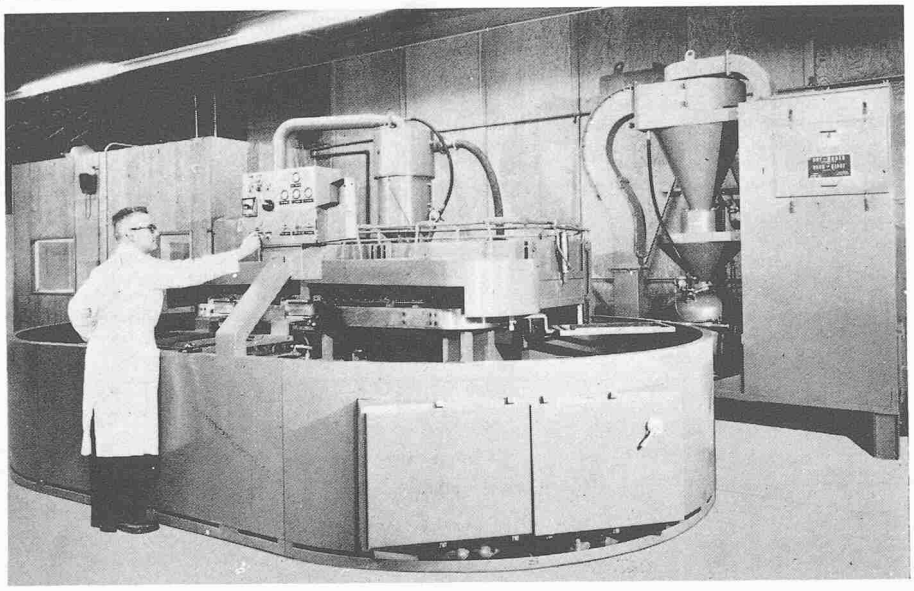

Bild 29. Im Takt-Verfahren arbeitende Durchlaufanlage für das Reinigungsstrahlen und das nachfolgende Peenen von Turbinen- und Kompressorenschaufeln, ausgerüstet mit vier nach dem Drucksystem arbeitenden Strahldüsen und zwei unabhängigen Strahleinheiten mit automatischen Vacu-Blast-Zwei-Kammer-Druck-Strahlgebläsen.
(Photo: Vacu-Blast Corp. Belmont, Calif. USA)

