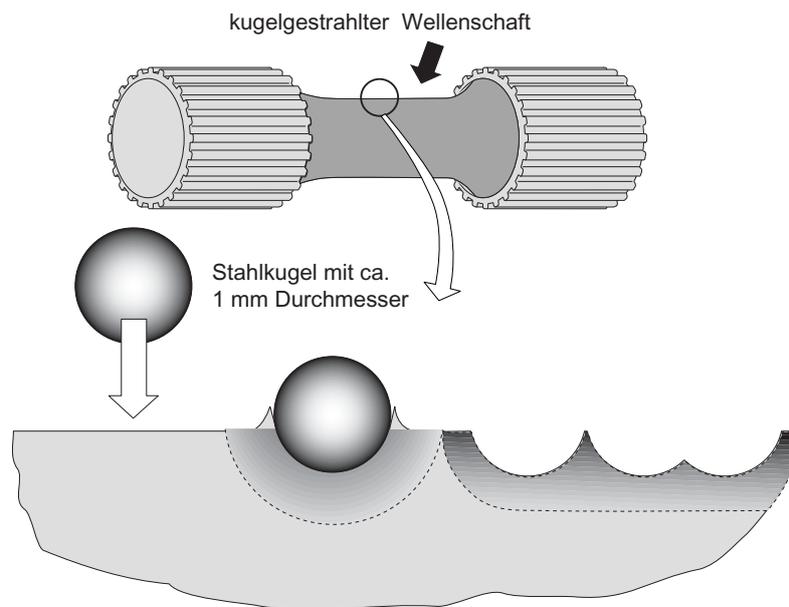


16.2.1.6 Verfestigungs- und Abrasionsstrahlen

16.2.1.6.1 Verfestigungsstrahlen



Unter **Kugelstrahlen** (Verfestigungsstrahlen, engl. „**Shot Peening**“) wird ein definiertes und reproduzierbares (nahezu) nicht abtragendes Bearbeitungsverfahren verstanden. Die zu bearbeitende Oberfläche wird von den auftreffenden, vorzugsweise sphärischen Partikeln plastisch verformt. Man spricht von **Naßstrahlen** (engl. **vapor blasting**) oder **Trockenstrahlen** je nachdem, ob Wasser oder Luft zur Erzeugung des Partikelstrahls dient. Das Kugelstrahlen ist nicht mit **abrasiven Strahlverfahren wie Sandstrahlen oder Oxidstrahlen** (Strahlgut Al_2O_3) zu verwechseln. Diese dienen zur Reinigung und dem erosiven Abtrag der Werkstückoberfläche.

Kugelstrahlen ist meist die einzige Möglichkeit, **ohne unzulässige Veränderung des Bauteils eine merkliche Schwingfestigkeitserhöhung** zu erzielen. Es bietet sich deshalb besonders für eine Nachbehandlung bei Schwingermüdung von Serienteilen an. Der Effekt des Kugelstrahlens ist gewöhnlich **nicht Bestandteil einer Festigkeitsauslegung**. Neben dem günstigen Einfluss auf die Schwingfestigkeit wird eine Art **Immunsierung der Oberfläche** gegenüber kleinen Beschädigungen, welche nicht die Druckspannungszone durchdringen, erzielt. Unter diesem Gesichtspunkt war Kugelstrahlen bisher ein **absicherndes Verfahren**. In Zukunft ist jedoch damit zu rechnen, dass der Kugelstrahleffekt **in die Auslegung des Bauteils** eingeht. Die Lebensdauer und in vielen Fällen damit die Gesamtsicherheit des Triebwerks ist dann vom Kugelstrahlergebnis abhängig. Leider lässt sich das Kugelstrahlverfahren nur über eine **Prozesskontrolle** absichern. Unbemerkte Abweichungen erhalten so eine neue sicherheitsrelevante Dimension. Die Prüfung kugelgestrahlter Oberflächen und die Überwachung des Strahlprozesses dürfte damit sehr viel anspruchsvoller werden.

Kugelstrahlen hat sich bei einer großen Zahl von Triebwerksbauteilen bewährt. Häufig wird der Kugelstrahlprozess erst eingesetzt, wenn bei der Erprobung oder in der Serie Schwingschäden auftreten und andere Maßnahmen mit akzeptablem Aufwand nicht mehr möglich sind. Beispiele für Anwendungen (Bild 16.2.2.4-11) sind:

- **Verdichterschaukeln** (Blatt und Fuß) zur Verbesserung der Schwingfestigkeit am Blatt. Verbesserung der Schwingfestigkeit im Bereich der Auflageflächen am Fuß bei **Fretting**, insbesondere an Titanlegierungen. Verbesserung der **Korrosionsschutzwirkung** (kathodischer Schutz) von Al-Keramiklacken (Bild 16.2.1.5-2, „L“) an Bauteilen aus Vergütungsstählen (13% Cr-Stahl).
- **Verdichterscheiben an den Auflageflächen** der Schaukeln und in besonderen **LCF-beanspruchten Zonen**, z. B. um Bohrungen.
- **Turbinenräder** in besonders LCF und HCF beanspruchten Zonen, z. B. im **Bereich der Innenbohrung**.
- **Turbinenschaukeln** zur Verbesserung der Schwingfestigkeit. Hier lässt sich an hoch schwingbeanspruchten Blattzonen durch Kombination von Kugelstrahlen (Verformung) und geeigneter Wärmebehandlung Feinkorn auf Grund von Rekristallisation erzielen (Bild 16.2.1.6-5). Eine Anwendung dieser Möglichkeit wurde bisher jedoch nicht bekannt. Erhöhung der Schwingfestigkeit der Tannenbaumfüße.
- **Turbinenleitapparate** als Nacharbeit zur **Verformung der Austrittskanten für eine Durchsatzoptimierung**.
- **Zahnräder**, insbesondere einsatzgehärtete, zur **Verbesserung der dynamischen Zahnfestigkeit** und Verbesserung des Gleitverhaltens der Zahnflanken (Reservoirwirkung). Hier nutzt man **wahrscheinlich tribologische Vorteile der Kalottenstruktur** der Kugelstrahlfläche.
- Schließen offener Porosität zum Abdichten von **ölführenden Gehäusen** (Getriebe, Lagergehäuse) aus Leichtmetall. Zur Anwendung kommen Kugeln aus artgleichem Material mit großem Durchmesser.
- Bauteile die sich bereits in **Serienproduktion** befinden und **Ermüdungsbrüche** erleiden.

Im Folgenden werden einige **Fachbegriffe aus der Technik des Partikelstrahlens** definiert:

Strahlintensität

Strahlintensität ist die vom aufprallenden Strahlgut ausgeübte Wirkung auf die beaufschlagte Oberfläche. Sie ist von der kinetischen Energie, die das Strahlgut an der Oberfläche abgibt, bestimmt. Die Strahlintensität wird mit dem sog. **Almenplättchen** als „**Almenintensität**“ (Bild 16.2.1.6-2) gemessen. Dies ist die Durchbiegung (Bogenhöhe) eines einseitig bestrahlten, standardisierten Stahlblechstreifens. Je nach Dicke des Almenplättchens unterscheidet man N, A und C Almenintensitäten.

Bedeckungsgrad (Überdeckungsgrad, Flächenüberdeckung)

Bedeckungsgrad (Bild 16.2.1.6-4) wird der Flächenanteil, den die Einschlagkrater des Strahlguts bedecken, bezeichnet. Von einem Bedeckungsgrad über 100 % spricht man in der Praxis, wenn ein entsprechendes Vielfaches der Sättigungsstrahlzeit angewendet wird.

Sättigung

Die Sättigung (Bedeckungsgrad nahe 100 %) ist dann erreicht, wenn eine beliebige Verlängerung der **Strahlzeit keine merkliche Intensitätssteigerung** (weniger als 10% der Gesamtintensität) mehr bewirkt. Dies wird gewöhnlich von einem Abknicken der Intensitäts/-Zeitbeziehung angezeigt (Bild 16.2.1.6-2).

Stress-Peening, Strain-Peening

Wenn Bauteile entsprechend den später zu erwartenden (einsinnigen) Betriebsbeanspruchungen während des Kugelstrahlens mechanisch vorgespannt sind, spricht man von Stress-Peening. So wird eine weitere Erhöhung der Druckeigenstressungen und der Schwingfestigkeit erzielt. Dieses Verfahren wird besonders an Federn und Wellen angewandt.

Strahlverfahren und Strahlanlagen

Man unterscheidet abhängig vom **Transportmedium** für die Strahlpartikel zwischen **Nass- und Trockenstrahlen**. Das Nassstrahlen erzeugt gewöhnlich etwas niedrigere Intensitäten (Dämpfung durch Flüssigkeitsfilm) als ein vergleichbarer Trockenstrahlprozess. Es läßt sich nur mit korrosionsfestem Strahlmittel (z.B. mit **Kugeln/Perlen aus Glas oder Keramik**) durchführen. Ein Vorteil ist die Explosionssicherheit (Leichtmetallabrieb!) und Staubfreiheit. Je nach dem Prinzip der Strahlgutbeschleunigung lassen sich **Strahlanlagen in Druckluft-, Injektor- und Schleuderradanlagen** einteilen.

***Bild 16.2.1.6-1:** Die vielen mit dem **Kugelstrahlen verbundenen Effekte** (siehe Beschreibungen in Bild 16.2.1.6-2) können sich auf sehr unterschiedliche Weise auf den **Fertigungsprozess und das spätere Betriebsverhalten** auswirken. Wie man erkennt, entsteht ein komplexes Netzwerk zwischen Effekten und Einflüssen. Die gegenseitige Beeinflussung wirkt sich durchaus nicht nur positiv aus.*

Beeinflussung des Fertigungsprozesses:

***Positiv:** Immunisierung gegen **Spannungsrissskorrosion** (SpRK, Band 1, Bild 5.4.2.2-4, Bild 16.2.2.4-13) und **interkristalline Korrosion** (IK, Bild 16.2.1.6-6, Lit. 16.2.1.6-5) bedeutet für den Fertigungsprozess eine deutliche **Risikominimierung**. So werden gefährliche, rissbildende Korrosionsangriffe, die von werkstoffspezifisch wirkenden Ätzbädern, Beschichtungsbädern und aggressiven Verunreinigungen ausgelöst werden können, vermieden.*

*Die **Anhebung und Absicherung der Schwingfestigkeit** ist eine besonders herausragende Eigenschaft des Kugelstrahlens. Abweichungen im Rahmen der spezifizierten **Prozessparameter** bei Bearbeitungsverfahren wie **Schleifen** (Bild 16.2.1.1-5), **Fräsen** und*

***Drehen** lassen sich mit Kugelstrahlen ausgleichen. Es entsteht eine Schutzwirkung für Kratzer und Beschädigungen, deren Einfluss die Druckspannungszone nicht durchdringt. Druckspannungen lassen sich auch gezielt anwenden, z.B. zum **Richten dünnwandiger Bauteile**. Beispiel ist die **Unterdrückung des Verzugs eines längsgeteilten Verdichtergehäuses** aus einer Titanlegierung in den ersten Betriebsstunden (Band 2, Bild 7.1.3-20). Den vom Fräsen eingebrachten Eigenstressungen wirken dabei Druckeigenstressungen aus einer optimierten Kugelstrahlbehandlung entgegen. Druckspannungen lassen sich auch zur **Haftfestigkeitsprüfung** nutzen. In Zonen schlechter Haftfestigkeit von dünnen zähen Schichten wie galvanischen Silberschichten, kommt es zur Blasenbildung (Bild 16.2.1.6-10). Örtlich unterschiedliche **Oberflächenhärten** zeichnen sich nach dem Kugelstrahlen auf Grund der unterschiedlichen Verformung gegenüber dem angrenzenden Werkstoff ab (Bild 16.2.1.6-10).*

***negativ:** Das Kugelstrahlen kann **Risse plastisch schließen** (Bild 17.3.1-4) und so die **Eindringprüfung beeinträchtigen**.*

Fortsetzung auf Seite 16.2.1.6-5

Aus den Kugelstrahleffekten können sich Vorteile aber auch Probleme für Fertigung und Betrieb ergeben.