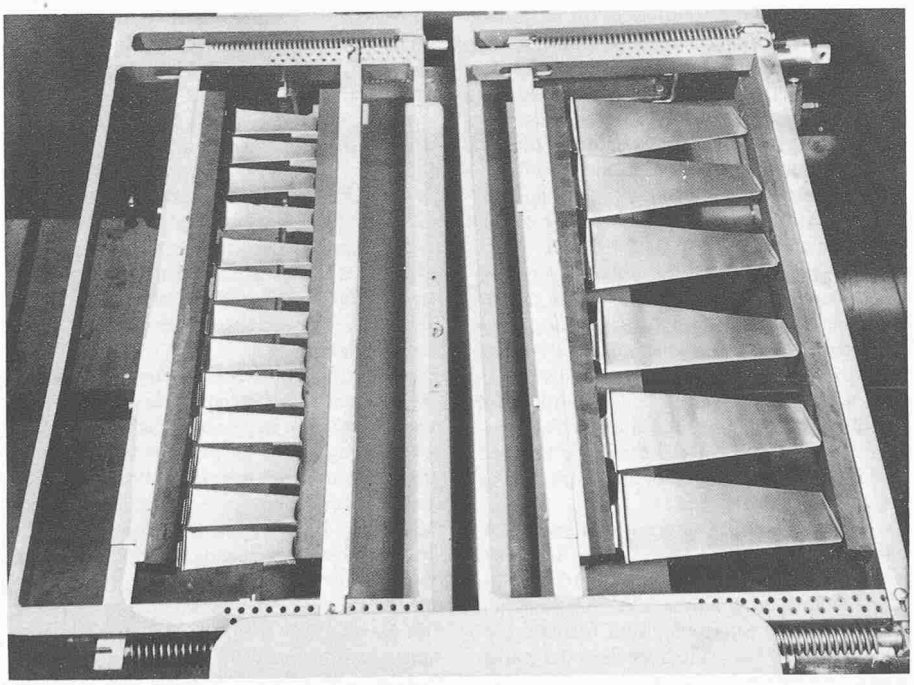

Bild 29 A. Einspann-Rahmen für die zu behandelnden Werkstücke zur im Takt-Verfahren arbeitenden Durchlauf-Anlage für das Reinigungs-Strahlen und das Shot-peenen von Turbinen- und Kompressoren-Schaufeln gemäss Bild 29, ausgerüstet mit zwei unabhängigen Vacu-Blast-Strahl-Einheiten, die insgesamt 4 nach dem Drucksystem arbeitende Strahldüsen speisen. Links: Einspann-Rahmen mit insgesamt 13 kleinen Schaufeln. Rechts: Einspann-Rahmen mit insgesamt 6 grossen Schaufeln (Photo: Vacu-Blast Corp. Belmont, Calif. USA).

mit Vorwahlschaltern nach Bedarf eingegeben werden. Der Arbeitszyklus stellt sich jedoch erst ein, nachdem ein Verriegelungskontakt betätigt worden ist, der während des ganzen Ablaufs der Strahlbehandlung jede Veränderung der eingegebenen Parameter sperrt. Die Maschine hat ovale Form und misst 5,5 m in der Länge bei einer Breite von 3,6 m.

Die Einspannrahmen mit den Schaufeln durchlaufen die Arbeitsstationen der Maschine in horizontaler Lage. Die Schaufeln werden somit auch in horizontaler Stellung behandelt und zwar immer gleichzeitig auf der oberen und auf der unteren Seite. Jede Arbeitsstation ist am Eintritt und auch am Austritt durch automatisch sich öffnende und schliessende Türen abgeschlossen. In der ersten Station werden die Schaufeln durch Abstrahlen mit Glasstrahlperlen gereinigt. Je eine verschleissfeste Strahldüse von 3/8″ Bohrung (≅ 9,5 mm) strahlt senkrecht von oben bzw. senkrecht von unten auf die betreffenden Schaufelflächen und führen gleichzeitig eine Translationsbewegung quer zur Vorschubrichtung der Einspannrahmen aus.

Die beiden Strahldüsen arbeiten nach dem Drucksystem und werden gemeinsam von einem automatischen Zwei-Kammer-Strahlgebläse der ersten Vacublast-Strahleinheit (Direct-Pressure Dry Honer Type IIIP) aus gespiesen. Düsenbewegung und Werkstückvorschub werden abwechslungsweise betätigt. Während des Strahlvorgangs steht somit der Einspannrahmen mit den Schaufeln still. Erst nachher erfolgt ein Schritt von ½″ Länge in der Vorschubrichtung, wobei jedoch während dieser Bewegung die Schaufeln nicht gestrahlt werden. Nach Abschluss dieser Phase folgt wiederum eine Translationsbewegung der Strahldüsen und so fort.

Anschliessend an die Behandlung mit Glasstrahlperlen folgt in einer eigenen Station noch ein kräftiges Abblasen durch mehrere Druckluftdüsen, zwecks Entfernung von zurückgebliebenen Strahlmittelresten. Die dritte und letzte Station dient der Durchführung der eigentlichen Shot-peening-Behandlung. Ausrüstung und Arbeitsweise entsprechen der oben beschriebenen ersten Station, jedoch wird hier Stahlschrot erster Qualität als Strahlmittel unter entsprechend höheren Blasdrücken verwendet. Die beiden Strahldüsen haben jede eine Bohrung von ¼″ (≅ 6,35 mm Durchmesser). Zuerst werden die beiden Seiten der Schaufelblätter gepeent. Für die Behandlung der Wurzelenden ist jedoch fast immer eine höhere Strahlintensität vorgeschrieben, manchmal auch ein anderer Überdeckungsgrad. Um die entsprechenden Spezifikationen einzuhalten, schaltet die Anlagesteuerung selbsttätig mit dem Beginn des Peenens der Schaufelwurzeln auf einen höheren Strahldruck um, der die Einhaltung der vorgeschriebenen Werte gewährleistet. Nach Abschluss der Peening-Behandlung folgt wiederum ein Abblasen mit Druckluft. Auch die Strahldüsen der letzten Station werden von einem automatischen, nach dem Drucksystem arbeitenden Zwei-Kammerstrahl-Gebläse aus gespiesen. Die Vorschubgeschwindigkeit während dem Strahlen kann im Bereich von ca. 10 bis 200 mm/min vorgewählt werden, während der Transfer der Einspannrahmen von einer Station zur nächsten mit einer erhöhten Geschwindigkeit von ca. 1,7 m/min erfolgt. Im praktischen Betrieb werden je Minute im Schnitt drei Schaufeln in der Maschine gereinigt und gemäss Vorschrift gepeent.

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

Literaturverzeichnis

[1] *Horowitz J.*: «Das Shot-peening-Verfahren - Grundlagen und Verwendung von Glas-Strahlperlen». Schweiz. Bauzeitung, Heft 19, 1977.

[2] *H.F. Moore:* «Strengthening Metal Parts by Shot Peening» in Handbuch «Shot-Peening», herausgegeben von der Wheelabrator Corp. Mishawaka, Indiana USA. Sixth Edition, Kapitel II S. 85

[3] Mikrophotographien von *R. E. Cramer* in [2].

[4] Siehe Bild 1 in [1].

[5] Siehe Bild 14 in [1], Seite 291.

[6] *Horowitz J.*: «Das Shot-peening-Verfahren und die Anforderungen an die Anlagetechnik». Schweiz. Bauzeitung, Heft 51/52, 1978 S. 999-1010.

[7] *Milo J.H.*: «Shot Peening Prevents Stress Cracking in Aircraft Equipment». Materials Protection Vol. 7 No. 9 (1968) S. 39-42.
Milo J.H.: «Prevention of Stress Corrosion Cracking By Shot Peening» Vortrag gehalten 1968 in Cleveland, Ohio, USA. Konferenz der National Association of Corrosion Engineers.

[8] siehe Bild 12 und Bild 13 in [6].

[9] siehe Abschnitt «Wesentliche Parameter» in [6].

[10] siehe Bilder 12 und 13 in [6].

[11] siehe Abschnitt «Das Zwei-Stufen-Verfahren» in [1] S. 291-292.

[12] siehe Abschnitt «Schleuderräder» sowie Bilder 1, 2 und 3 in [6], S. 1001 und 1002.

[13] *Straub J.*: «Shot Peening Wing Panels for the 747». Manufacturing Engineering & Managment, June-Edition, 1970, S. 27-29.

[14] *Horowitz J.*: «Oberflächenbehandlung mittels Strahlmittel». Handbuch, erschienen im Forster-Verlag AG Zürich (1976). Siehe Kapitel 3: «Prüfung und Normung der metallischen Strahlmittel», insbesondere Tabellen XXIV und XXIV A über die SAE-Normen für Schrot, S. 139 und 140.

[15] Gemäss Handbuch «Jane's All the Worlds Aircraft» ist die «Mirage» Type III S der Schweizer Armee mit einem SNECMA ATAr-Düsentriebwerk Type 09 C ausgerüstet, das sich von der im Bild gezeigten Ausführung unterscheidet. Die in der Schweiz im Lizenzbau von Gebr. Sulzer gebauten Triebwerke 09 C haben einen Schub von 9450 lbs ohne Nachbrenner, bzw. von 13 200 lbs. bei 8400 t/min unter Verwendung des Nachbrenners.