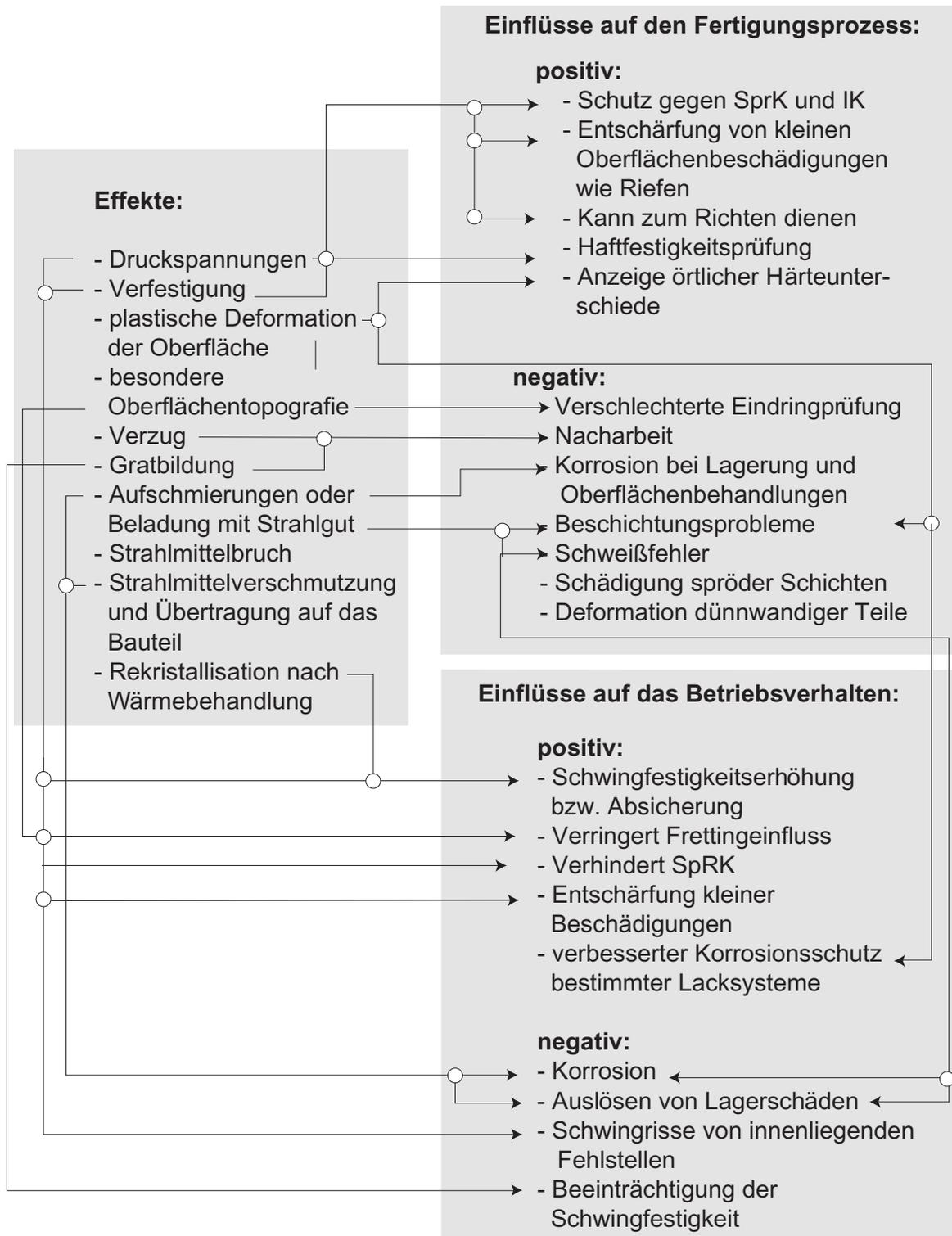


Bild 16.2.1.6-1

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Fortsetzung von Seite 16.2.1.6-3

*Kommt es bei eng tolerierten Bauteilen während des Kugelstrahlens zum Verzug, ist ein **Bearbeiten der Kugelstrahlfläche** nicht möglich, wenn dabei Druckspannungen und Verfestigung merklich abgebaut werden.*

***Frisch kugelgestrahlte** Metallflächen können sehr reaktiv sein. Kam es zusätzlich zum Aufschmieren des metallischen Kugelwerkstoffs (Stahl) können auch sonst **unempfindliche Werkstoffe** (rostfreie Stähle, Titanlegierungen) **korrodieren**.*

*Abrieb von Strahlpartikeln und steckengebliebener Strahlgutbruch (**Beladungseffekt**, z.B. von Glasperlen, Bild 16.2.1.6-4) können **Beschichtungsprozesse** wie die Diffusionsbeschichtung von Heißeilen beeinträchtigen (Bild 16.2.1.8.1-3). **Fe-Abrieb** wird auch für **Fehlstellen beim Schweißen von Titanlegierungen** verantwortlich gemacht (siehe Bild 16.2.1.3-19). Eine plastische Verformung der Oberfläche kann natürlich **dünne spröde Schichten** (z.B. Al-Diffusionsschicht, keramische Schichten) zum **Abplatzen** bringen. Metallische Beschichtungen wie galvanische Ni- und Cr-Schichten sind dagegen nicht gefährdet (Bild 16.2.1.6-5).*

*Dünnwandige Bauteile können beim Kugelstrahlen unzulässig plastisch verformt werden (Bild 16.2.1.6-11). Hierzu gehört auch die **Bildung von Gerten** („**Elephant Tail**“), was die Schwingfestigkeit gefährlich herabsetzen kann (Bild 16.2.1.6-11 und Kapitel 16.2.2.2).*

Einflüsse auf das Betriebsverhalten:

***Positiv:** Wirken **Fehlstellen nicht so tief wie die Druckspannungszone** des Kugelstrahlens (Bild 16.2.1.6-2), werden sie „**entschärft**“ und eine Schwingrissbildung behindert. Bauteile, insbesondere Rotorkomponenten heutiger Triebwerke, sind extrem hoch zyklisch belastet. Deshalb können bereits unbemerkte, kleine Kerben wie **Kratzer** (vom „**Handling**“ z.B. bei Montage und Wartung) und ungewöhnliche **Bearbeitungsriefen** (Bild 16.2.2.1-4) so-*

*wie **Funken** (Bild 16.2.2.6-7) im Betrieb zum katastrophalen Versagen des Bauteils führen. Druckspannungen, Verfestigung und, werkstoffspezifisch (z.B. Titanlegierungen), wahrscheinlich auch die typische **Kalottenstruktur** (Topografie) einer kugelgestrahlten Oberfläche, verhindern ein extremes Absinken der Schwingfestigkeit (Bild 16.2.1.6-8). Das gilt besonders für **Titanlegierungen** unter Verschleiß durch Mikrobewegungen (**Fretting**, Band 2 Bild 6.1-19).*

*Druckspannungen sind ein **Schutz gegen Spannungsrissskorrosion**. Sie können Bauteile mit empfindlichen Gefügeständen (Band 1 Bild 5.4.2.2-4 und Bild 16.2.2.3-16) vor dem Versagen im Betrieb schützen.*

*Mit Aluminium pigmentierte **anorganische Lacksysteme** auf Stählen wie den 13%-Cr-Stählen der Verdichterbeschaufelung älterer Triebwerkstypen, werden durch Kugelstrahlen elektrisch leitfähig. Das **verbessert die kathodische Schutzwirkung** erheblich.*

***negativ:** Kugelstrahlen kann sich unter besonders ungünstigen Umständen auch negativ auf das Betriebsverhalten von Bauteilen auswirken. **Abrieb der Stahlkugeln** auf korrosionsfesten Werkstoffen wie Titanlegierungen und hochlegierten Stählen kann Korrosion auslösen (Bild 16.2.2.3-2). Bei dicken biegebeanspruchten Querschnitten verlieren Druckspannungen wegen dem flacheren Spannungsgradienten an Schutzwirkung gegenüber dicht unter der Oberfläche liegenden Fehlern (Bild 16.2.1.6-7). Steht der Querschnitt gleichmäßig unter Zugspannungen, wie rotierende Ringstege unter Tangentialspannungen (Bild 16.2.2.4-9.1), ist sogar ein Abfall der Schwingfestigkeit (LCF) nicht auszuschließen.*

Die Strahl- (Almen-) intensität ist ein Überwachungsverfahren für den Strahlprozess.

Strahlintensitätsmessung nach Almen

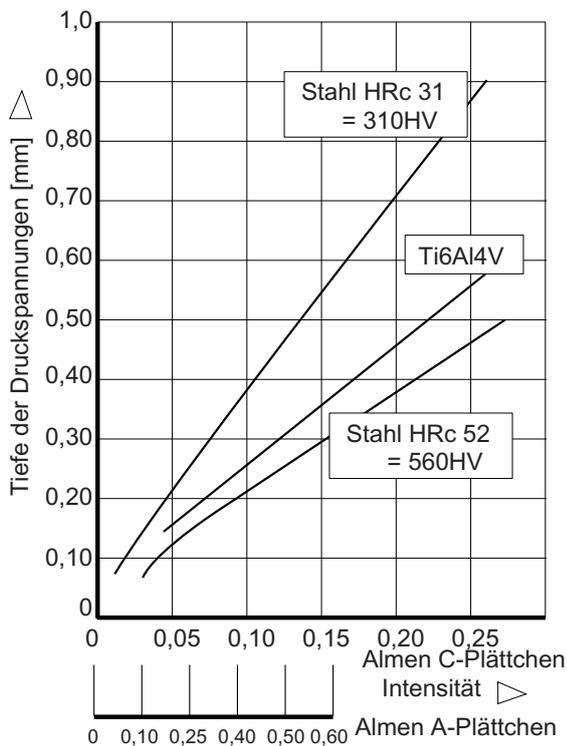
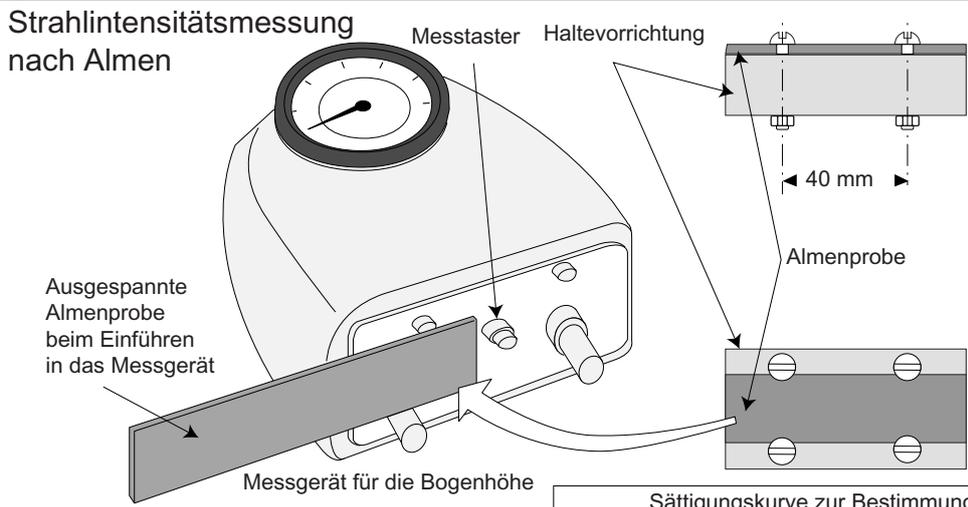
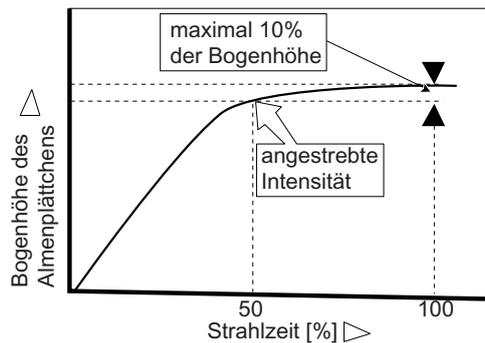
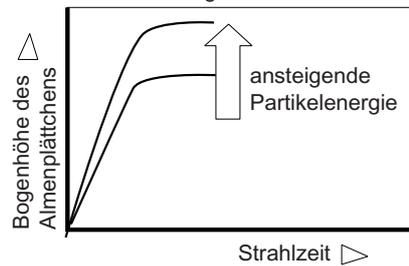


Bild 16.2.1.6-2

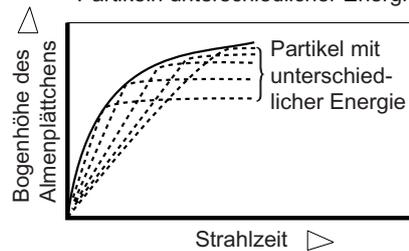
Sättigungskurve zur Bestimmung der Strahlintensität.



Abhängigkeit der Sättigungskurve von der Partikelenergie



Sättigungskurve eines Strahls mit Partikeln unterschiedlicher Energie



Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Bild 16.2.1.6-2: Die Wirkung des Kugelstrahlens wird indirekt mit der sog. **Almenintensität** spezifiziert (Bild 16.2.1.6-16) und überwacht (Lit. 16.2.1.6-1 und Lit. 16.2.1.6-5). Die Almenintensität dient in erster Linie der **Verfahrensüberwachung** (Bild 16.2.1.6-3). Sie ist ein Kennwert für den gesamten Kugelstrahlereffekt und von vielen Einflüssen abhängig (Bild 16.2.1.6-3). Im Diagramm unten links erkennt man einen weitgehend linearen Zusammenhang zwischen Almenintensität und Tiefe der induzierten Druckspannungen. Dagegen steht die Höhe der induzierten Druckspannung offenbar nicht in einem einfachen Zusammenhang mit der Almenintensität (Bild 16.2.1.6-3). Zu deren Bestimmung wird, wie im Rahmen oben dargestellt, ein definiertes **Blechplättchen** einseitig gestrahlt. Die induzierten Druckspannungen führen nach dem Lösen aus dem „Prüfblock“ zur **Durchbiegung**, die mit einem Messgerät bestimmt wird. Dieses Prinzip wird sowohl bei der Ermittlung optimaler Verfahrensparameter in der Entwicklung, als auch während der Serienfertigung angewendet. Bestehend ist die Einfachheit des Prüfverfahrens, jedoch ist auch mit Schwächen zu rechnen. Insbesondere kann die Almenmessung nur eine Aussage für die auf das Blechplättchen wirkende Strahlintensität machen, nicht aber für die gesamte Bauteiloberfläche. Beispiele sind Schaufelnuten in Scheiben oder Tannenbaumfüße von Turbinenschaufeln. Die Strahlzeit reicht gewöhnlich bis zur **Sättigung**. Diese ist dann gegeben, wenn die Intensität auch bei beliebig langem Strahlen, um nicht mehr als 10 % des Gesamtwertes ansteigt (oberes Diagramm im rechten Rahmen). In diesem Bereich flacht sich die Intensitätskurve über der Strahlzeit deutlich ab. Bei Sättigung ist auch ein **Bedeckungsgrad** um 100 % erreicht. Oft werden, um die benötigte Intensität in jedem Fall zu gewährleisten, **Bedeckungsgrade über 100 % vorgeschrieben**. Das erfordert ein entsprechendes **Vielfaches der zur Sättigung notwendigen Strahlzeit**. Der Anstieg der Intensität, d. h. die Durchbiegung eines dünnen Blechplättchens mit der Strahlzeit, verläuft häufig

anders als die Zunahme der Tiefe und der Höhe der induzierten Druckeigenstressungen (Diagramm links). Der **Verlauf der Druckeigenstressungen** in das Bauteil zeigt ein besonders ausgeprägtes Sättigungsverhalten. Abhängig von Strahlmittel und Grundwerkstoff können bei gleicher Tiefe der Druckeigenstressungen und gleicher Almenintensität deutlich unterschiedliche mittlere Druckeigenstressungen bei Sättigung erzielt werden.