Normung

Die CEB/FIP-Mustervorschrift (Model Code)

Immer mehr befassen sich politische Organisationen wie die Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN-ECE, Genf), die Europäische Gemeinschaft (EG, Brüssel) oder der Rat für Gegenseitige Wirtschaftshilfe (RGW, Moskau) mit der *Harmonisierung der Bauvorschriften*. Hierzu gehört auch das *Vereinheitlichen von Technischen Baubestimmungen*, eine Aufgabe der internationalen Normungsgremien wie der *Internationalen Normen-Organisation* (ISO, Genf) oder des *Europäischen Komitees für Normung* (CEN, Brüssel), die im Bereich des konstruktiven Ingenieurbaus eng mit fachlichen Vereinigungen zusammenarbeiten, von denen besonders das *Euro-Internationale Beton-Komitee* (CEB) und die Europäische Konvention für Stahlbau (CECM) auf dem Vorschriftensektor tätig sind.

Elf Jahre nach seiner Gründung gab das CEB im Jahre 1964 seine ersten «Empfehlungen zur Berechnung und Ausführung von Stahlbetonbauwerken» heraus, im Jahre 1970 folgten die «Internationalen Richtlinien zur Berechnung und Ausführung von Betonbauwerken», zu denen auch der Internationale Spannbetonverband (FIP) beigetragen hatte, und schliesslich wurde im Jahre 1978 mit der «CEB/FIP-Mustervorschrift für Tragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton» [1] die dritte Auflage dieses «privaten» Normenentwurfs veröffentlicht, die sich von den beiden Vorgängern hinsichtlich praktischer Anwendbarkeit deutlich abhebt.

Die Mustervorschrift kann noch besser als seither als Grundlage für zukünftige, nationale Bestimmungen herangezogen werden, da früher vorhandene Lücken durch Aufnahme neuer Abschnitte und Verweis auf bestehende internationale Normen geschlossen wurden. Andererseits kann sie als Ganzes direkt, insbesondere für Berechnung und Bemessung, verwendet werden, wofür das CEB mit der Veröffentlichung von Probe- und Vergleichsrechnungen [2], über die in [3] berichtet wird, selbst den Beweis lieferte.

Darüber hinaus ist die CEB/FIP-Mustervorschrift als Band 2 in ein «Internationales System einheitlicher technischer Baubestimmungen» eingegliedert, für dessen ersten Band mit den allgemeinen Sicherheitsfestlegungen [4] ein Gemeinschaftsausschuss (Joint Committee on Structural Safety) verantwortlich zeichnet, dem ausser CEB, CECM und FIP weitere Fachvereinigungen, wie CIB (Hochbau), IASS (Schalentragwerke), IVBH (Brücken- und Hochbautragwerke) und RILEM (Baustoffe) angehören. Dieser Band 1 ist im wesentlichen für nationale oder internationale Normenkommissionen bestimmt und enthält z. B. Leitlinien für das Vereinheitlichen von Lastnormen (mit Beispielen), Ansätze für das Kombinieren von Einwirkungen und Grundwerte für die auf der Lastseite einzuführenden Sicherheitsbeiwerte, während die verschiedenen baustoff- und bauartabhängigen Werte nicht aufgenommen wurden.

Die Folgebände 2 bis 6 sind bzw. werden z. Zt. so abgefasst, dass man in der statischen Berechnung ohne Band 1 auskommt, wenn die anzusetzenden Lasten und anderen Einwirkungen bekannt sind. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass Band 3 für Stahlbau von CECM, Band 4 für Verbundbau von CECM/CEB/FIP und die Bände 5 und 6 für Mauerwerk- bzw. Holzbau von CIB aufgestellt werden.