Wichtig ist anzumerken, dass die Strahlintensität auf keinen Fall zu Überlappungen (PSEF, Bild 16.2.1.6-15) führen darf. Diese können als Merkmale einer Überstrahlung gelten und die Schwingfestigkeit beeinträchtigen.

Der in Spezifikationen angegebene **Durchmesser der Strahlpartikel** (Korndurchmesser) ist gewöhnlich ein **Mittelwert**. Davon weicht je nach Qualität ein gewisser Prozentsatz der Strahlpartikel nach oben und unten ab. Deshalb wird die **Korngrößenverteilung in einer Siebanalyse** festgelegt. Wünschenswert ist eine möglichst geringe Streuung der Durchmesser. Der Korndurchmesser beeinflusst die erzielbare **Sättigungsintensität**, die im allgemeinen mit diesem und damit der Partikelenergie ansteigt (Rahmen unten). Interessanterweise ist es möglich, dass Kugeln mit größerem Durchmesser geringere Eigenstressungen induzieren, als kleine. Es scheint, dass bei weicheren Werkstoffen der Einfluss des Korndurchmessers zunimmt.

Die Streuung der Korndurchmesser hat einen wichtigen **Einfluss auf den Anstieg der Intensität mit der Strahlzeit** (Rahmen unten). Bei geringer Streuung ergibt sich bis nahe zur Sättigung ein nahezu linearer Anstieg der Intensität mit der Strahlzeit. Ein Strahlmittel **mit sehr unterschiedlichen Korndurchmessern** lässt dagegen einen flachen bogenförmigen Anstieg der Sättigungskurve erkennen. Erst nach relativ langer Zeit wird die **Sättigungsgrenze** erreicht. Das bedeutet, dass die **Strahlmaschine mit dem verwendeten Strahlgut nicht optimal genutzt** wird.

Die optimalen Kugelstrahlparameter sind für den jeweiligen Anwendungsfall spezifisch.

Einflüsse auf die Wirkung des Kugelstrahlens

Kugeleigenschaften

Kinetische Energie:
- Geschwindigkeit
- Auftreffwinkel (Strahlwinkel)
- Masse

Kontaktfläche
- Geometrie:
Größe, Form

Werkstoff:
- Festigkeit/
Fließgrenze
- E-Modul,
- Zähigkeit,
- Verschleiß-
verhalten

Wirkungen der Kugel:

- Energieübertragung/
Abprallen
- Beschädigung/Bruch
- Abrieb/Aufschmie-
rungen

Grundwerkstoff- eigenschaften:

- Festigkeit, Fließgrenze
- E-Modul
- Zähigkeit
- Verschleißverhalten

Bauteil:

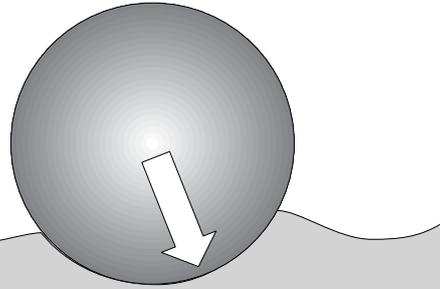
- Querschnitt/Steifigkeit
- Deformation/Verzug

Wirkung im Grundwerkstoff:

- Druckeigenspannungen
- Kaltverfestigung
- plastische Verformung
- Abrieb/Aufschmierungen

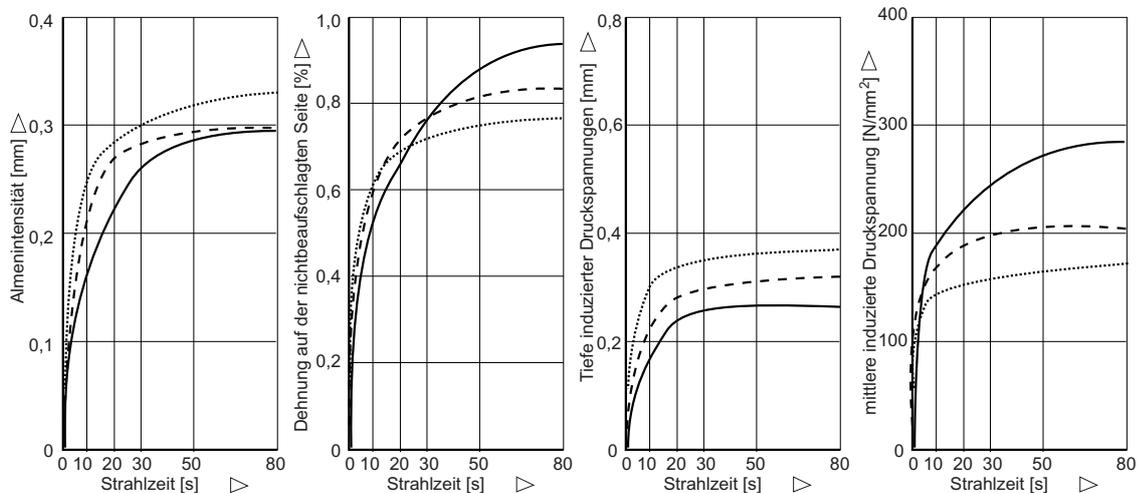
Prozessparameter:

- Strahlzeit
(Bedeckungsgrad)
- Durchläufe
- Strahlmitteldurchsatz
- Maschinenbesonder-
heiten/ Kugelgeschw.



Die Almenintensität dient der Verfahrensüberwachung, sie sagt nur eingeschränkt etwas über Höhe und Eindringtiefe der induzierten Druckspannungen aus.

Strahlendaten: Düsen \varnothing 15 mm, Düsenabstand 120 mm, Strahl Druck 7 at,
Strahlgutdurchsatz 0,025 kg/s



— Almenplättchen MK 75 A2. Strahlgut: Hartguss 2mm \varnothing (ca. 46 HRc)
- - - Almenplättchen MK 75 A2. Strahlgut: Drahtkorn gerundet 0,3mm \varnothing (ca. 46 HRc)
..... Almenplättchen CK 45 A2. Strahlgut: Hartguss 0,3mm \varnothing (Brinellhärte ca. 200)

Bild 16.2.1.6-3

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Bild 16.2.1.6-3: Beim **Kugelstrahlen**, auch „**Shot Peening**“, werden pro Zeiteinheit eine bestimmte Menge vorzugsweise sphärisch geformte Partikel auf die zu behandelnde Oberfläche geschossen. Dies geschieht mit Hilfe einer **Strahlanlage**. Die Förderung des Strahlguts erfolgt mechanisch mit einem Schleuderrad oder mit einem Druckluftstrom (Lit. 16.2.1.6-1). Der Partikelstrahl trifft die Bauteiloberfläche unter einem **Winkel** bei einem bestimmten **Düsenabstand**. Im Einschlagbereich eines Strahlpartikels wird die Oberfläche plastisch verformt. Das führt zu den folgenden gewünschten Effekten (Bild 16.2.1.6-1):

- **Verfestigung einer Oberflächenzone** von mehreren zehntel Millimetern Dicke.
- **Erzeugung eines Eigenspannungszustands mit Druckspannungen** im Oberflächenbereich. Diese übertreffen die Zug- und Schubspannungen darunter liegender Schichten um ein Vielfaches.
- **Vermeidung gefährlicher Zugspannungsspitzen in Kerben** (z. B. an Schaufelnuten und Tannenbaumfüßen).
- **Vergleichmäßigung des Oberflächenzustandes**. Das gilt sowohl für die **mechanischen Eigenschaften** als auch die **Rauigkeit** und deren Profil.
- **Herstellung einer besonderen, meist kalottenartigen Oberflächentopographie** (Bild 16.2.1.6-8).

Die **Verfestigung** und induzierte **Druckeigen-
spannungen** (Bild 16.2.1.6-5), heben die **Schwingfestigkeit** gewöhnlich merklich an. Dabei kann bei verschiedenen Werkstoffen der Anteil **durchaus unterschiedlich** auf Verfestigung und Druckspannung verteilt sein (Lit. 16.2.1.6-3). **Druckeigen-
spannungen** wirken schwingfestigkeitserhöhend, indem sie sich dynamischen Betriebsspannungen mittelspannungsvermindernd überlagern (Bild 16.2.1.6-5 und Bild 16.2.2.4-4).

Wie weit sich die Schwingfestigkeit mit Kugelstrahlen erhöhen läßt, hängt u.a. vom **Spannungsgradienten** in Oberflächennähe des Bauteils bei dynamischer Beanspruchung ab (Bild 16.2.1.6-7).

Interessanterweise wird **die höchste Schwingfestigkeit bei den meisten Werkstoffen mit einer moderaten Strahlungsintensität erreicht**. Diese muss ausreichend unter den Werten einer **Überstrahlung** liegen, die von **Überlappungen (PSEF, Bild 16.2.1.6-15)** angezeigt wird.

Die **kalottenartige Oberflächengestalt** wirkt sich anscheinend in manchen Fällen günstig auf die Schwingfestigkeit bei gleichzeitigem **Fretting** aus (Bild 16.2.1.6-8). Diesen Schluss legt zumindest die Erfahrung nahe.

Neben der Schwingfestigkeitssteigerung lassen sich Druckeigen-
spannungen auch auf andere Weise nutzen:

- **Schutz gegen Spannungsrissskorrosion** (Bild 16.2.1.6-6).
- **Schutz gegen interkristalline Korrosion** (Bild 16.2.1.6-6).
- **Verbesserung des Korrosionsschutzes mit der Schließung von Poren in Gussteilen. Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit von Al-Keramiklack** und damit der **kathodischen Schutzwirkung**.

· **Vermeidung des Risswachstums von rissigen Oberflächenschichten** (z. B. Cr-Schicht) in das

Grundmaterial.

Das Kugelstrahlen erfordert als definiertes Bearbeitungsverfahren eine **intensive Optimierung und Überwachung des Verfahrensablaufs**. Wichtigste Kenngröße ist die **Strahl-
intensität (Almenintensität)**. Diese ist für die bauteilindividuelle Optimierung des Verfahrens bestimmend. Die Konstanz der ermittelten Verfahrensparameter ist während des Strahlvorgangs zu überwachen. Dies geschieht gewöhnlich auf einfache Weise mit der Messung der Intensität unter Verwendung eines Almenplättchens (Bild 16.2.1.6-2).

Ein Gefühl für die Komplexität des Zusammenhangs zwischen Almenintensität und dem Druckspannungsverlauf zeigen die Diagramme im unteren Rahmen (Lit. 16.2.1.6-4). Die Reihenfolge der **Sättigungsintensitäten entspricht der Tiefe der induzierten Druckspannungen**, nicht aber deren Höhe. Dieser Unterschied dürfte sich in Bauteilen werkstoffbedingt (Titanlegierungen, Ni-Legierungen, Leichtmetalle und Stähle) noch verstärken.

Die Strahlintensität (Almenintensität) ist von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängig:

- **Kugelstrahlanlage:** Art des Strahlverfahrens (Injektor, Schleuderrad, trocken, nass).
- **Prozessdaten:** Arbeitsdruck, Düsenanzahl
- Düsendurchmesser (Durchsatz), Strahlwinkel (Bild 16.2.1.6-13), Abstand zwischen Düse und Werkstück, Strahlzeit, in der das Werkstück dem Strahlmittelstrom ausgesetzt ist,
- Geschwindigkeit des Werkstücks bei geradliniger Bewegung oder Drehung.
- Bedeckung (Bild 16.2.1.6-4)

Strahlgut: Werkstoffeigenschaften (Härte, Zähigkeit/Sprödigkeit), Korngröße und Kornform.

- **Qualitätssicherung:** Anordnung der Almenproben zum Werkstück, Intensität, Bedeckung, Sättigung

Gängige Almenintensitäten (Lit 16.2.1.6-1) sind in Bild 16.2.1.6-16 enthalten. Im Folgenden werden zu wichtigen Einflussgrößen nähere Angaben gemacht.

Strahlpartikel

Strahlpartikel können aus verschiedenen Materialien bestehen, die aus unterschiedlichen Herstellungsprozessen stammen.

- Vorgerundeter Stahldrahtschnitt meist unter 1 mm Größe mit einer Härte von ca. 50 HRC.
- **Stahlhartgusskugeln**
- **Glas- und Keramikperlen** von mehreren Zehntelmillimeter Durchmesser.

Die Strahlpartikel sollten alle möglichst gleiche Größe aufweisen, ohne scharfe Kanten, um dauerfestigkeitsmindernde Kerben zu vermeiden (Bild 16.2.1.6-4).

Diese Forderungen verlangen bei der Strahlgutherstellung hohe Qualität. So sind z.B. **Gusskugeln mit Hohlräumen** sehr empfindlich für Bruch mit scharfen Kanten. Deshalb ist auch während des Strahlvorganges eine **ständige Überwachung und Aussortierung des Strahlguts** notwendig. Ein Strahlgut mit dem mittleren Korndurchmesser von 0,3 mm enthält pro Kilogramm ca. 10^7 Partikel und erzeugt pro Quadratzentimeter ca. 100 000 Einschläge während eines üblichen Strahlvorgangs.

Strahlwinkel (Einfallwinkel) siehe Bild 16.2.1.6-13.

Strahlabstand

Der übliche Strahlabstand (Abstand zwischen Strahldüse und Strahlfläche) liegt gewöhnlich unter 0,5 m, eher bei 10 cm. Der Strahlabstand **beeinflusst die Strahlintensität** weil der Strahl **kegelig aus der Düse** tritt und damit die Zahl der auftreffenden Strahlpartikel pro Flächeneinheit und Zeit sich mit größer werdendem Abstand verringert.

Strahldüse

Häufig werden nicht nur eine Düse, sondern mehrere Düsen gleichzeitig verwendet, um die Strahlanlage möglichst effektiv auszunutzen. Der **Strahldüsendurchmesser** beeinflusst den **Strahlmitteldurchsatz**. Für jede Korngröße und jedes Strahlgut gibt es eine **optimale Einstellung der Durchsatzmenge**. Beim Überschreiten dieser Einstellung fängt die Düse an zu „**stottern**“, d. h. das Strahlgut tritt infolge eines Staus ungleichmäßig aus.

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Strahlpartikelgeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit der Strahlpartikel liegt je nach Strahlverfahren oder Auftreffbedingungen zwischen 30 und 200 m/sec. Sie beeinflusst die kinetische Teilchenenergie und damit den **Strahleffekt quadratisch**. Die Partikelgeschwindigkeit wird im Allgemeinen nicht direkt während des Strahlvorgangs gemessen. Es handelt sich somit auch um keine gebräuchliche Kenngröße des Verfahrens.

Strahlpartikel siehe Bild 16.2.1.6-2.

Strahlzeit siehe Bild 16.2.1.6-2

Strahlbewegung zur Bauteiloberfläche siehe Bild 16.2.1.6-4.

Vorbehandlung der Werkstücke

Die zu strahlenden Teile sollten **vor dem Strahlvorgang sauber und fettfrei** sein. Beschichtungen wie Lacke, galvanische Schichten oder eine Brünierung müssen vorher entfernt werden. Es sei denn, sie werden bewusst gestrahlt. Dies ist z.B. bei Cr- und Ni-Schichten üblicherweise der Fall (Bild 16.2.1.8.3-2). Eine **möglichst geringe Oberflächenrauigkeit** ($R_a = 1,6 \text{ mm}$) der Bauteile **vor dem Strahlen** ist anzustreben, um einen optimalen Strahleffekt zu erzielen. Das gilt auch dann, wenn das Strahlen die Rauigkeit erhöht. **Bohrungen (Verunreinigungsgefahr)** und **empfindliche Bereiche dünnwandiger Bauteilpartien** wie Labyrinthspitzen oder feine Gewinde sind mit geeigneten Vorrichtungen oder Hilfsstoffen **abzudecken**. **Bleiband ist wegen der Gefahr der Strahlmittelverunreinigung** und der Übertragung von Blei auf andere Bauteile nicht zu verwenden.

Es ist davon auszugehen, dass in den zu strahlenden Teilen, insbesondere Verdichterschaukeln, auf Grund der Fertigung (Zerspanung) **örtlich unterschiedlich Eigenspannungen** induziert sind. Sie können die Schwing-

festigkeit in Bereichen von Zugspannungen bedenklich absenken. Diese stehen häufig im Gleichgewicht mit undefinierten Druckeigenspannungen an der Oberfläche. Der Einfluss dieser, dicht unter der Oberfläche liegenden Zugspannungen auf die Schwingfestigkeit hängt bei überlagerter dynamischer Biegebelastung von der Querschnittsdicke ab (Bild 16.2.1.6-5). Die **Parameterentwicklung des Kugelstrahlens** sollte dem Rechnung tragen (Lit. 16.2.1.5-8).

Aus diesem Grund sollten **vor dem Kugelstrahlen Verdichter- und Fanschaukeln** bei 10-15°C über der jeweiligen Betriebstemperatur „**thermisch stabilisiert**“ werden. So lassen sich die Eigenspannungen abbauen und vergleichmäßigen. Für die Optimierung der Strahlparameter sind **relevante Bauteile** (Verdichterschaukeln) unter **typischer Betriebsbeanspruchung** (Biegewechselschwingungen, Fliehkraftzyklen) zu verwenden. Nur so ist die **bauteilspezifische Eigenspannungsverteilung** und die **individuelle Querschnittsverteilung** ausreichend berücksichtigt.

Nachbehandlung der Werkstücke

Das Kugelstrahlen sollte immer **der letzte Arbeitsgang an der zu verfestigenden Oberfläche** sein. Diese Forderung beruht auf der Erkenntnis, dass jede abtragende Nacharbeit die relativ dünne Druckspannungszone (Bild 16.2.1.6-2 und Bild 16.2.1.6-3) nachteilig beeinflusst. Wird diese dünne Zone teilweise oder gar ganz entfernt, fallen die erwünschten induzierten Druckspannungen entsprechend dem Spannungsverlauf im Querschnitt (Bild 16.2.1.6-5) schnell ab. Zusätzlich besteht bei **Nacharbeit die Gefahr, dass Wärmeeinwirkung** (z. B. beim mechanischen Polieren oder Schleifen) eine **Relaxation** auslöst. Oberflächenbeschädigungen wie Feilenkratzer und Reißnadelstriche sind trotz eines gewissen Schutzeffekts des Kugelstrahlens unbedingt zu vermeiden. Eine Wärmebehandlung nach dem Strahlvorgang, die oberhalb der maximalen

Betriebstemperatur gestrahlter Bauteile liegt, hat zu unterbleiben. Andernfalls baut sich der Kugelstrahleffekt durch Relaxieren (Bild 16.2.2.4-15.1) unnötig stark ab. Die **maximal zulässige bzw. sinnvolle Betriebstemperatur** (Bild 16.2.1.6-9) hängt von der Warm- bzw. Kriechfestigkeit des Grundmaterials ab. Sie liegt für Stähle etwa bei 250 °C, für Al- und Mg-Legierungen bei ca. 130 °C. Superlegierungen können bis zu mehreren hundert °C (einige bis max. 750 °C) erwärmt werden. Dies ist der Grund, warum ein Kugelstrahlen auch für **Tannenbaumfüße gekühlter Hochdruckturbinenrotorschaukeln** sinnvoll ist.

Eine besondere Form der **Nacharbeit**, das sogenannte **Zweistufenverfahren**, wird häufig angewendet. Darunter versteht man **zwei aufeinanderfolgende Strahlbehandlungen**. Zuerst wird mit Stahlkugeln und anschließend mit Glasperlen gestrahlt. Dieses Verfahren findet besonders dann Anwendung, wenn zu befürchten ist, dass Rückstände des Strahlguts Korrosion oder andere Reaktionen an der Bauteiloberfläche auslösen. Hierzu gehören die **Elementbildung** bei Al-Legierungen, oder Cr/Ni-Stählen, **Lötrissigkeit** an Ni-Legierungen und Schweißprobleme mit **Titanlegierungen**. **Unmittelbar nach dem Strahlen sind alle Abdeckungen zu entfernen**. Das Werkstück ist einwandfrei vom Strahlmittel zu reinigen. Ein besonderes Augenmerk gilt **Hohlräumen für die Kühlluftführung** in Heißeilen und Bohrungen für Öl. Nach dem Nassstrahlen sind die Teile unverzüglich zu trocknen (z. B. Abblasen mit Druckluft). Die **chemisch sehr aktive frische Strahlfläche** ist bei korrosionsempfindlichen Werkstoffen mit einer geeigneten **Konservierung** zu versehen.

Einfluss des Werkstückmaterials siehe Bild 16.2.1.6-9

Bild 16.2.1.6-4: Zur Erzielung eines gleichmäßigen Strahleffekts über eine große Bauteiloberfläche ist eine **Bewegung des Partikelstrahls über die Bauteiloberfläche** notwendig. So wird die Oberfläche einmal oder mehrmals unter dem Strahlmittelstrahl hindurchgeführt. Häufig werden dabei Strahldüse und Bauteil bewegt. Beispielsweise über zylindrische Flächen mit einer axialen Bewegung der Strahldüse und einer Drehbewegung des Bauteils. In diesem Fall besteht besonders bei **hoher Geschwindigkeit der Düsenbewegung** die Gefahr, dass **periodisch gestrahlte und ungestrahlte Zonen** auftreten. Schnelle oszillierende Bewegungen der Düse im Vergleich zu einer langsamen Werkstückbewegung führen eher zu **einem „Fliesenbild“**. Ist die Düsenbewegung vergleichsweise zur Werkstückdrehung langsam, muss mit **Streifen** gerechnet werden (Skizzen oben). Diese Unregelmäßigkeiten im **Strahlbild** müssen mit einer optimalen Abstimmung der Bewegungsabläufe verhindert werden. Ein gutes Strahlbild weist überall eine gleichmäßige, vollkommene (100%) Bedeckung auf. Diese lässt sich mit einem Planimeter am Bauteil oder, bei schlechter Zugänglichkeit, an einem **Oberflächenabdruck** (Bilder unten, Lit. 16.2.1.6-7) mit einem Mikroskop (Lit. 16.2.1.6-3) bestimmen. Eine vollautomatische Auswertung unter Zuhilfenahme eines Computerprogramms ist möglich.

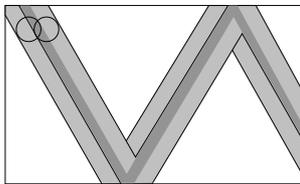
Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Der Kugelstrahlprozess bedarf einer, zerspanenden Verfahren vergleichbaren, Optimierung und Überwachung der Verfahrensparameter.

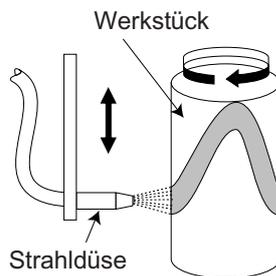
Strahlbilder auf Kugelstrahlflächen

Schnelle Düsenbewegung
bei langsamer Werkstückdrehung

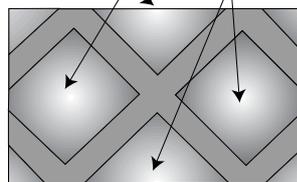
Abgewickelte
Zylinderoberfläche



gutes Strahlbild



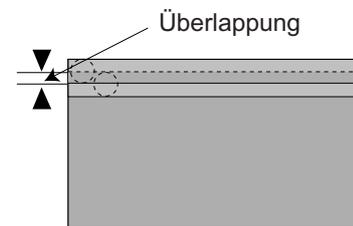
ungestrahlte Bereiche



schlechtes Strahlbild

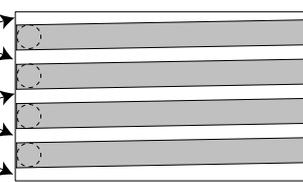
Langsame Düsenbewegung
bei schneller Werkstückdrehung

Abgewickelte
Zylinderoberfläche



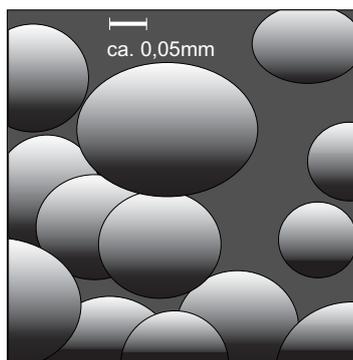
gutes Strahlbild

ungestrahlte Bereiche

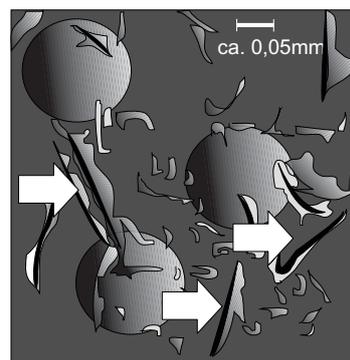


schlechtes Strahlbild

Die mikroskopische Untersuchung (REM) der Strahloberfläche lässt Rückschlüsse auf Bedeckungsgrad, Strahlwinkel, Intensität und Strahlmittelqualität zu.