Zwischen all diesen internationalen Normentwürfen und den derzeitigen SIA-Normen, insbesondere zwischen CEB/FIP-Mustervorschrift und Norm SIA 162, bestehen natürlich noch inhaltliche und formale Unterschiede, die beim Überarbeiten der nationalen Normen beseitigt werden können. Es versteht sich von selbst, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt ein Vermischen der beiden Vorschriften-Werke, etwa durch «Herauspicken der Rosinen», nicht statthaft ist.

Merkmale für Tragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton

Einige Merkmale der CEB/FIP-Mustervorschrift für Tragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton, deren Text in Bestimmungen und Erläuterungen unterteilt ist:

Das schon aus den früheren CEB-Empfehlungen bzw. CEB/FIP-Richtlinien bekannte Sicherheitskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten, d. h. je einem Beiwert auf der Last- sowie auf der Widerstandsseite (z. B. γ_f = 1,35 und 1,5 für ständige bzw. veränderliche Lasten und γ_m = 1/1,15 und 1/1,5 für Betonstahl und Spannstahl bzw. Beton), wurde beibehalten. Einerseits können diese z. B. für lineare Probleme zu globalen Sicherheitsbeiwerten zusammengefasst werden, andererseits kann der Lastbeiwert im Hinblick auf eine genauere Schnittgrössenermittlung nochmals aufgespalten werden. Hinweise hierzu enthalten die Erläuterungen.

Die *charakteristischen Werte*, Kombinationswerte, häufigen und quasiständigen Werte für Lasten und andere Einwirkungen können sinnvoll bei der Überlagerung der Einflüsse verschiedener Einwirkungen, besonders bei den Nachweisen für die Rissebeschränkung, auch bei Spannbeton, verwendet werden. Die Kombinationsregeln, die für Grenzzustände der Tragfähigkeit gelten, sind ziemlich allgemein gehalten; das kann in manchen Fällen zu einer unübersichtlichen Anzahl von Kombinationen führen; in den Erläuterungen stehen daher für häufige Fälle des Hochbaus vereinfachte Näherungsbeziehungen.

Bei der *Schnittgrössenermittlung* sind neben der linearen Elastizitätstheorie auch nicht-lineare Verfahren zugelassen: Schnittgrössenumlagerung bis zu 25 Prozent oder Schnittgrössenermittlung mit nicht-linearen Baustoffgesetzen oder Anwendung der Plastizitätstheorie bei Platten. Für Stabtragwerke sind einfache Regeln angegeben, mit denen die Rotationsfähigkeit der Querschnitte nachgewiesen werden kann.

Die Kapitel für *Biege- und Torsionsbemessung* entsprechen weitgehend den früheren Regeln, während die Kapitel für *Schubbemessung* und für den *Knicksicherheitsnachweis* viel Neues enthalten und dem Ingenieur jeweils mehrere Lösungsmethoden zur Auswahl anbieten.

In den Abschnitten für die *Rissebeschränkung* wurden einige wichtige Gedanken neu formuliert. So ist z. B. klar herausgestellt, dass Bezeichnungen wie «rechnerische Rissbreite» oder «volle Vorspannung» rein rechnerische Kriterien beschreiben, deren Einhalten beim Nachweis nicht ausschliesst, dass sie am ausgeführten Tragwerk nicht noch einmal überschritten werden. Vom reinen Stahlbeton bis hin zur «vollen Vorspannung» sind alle Vorspanngrade, also auch die teilweise Vorspannung, möglich: Festzulegen ist lediglich der Lastanteil oder, allgemeiner ausgedrückt, die Summe der Anteile der einzelnen Einwirkungen, wofür volle Vorspannung nachzuweisen ist: unter höheren Laststufen sind dann die Regeln für Rissebeschränkung anzuwenden.

Im Kapitel zur *konstruktiven Durchbildung*