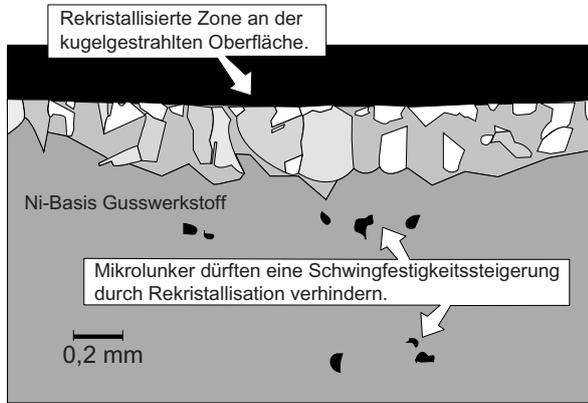
Mit guten Glasperlen gestrahlte
Oberfläche, (Bedeckungsgrad
ungenügend)



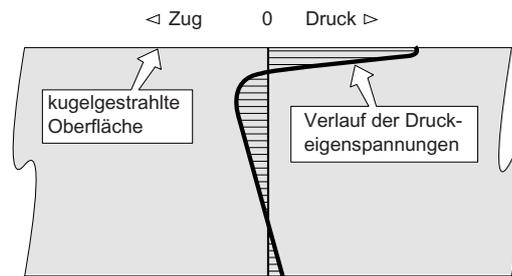
Mit Bruchglas gestrahlte Oberfläche
mit scharfen schnittartigen Kerben,
(Bedeckungsgrad sehr schlecht)

Bild 16.2.1.6-4

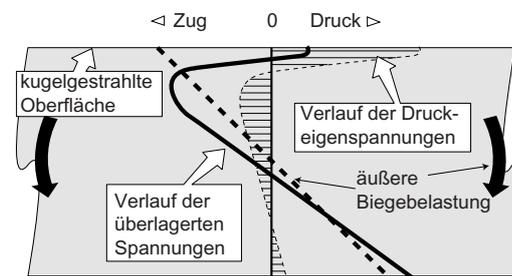
Erhöhung der Schwingfestigkeit durch Kugelstrahlen



Versuch der gezielten Rekristallisation einer Gussoberfläche zur Steigerung der Schwingfestigkeit.

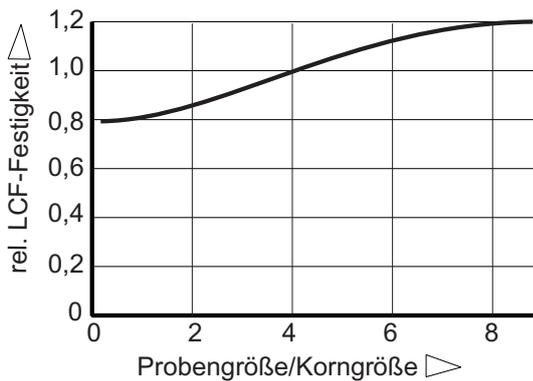


Eigenstressverteilung in einem einseitig kugelgestrahlten Blech ohne äußere Belastung.

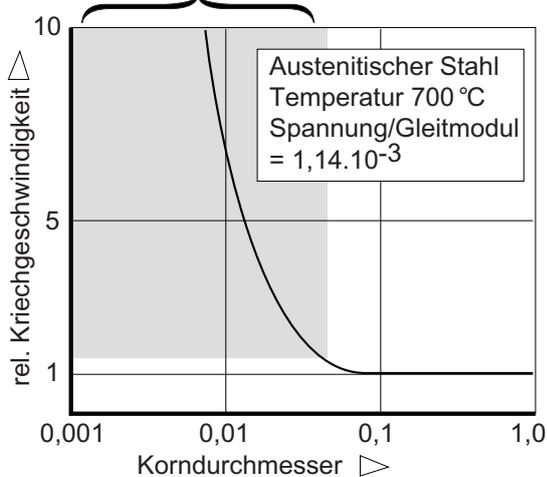


Eigenstressverteilung in einem einseitig kugelgestrahlten Blech mit äußerer Biegebelastung.

Korngrößeneinfluss auf die dynamische Festigkeit



erhöhte Kriechgeschwindigkeit



Flachproben unter Biegewechselbeanspruchung eines Vergütungsstahls mit 45 HRC (Lit. 16.2.1.6-5)

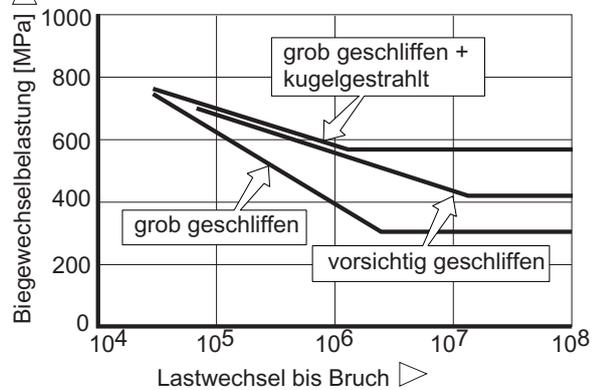


Bild 16.2.1.6-5

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Bild 16.2.1.6-5: Der wohl am meisten genutzte Effekt des Kugelstrahlens ist die **Erhöhung und/oder die Absicherung der Schwingfestigkeit** (Lit. 16.2.1.6-5). Dieser Effekt beruht auf induzierten oberflächennahen **Druckeigenstressungen** (Skizzen rechts oben und Mitte) die im Betrieb Zugspannungen reduzieren. Damit sinkt die **Mittelspannung** und der ertragbare Spannungsaussschlag steigt (Band 3 Bild 12.6.1-2). Ein weiterer schwingfestigkeitssteigernder Einfluss ist eine **Verfestigung** des Werkstoffs.

Die Vorteile des Kugelstrahlens **sind unter den folgenden Betriebsbedingungen besonders ausgeprägt und langzeitstabil.**

- Hohe Ermüdungs-Lastwechselzahl, d.h. eine Lebensdauer möglichst weit im HCF-Bereich bzw. eine Schwingbelastung in der Nähe der Dauerfestigkeit.
- Niedrige Bauteil-Betriebstemperatur.
- Weniger stark verfestigte Oberfläche (Bild 16.2.1.6-9).

Die **Schwingfestigkeitserhöhung wird bei vielen Bauteilen** genutzt:

· **An galvanisch beschichteten Bauteilen** (Bild 16.2.1.8-3). Ein Strahlen vor der Beschichtung verhindert offenbar ein Risswachstum in das Grundmaterial (Bild 16.2.1.8-3).

Das Kugelstrahlen kann vor oder nach dem Aufbringen von Cr- oder Ni-Schichten erfolgen. Wider Erwarten ist ein **Kugelstrahlen nach dem Beschichten der spröde wirkenden Schichten, sogar effektiver.**

· **Abbau schwingfestigkeitsabsenkender Zugspannungen an Schweißungen** (Bild 16.2.1.3-16).

· **Wellen:** Verbesserung der Verschleißfestigkeit (**Fretting**) und der **Dauerfestigkeit von Keilverzahnungen** (Band 2, Bild 6.2-18). Man nutzt die **Reservoirwirkung der besonderen Topografie einer Kugelstrahlfläche** für Dauerschmiermittel.

An **Sollbruchstellen** hat sich Kugelstrahlen besonders bewährt. Bei relativ niedriger stati-

scher Festigkeit (formgeschwächte Zonen) wird eine möglichst hohe dynamische Festigkeit benötigt (Band 1 Bild 4.5-12).

· **Formkerben** an Bauteilen wie Scheiben (Aufnahmenuten für Schaufeln) und Turbinenschaufeln (Tannenbaumfüße) lassen sich mit Kugelstrahlen **entschärfen**. Notwendig ist natürlich eine ausreichende Zugänglichkeit und die Bedeckung des Nutgrunds.

· Teile wie Verdichterringerschaukeln mit hohen Zugeigenstressungen im Oberflächenbereich (Fußauflagen), bei gleichzeitiger dynamischer Beanspruchung und Frettingeinfluss (Bild 16.2.1.6-8).

· **Entschärfen fertigungsbedingter Schwachstellen** (z.B. Kratzer, Bild 16.2.1.6-1) und **Zugspannungen** (z.B. vom Schleifen, Bild 16.2.1.8-3; Diagramm unten rechts).

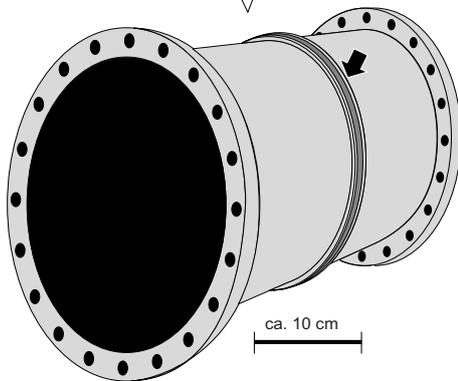
Im Inneren einer gegossenen Turbinenschaufel ist die hohe Kriechfestigkeit des Grobkorns (Rahmen, Diagramm unten) erwünscht.

Im Oberflächenbereich wäre dagegen ein möglichst feines Korn mit hoher Schwingfestigkeit (Rahmen, Diagramm oben) von Vorteil. Es liegt nahe, diese Kornverteilung mit einer **Rekristallisation der Oberfläche** zu erhalten (Bild oben links). Dafür lässt sich eine „kritische“ plastische Verformung der Kugelstrahlfläche in Kombination mit einer ausreichend hohen Glühtemperatur nutzen. Ein potenziell möglicher Anstieg der Schwingfestigkeit wird jedoch von werkstofftypischen Schwachstellen (Porosität, Bild 15.3-8), deutlich begrenzt (Bild 15.3-6). Voraussetzung wäre also zumindest eine erfolgreiche HIP-Behandlung und die Abarbeitung einer eventuell vorhandenen porösen Oberflächenzone. In jedem Fall müssen einer Einführung **Versuche und eine ausreichende Erprobung** vorausgehen.

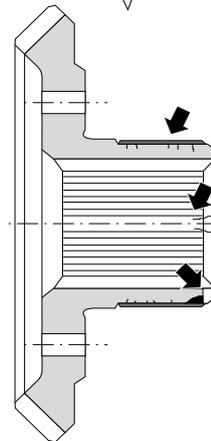
Die Gefahr einer Risskorrosion unter Einwirkung von Prozessbädern lässt sich mit Kugelstrahlen vermeiden.

Durch Kugelstrahlen vermeidbare Spannungsrisskorrosion in der Fertigung

Spannungsrisskorrosion im Bereich der Schweißung einer Welle aus einer hochfesten **Ti-Legierung**: Nach einer **Entfettung in einem Cl-haltigen Bad** ohne Inhibitor und einer folgenden Wärmebehandlung.

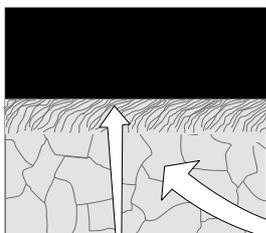


Spannungsrisskorrosion (Laugenrissigkeit) an **Einsatzstählen in Brünierbädern** NaOH + NaNO₃ (Lauge!)



Auch Interkristalline Korrosion lässt sich durch Kugelstrahlen vermeiden.

kein Korngrenzenangriff



plastisch verformte Zone ohne durchgängige Korngrenzen

im Bereich der Wärmeeinflusszone "sensibilisierter" Cr-Ni-Stahl

kugelgestrahlte Fläche

ungestrahlte Fläche

Korngrenzenangriff

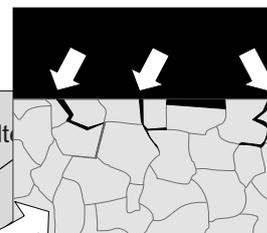


Bild 16.2.1.6-6

Bild 16.2.1.6-6: Spannungsrisskorrosion (SpRK) kann ohne ausreichend hohe Zugspannungen nicht entstehen. Die vom Kugelstrahlen induzierten Druckspannungen **schützen deshalb vor SpRK**. Typische Fälle im Fertigungsbereich, die mit Kugelstrahlen vermeidbar sind, zeigen die oberen Skizzen (Bild 16.2.1.8-3). An Titanlegierungen tritt SpRK unter Einwirkung Chlor abgebender Medien wie Handschweiß,

dünnsten **Reaktionsschichten mit Fettlösern** („Tri“, „Per“) bei Temperaturen über 450°C auf (Bild 16.2.1.7-8 und Bild 16.2.2.3-15). Zahnräder aus Einsatzstahl können im Brünierbad SpRK erleiden (Bild 16.2.1.8.3-11). Im unteren Rahmen ist der Fall eines nicht stabilisierten Cr-Ni-Stahls dargestellt, bei dem der Bereich der Wärmeeinflusszone einer Schweißnaht **sensibilisiert** ist. Es handelt sich um eine

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Der vom Kugelstrahlen erzeugte Schwingfestigkeitsanstieg hängt von Dicke und Belastungsart des Querschnitts ab.

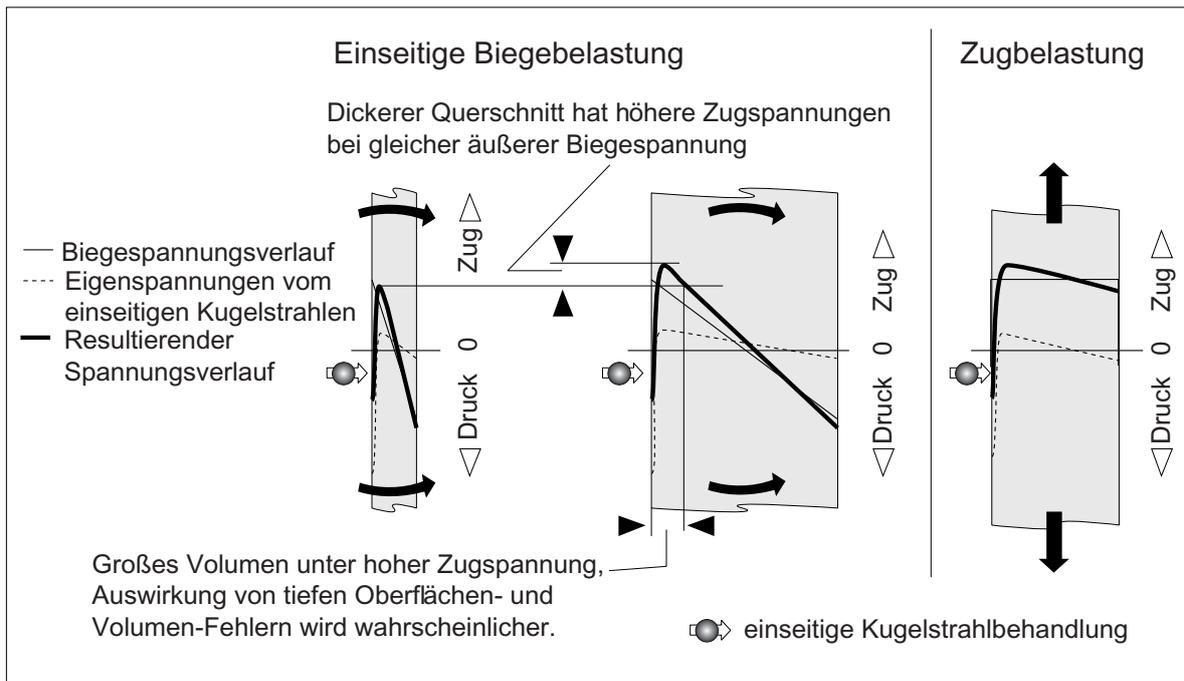


Bild 16.2.1.6-7

Verarmung des schützenden Cr-Gehalts als Folge einer **Karbidbildung auf den Korngrenzen**. Damit werden die Korngrenzenbereiche für interkristalline Korrosion (IK) unter Einwirkung von Säuren empfindlich (Detail rechts).

Erfolgt vor dem Schweißen ein **Kugelstrahlen**, werden die Korngrenzen in Oberflächennähe von der Kaltverformung (Gleitungen, Zwillingsbildung) unterbrochen und **im Korn** Keime für eine Karbidbildung geschaffen. Somit stehen an der Oberfläche keine durchgehenden Korngrenzen für eine Cr-Verarmung zur Verfügung (Detail links, Lit. 16.2.1.6-5).

Inwieweit dieser Schutzeffekt auch an Schweißungen, die nachträglich kugelgestrahlt wurden, allein infolge einer Unterbrechung bereits sensibilisierter Korngrenzen auftritt, ist der vorliegenden Literatur nicht zu entnehmen.

Bild 16.2.1.6-7: Der positive Einfluss des Kugelstrahlens auf die **Schwingfestigkeit** ist bei **dünnen biegebeanspruchten Querschnitten** deutlich ausgeprägter als an dicken oder zugbeanspruchten.

Je kleiner der Spannungsgradient (flacher Verlauf), umso höher sind die Spannungen im Volumen, verglichen mit der Oberfläche. Damit liegen bei dicken Querschnitten unter der Oberfläche noch verhältnismäßig höhere Zugspannungen vor als in dünneren. In diesem Fall besteht die Gefahr von Ermüdungsanrissen unterhalb der Oberfläche. **Dickwandige oder/und gleichmäßig zugbeanspruchte** Bauteile aus Werkstoffen mit Volumenfehlern (Guss) lassen deshalb **kaum eine Steigerung der Schwingfestigkeit durch Kugelstrahlen** erwarten.

Kugelstrahlen schwächt den schädigenden Einfluss des Frettings auf die Schwingfestigkeit. Wahrscheinlich spielt neben Druckspannungen und Verfestigung auch die Oberflächentopografie eine wichtige Rolle.

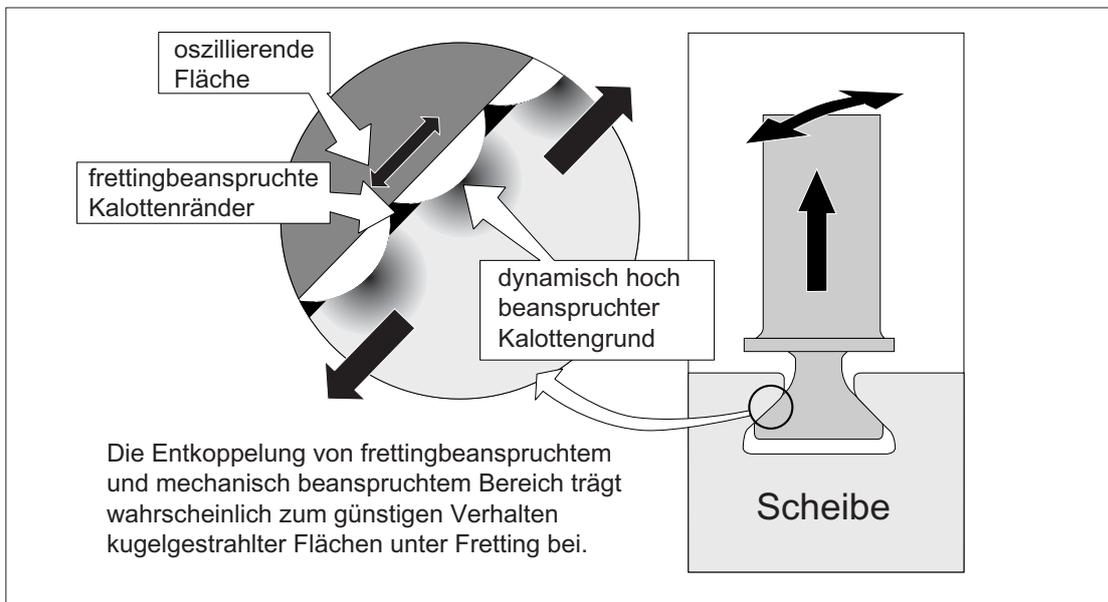
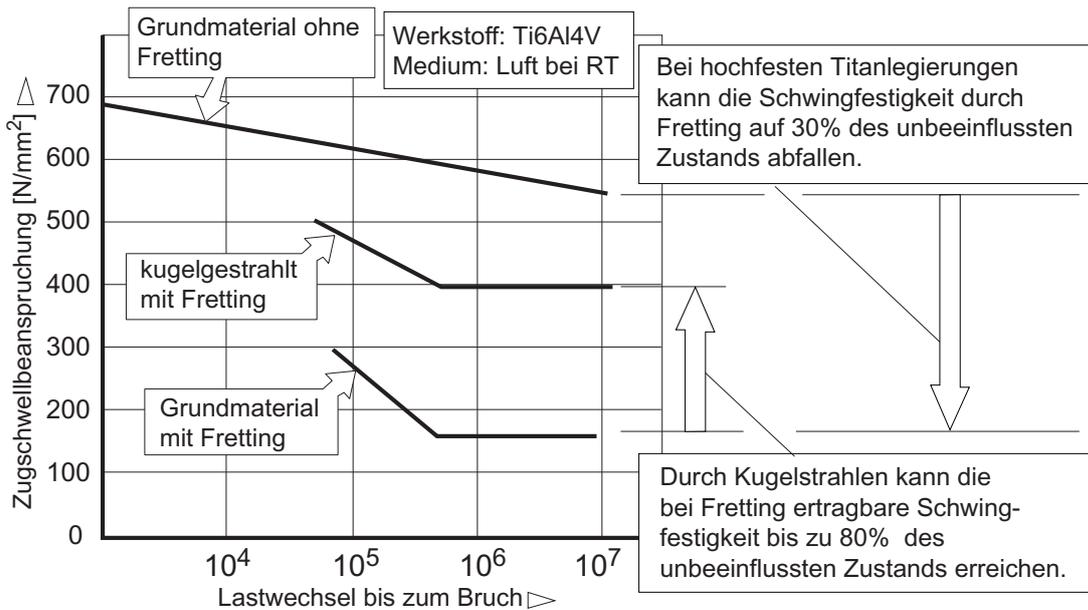


Bild 16.2.1.6-8

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Bild 16.2.1.6-8: Mikrorelativbewegungen führen zu **Schwingverschleiß (Fretting)** und damit auch zu einer werkstoffspezifischen Schädigung der Oberfläche, die sich in einem **Schwingfestigkeitsabfall** ausdrückt. Dieser Effekt ist bei hochfesten Titanlegierungen besonders ausgeprägt (Diagramm oben). Mit einem Schwingfestigkeitsabfall auf ca 30 % des unbeeinflussten Grundwerkstoffs ist zu rechnen. **Kugelgestrahlte Kontaktflächen** zeigen dagegen unter Frettingbeanspruchung eine Schwingfestigkeit von ca. 80% des Grundwerkstoffs. Aus diesem Grund werden Schaufelfüße in Turbine und Verdichter, insbesondere von Verdichterschaufeln aus Titanlegierungen (Band 2, Bild 6.1-19) kugelgestrahlt. Diese **Strahlbehandlung muss in regelmäßigen Abständen**, abhängig von Bauteiltemperatur und Werkstoffwiederholt werden, um den nachlassenden Schutzeffekt (Kriechen, Bild 16.2.1.6-9 und Verschleiß) zu regenerieren.

Die günstige Beeinflussung der Schwingfestigkeit frettingbeanspruchter Oberflächen mit Kugelstrahlen wird zum überwiegenden Teil auf die induzierten **Druckeigenspannungen** und die **Verfestigung** zurückgeführt. Dabei kann der Anteil beider Einflüsse werkstoffabhängig sehr unterschiedlich sein. So lassen sich jedoch nicht alle beobachteten Effekte frettingbeanspruchter Kontaktflächen befriedigend erklären.

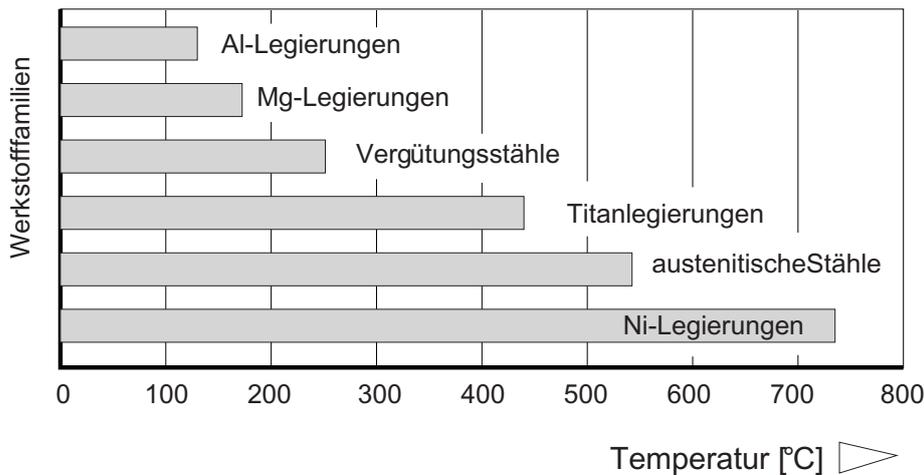
Offenbar ist auch die **Topografie der Kontaktflächen für das Frettingverhalten von Bedeutung**. Zum einen können sich in den kalottenartigen Vertiefungen **Gleitlacke** gut halten, zum anderen auch reibungserhöhende **Abriebprodukte** (Oxide) die aus den Berührungszonen transportiert werden.

Ein weiterer Effekt dürfte mit der Trennung örtlicher Kontaktflächen an den Kalottenrändern vom mechanisch höher beanspruchten Kalottengrund in Zusammenhang stehen (Skizzen unten). So wirkt eine Frettingschädigung nicht an höchstbeanspruchten Mikrobereichen (Detail). Von der Elastizität der dünnen Kalottenränder ist darüber hinaus eine

gleichmäßigere Verteilung und Übertragung der Reibungskräfte zu erwarten. Je nach Einfluss der Topografie ist davon auszugehen, dass es bei frettingbeanspruchten Kontaktflächen auch auf eine **Optimierung der Kugeldurchmesser und Strahlwinkel** ankommt und nicht nur auf die Almenintensität. Die Nutzung eines solchen Verhaltens dürfte jedoch Grundlagenarbeit und gegebenenfalls betriebsrelevante Versuche voraussetzen.

Bei erhöhten Temperaturen führt Kriechen zu Relaxation der Eigenspannungen und schränkt die Anwendung des Kugelstrahlens ein.

Temperaturbereich der sinnvollen Anwendung von Verfestigungsverfahren wie Kugelstrahlen für verschiedene Werkstoffgruppen.



Rückgang der Durchbiegung mit Glasperlen gestrahlter Blechstreifen als Indiz für die Relaxation gestrahlter Verdichterschaufeln.

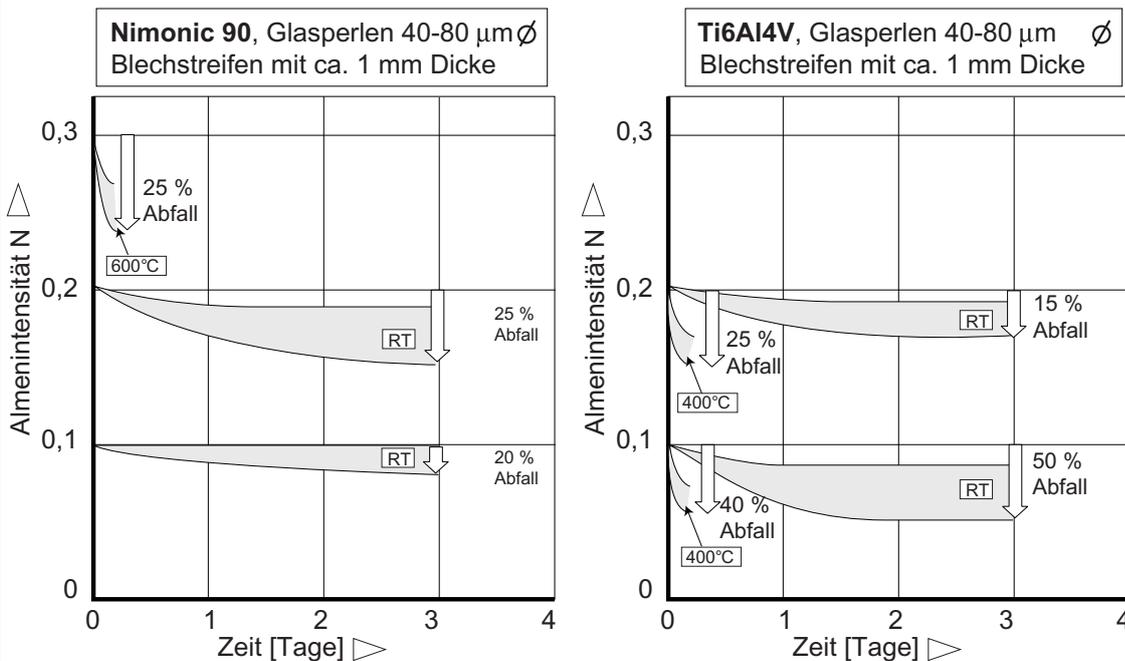


Bild 16.2.1.6-9

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Bild 16.2.1.6-9: Kugelstrahlen lässt sich bei allen metallischen Werkstoffen in Verdichter und Turbine anwenden. Die **Wirksamkeit des Verfahrens** ist jedoch von der **Werkstofffestigkeit** und dem **Verfestigungsverhalten** abhängig. Dies gilt für die erzielbare Verfestigung, die Größe der Druckspannungen und deren Tiefe. Sie wirken sich besonders auf eine Schwingfestigkeitserhöhung und deren Nutzung aus. Diese Eigenschaften müssen natürlich auch bei **erhöhten Betriebstemperaturen** in ausreichendem Maß erhalten bleiben. Wenn Betriebstemperaturen ein merklich spannungsabbauendes Kriechen ermöglichen, ist eine dauerhafte Verbesserung der Schwingfestigkeit mit Kugelstrahlen nicht zu erwarten. Die Grenztemperaturen für die häufigsten Werkstofffamilien zeigt das Schaubild oben. Kriechen führt zur Relaxation (Bild 16.2.2.4-15.1) der Druckeigenstressungen und so zu einem Abbau des Strahleffektes (vergleiche hierzu den Abschnitt „Nachbehandlung“ in der Beschreibung zu Bild 16.2.1.6-3). Aus diesem Grund muss der Strahlprozess im **Rahmen einer Überholung in bauteilspezifischen regelmäßigen Abständen wiederholt** werden (**Regeneration**). Ab welchen Betriebstemperaturen mit einem solchen Kriecheffekt zu rechnen ist, zeigt das Schaubild oben (Lit. 16.2.1.6-5).

Besonders an Ti-Legierungen ist eine merkliche **Relaxation während mehrerer Tage bei Umgebungstemperatur** im Anschluss an die Strahlbehandlung beobachtet worden (Diagramm unten rechts). Dies erfolgte damit bereits unter den möglichen Betriebstemperaturen von ca. 450 °C.

Bei 400 °C ist ein deutlicher Abfall der Durchbiegung bzw. der Eigenstressungen zu beobachten. Ein Ende dieser Relaxation zeigt das Diagramm für die kurze Prüfzeit noch nicht. Bereits bei Raumtemperatur wird ein Zurückgehen der Durchbiegung von Blechplättchen aus der Ti-Legierung Ti6Al4V festgestellt. Dieser Abfall stabilisierte sich jedoch nach ca. einem Tag auf hohem Niveau, sodass ausreichende Druckspannungen verbleiben.

Einen ähnlichen Effekt zeigen auch Ni-Basis-Schmiedelegerungen (Diagramm unten links). Inwieweit dieser Effekt bereits die Schwingfestigkeit beeinflusst, ist nicht klar.

Die maximal erzielbaren Druckeigenstressungen und entsprechende Schwingfestigkeitssteigerungen sind für **Stähle** sehr ausgeprägt von deren Festigkeit bzw. Härte abhängig. Das **Verbesserungspotenzial steigt mit der Härte des Grundwerkstoffs**. Eine geringere Zähigkeit härterer Werkstoffe macht sich hier offenbar nicht negativ bemerkbar. So lassen sich z.B. an **Stahlfedern** oder **einsatzgehärteten Bauteilen** (Zahnradern) besonders große Verbesserungen der Schwingfestigkeit erzielen.

Kugelstrahlen lässt sich auch als Prüfverfahren nutzen.

Das Kugelstrahlen zeigt harte Flecken auf Grund einer durchschlagenen Abdeckung beim Einsetzen des Zahnrades.

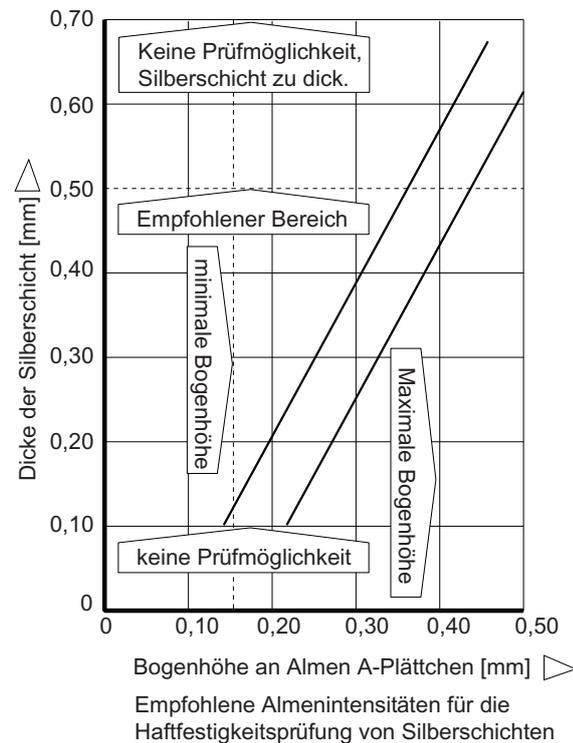
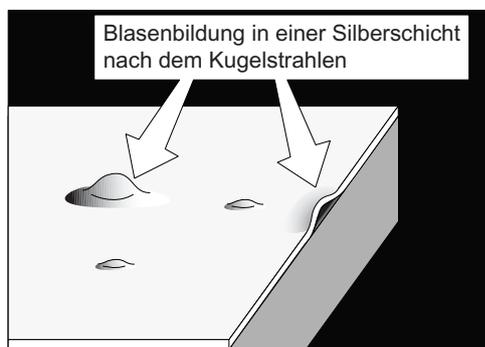
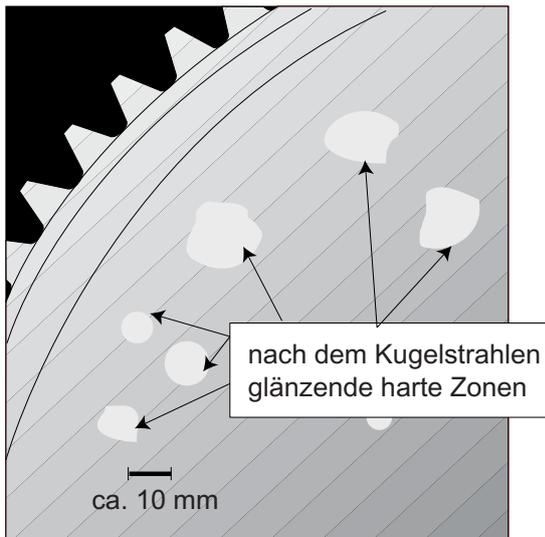


Bild 16.2.1.6-10

Bild 16.2.1.6-10: Kugelstrahlen lässt sich auch zur **Qualitätsprüfung** nutzen. Diese Möglichkeit besteht als Nebeneffekt einer ohnedies vorgesehenen Kugelstrahlbehandlung. Hierzu gehört die zerstörungsfreie Prüfung von Bauteilen auf **örtliche Härteunterschiede**. Das Bild oben links zeigt ein Zahnrad mit einer Einsatzhärtung der Verzahnung, nicht aber der Radmembrane. Im dargestellten Fall schlug die Schicht örtlich durch die Abdeckung und es kam zu **Aufhärtungen**. Diese zeichneten sich nach der aus Festigkeitsgründen und zum Schutz vor Brünierrissen (Bild 16.2.1.6-6) vorgesehenen

Kugelstrahlbehandlung, deutlich als **hell glänzende Flecken** ab (Bild oben).

Die **Haftfestigkeit** relativ weicher und zäher **Silberschichten** lässt sich mit **Glasperlenstrahlen** (Diagramm) prüfen. Induzierte Druckspannungen führen in **Zonen schlechter Haftung zu einem blasenartigen Abheben** (Bild unten). Dieses Verfahren ist deshalb besonders interessant, weil es kaum ein seriengeeignetes Verfahren gibt, derartige „Klebestellen“ sicher nachzuweisen.

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Bild 16.2.1.6-11: Das Kugelstrahlen ist ein Verfahren zur **Schadensverhütung und Fehlerbeseitigung**. Bei unsachgemäßer Anwendung und schlechter Durchführung gibt es aber eine größere Zahl typischer **Fehler und Schäden** an Bauteilen als Folge des Kugelstrahlens.

- **Zu niedrige Intensität:** Typische Ursachen sind falsche Strahlzeiten, fehlerhaft arbeitende Anlagen und Strahlmittel die sich während der Strahlzeit verändern.

Eine **ungünstige Plättchenposition** kann bei der versuchstechnischen Ermittlung der optimalen Strahlzeiten für **Abweichungen der Strahlintensität gegenüber dem Bauteil** verantwortlich sein. Weiter besteht die Gefahr, dass Intensitätsabweichungen im Serienprozess nicht (rechtzeitig) erkannt werden und betroffene Teile verbaut werden.

Zu scharfkantiges Strahlmittel: Die Ursache für scharfkantiges Strahlmittel kann bereits beim Lieferanten liegen. Hierzu gehören spitze Gusskugeln oder zum Bruch neigende Hohlkugeln aus Stahlguss. Beim Strahlvorgang kann Bruch scharfe Strahlgutkanten entstehen lassen die Kerben erzeugen, von denen im Betrieb Schwingrisse ausgehen.

- **Strahlbehandlung ungeeigneter Werkstoffe oder Werkstoffzustände.** Hierzu gehört das Strahlen spröder Schichten die zum Ausbrechen neigen. Werden **Einkristalle** kugelgestrahlt oder sehr intensiv abrasiv gestrahlt, kann die plastische Verformung bei ausreichend hohen Glühtemperaturen eine Rekristallisation auslösen (Bild 15.2-4).

- **Bauteil überstrahlt.** Es entstehen rissartige Überlappungen, sog. „**Peened Surface Extrusion Folds**“ (=PSEF, Bild 16.2.1.6-14 und Bild 16.2.1.6-15), mögliche Ursache für einen merklichen Schwingfestigkeitsabfall.

- **Grate an Ecken und Kanten** des Bauteils durch ungünstige Strahlbedingungen an scharfen Kanten (Bild 16.2.2.2-6). Hierzu gehört eine Besonderheit die mit „**Elephant Tail**“ bildhaft

gekennzeichnet ist. Besonders häufig tritt die **Gratbildung** an Teilen auf, die an winkelig zulaufenden Flächen gestrahlt werden müssen. Erfahrungsgemäß treten solche, besonders gefährliche Schäden an Kanten des Kranzbereichs am Übergang der Schaufelaufnahmen von Rotorscheiben auf (mittlerer Rahmen).

- Überlappungen und Risse durch „**Schrägstrahlen**“ (Bild 16.2.1.6-14 und Bild 16.2.1.4-15).

- Eine **ungünstige Oberflächenstruktur des Bauteils vor dem Strahlen** kann Ursache für Überlappungen (Umbiegen großer Rauigkeitsspitzen) und ungestrahlte Kerbbereiche zwischen Rauigkeitsspitzen sein.

- **Ungleichmäßiges Strahlbild** durch schlechte Abstimmung von Bauteil und Strahldüsenbewegung (Bild 16.2.1.6-4),

- **Ungenügender Bedeckungsgrad** (Bild 16.2.1.6-4) bietet keinen ausreichenden Schutz gegen Spannungsrisskorrosion (Band 1, Bild 5.4.2.2-4, Bild 16.2.2.4-12),

- **Verzug** von Bauteilen, insbesondere **Schaufelprofilen** und **dünnwandigen Gehäusen** beim Strahlvorgang oder durch Relaxation nach dem Strahlen. Deformation filigraner Bauteilzonen wie Kanten von Verdichterschaufeln („**Rollover**“, Skizze oben rechts, Bild 16.2.1.6-19)

- **Büchsendeckeleffekt:** „Schnappen“ flächiger Teile, z. B. dünnwandiger Verdichterscheiben, (Bild 16.2.2.4-12),

- **Zugspannungserhöhung in Querschnitten unterhalb der Strahlzone** (Bild 16.2.1.6-7) kann sich besonders ungünstig bei reiner dynamischer Zugbeanspruchung auswirken (kleiner Spannungsgradient). Es erhöht sich die Gefahr der Entstehung von **Ermüdungsrisse** unter der Oberfläche.

- **Fremdmaterial durch Abrieb** (z. B. **Blei**) im **Strahlgut** kann auf Strahlflächen gelangen und dort bei nachfolgenden Fertigungsprozessen (Bild 16.2.2.3-11) oder im Betrieb zu Rissbildung (LME) führen (Bild 16.2.2.3-1).

Aufgeschmiertes Fremdmaterial kann auch infolge Elementbildung direkt oder über an-

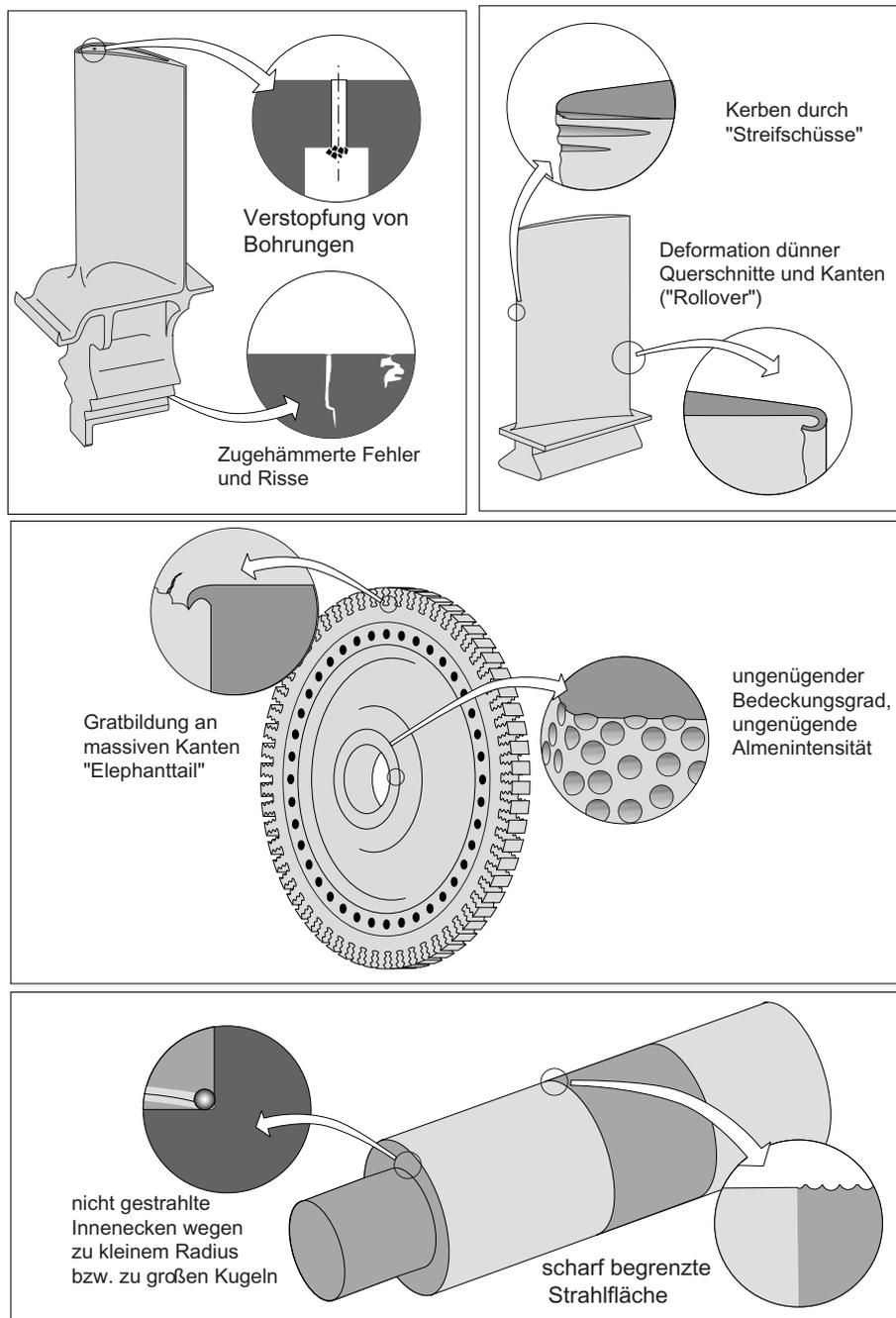


Bild 16.2.1.6-11
(beide Seiten)

legierte Gefügebestandteile Korrosion auslösen. Ein Beispiel ist **Fe-Abrieb des Strahlgutes auf Cr-Ni-Stählen**.

Ein weiteres Beispiel sind **Titanlegierungen**, die im Bereich von Schweißnähten mit **Fe-Abrieb korrosionsempfindliche Legierungen** bilden (Bild 16.2.1.3-19). Solche Gefügeveränderungen können auch **Warmrisse** begünstigen.

- Verschmutzungen durch **Öl oder Kondenswasser im fördernden Luftstrahl**. Das Wasser

kann während einer Zwischenlagerung bis zum nächsten Prozessschritt Korrosion auslösen. Verbliebene Ölrückstände können nachfolgende Prozesse (z. B. Beschichtungen) behindern.

- **Unzulässige große Rauigkeiten** an umströmten Flächen, z. B. bei gebrochenem Strahlgut.
- **Beschädigung von Gewinden** und ähnlichen profilierten bzw. filigranen Bauteilbereichen als Folge **ungeeigneter Abdeckvorrichtungen**.

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Fehler und unerwünschte Effekte des Kugelstrahlens.

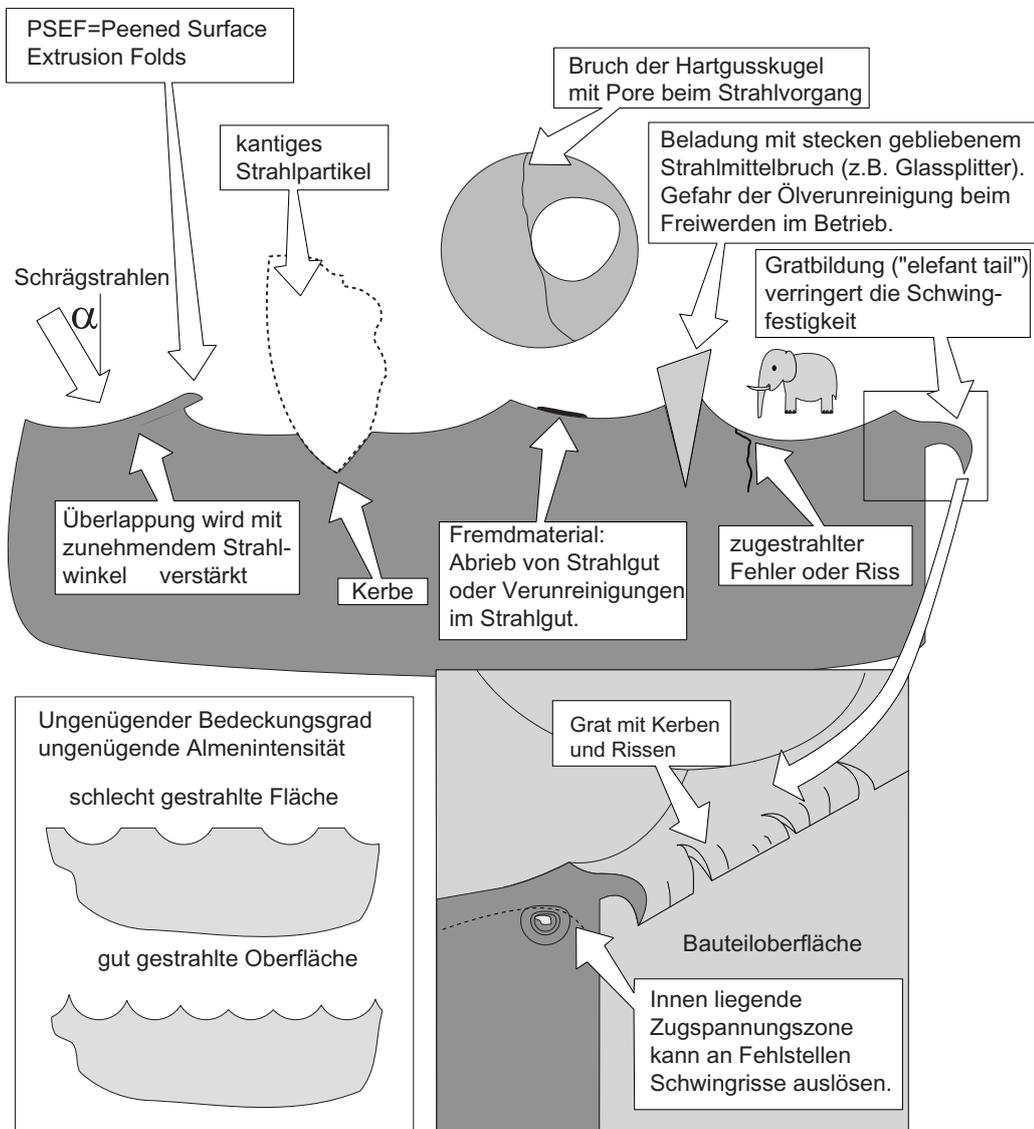


Bild 16.2.1.6-11
(beide Seiten)

- **Strahlmittelrückstände** aus Bruchkugeln (aus dem Beladungseffekt, Bild 16.2.1.6-17) als Ursache von **Schäden im Ölkreislauf** (z. B. Lager, Ventile).
- **Zustrahlen von Rissen und Fehlern** (Skizze oben). Bei anschließender **Eindringprüfung** sind solche **Fehlstellen** schlecht auffindbar.
- **Staubexplosion in Strahlkabinen** (ohne Nassabsaugung) durch **Metallabrieb** (Mg, Ti),

- **Unzulässig großer Abtrag an Passflächen** (Bild 16.2.1.6-12).

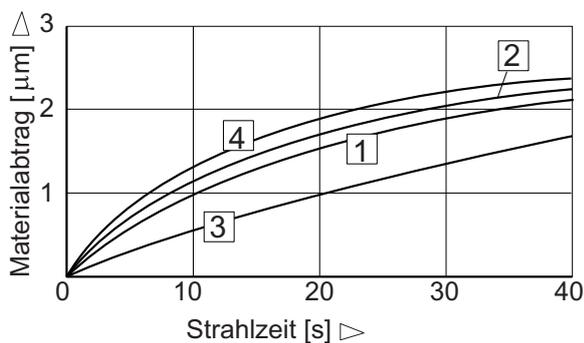
Ein Problem im Zusammenhang mit allen Strahlverfahren ist die **Verstopfung bzw. der Verbleib von Strahlgut in Hohlräumen**. Dies kann bei Heiteilen zur **Überhitzung** führen (siehe auch Bild 16.2.1.6-18). **Reaktives Strahlgut** kann bei hohen Temperaturen den Grundwerkstoff oder Beschichtungen schädigen oder

Auch Verfestigungsstrahlverfahren können messbar abtragen.

Materialabtrag bei verschiedenen Strahlverfahren:

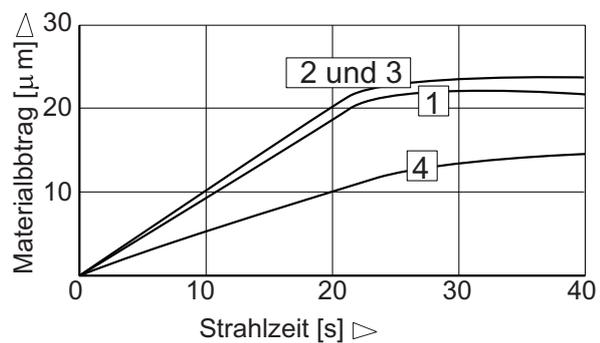
Nassstrahlen mit Glasperlen

Korngröße 150-100 mesh
Düsenabstand: 15 cm
Strahldruck: 5 bar



Strahlen mit kantigem Stahlkies

Korngröße 18-24 mesh
Düsenabstand: 15 cm
Strahldruck: 2 bar



Werkstoffe: "1" (A 286) hochlegierter aushärtbarer Stahl
"2" 13% Cr-Stahl weichgeglüht
"3" Vergütungsstahl normalgeglüht
"4" CrNi18 9 Stahl

Bild 16.2.1.6-12

Hochtemperaturkorrosion begünstigen. Gelingt Strahlgut in den Öl- oder Kraftstoffkreislauf besteht die Gefahr umfangreicher Betriebsschäden.

Bild 16.2.1.6-12: Auch **Verfestigungsstrahlen**, insbesondere mit kantigem **Stahlkies** (Diagramm rechts), bewirkt einen merklichen **Materialabtrag**. Der Abtrag beim Glasperlenstrahlen liegt dagegen im μ -Bereich und dürfte selbst bei engen Toleranzen akzeptabel sein. Es ist denkbar, dass eine deutlich **erhöhte Rauigkeit** der Strahlfläche zu einem **scheinbaren Wachstum** führt. Ein gewisses Setzen ist dann unter Kontaktkräften von Montage oder Betrieb nicht auszuschließen.

Schrägstrahlen kann den gewünschten Strahleffekt deutlich abschwächen, es kann sogar schädigen.

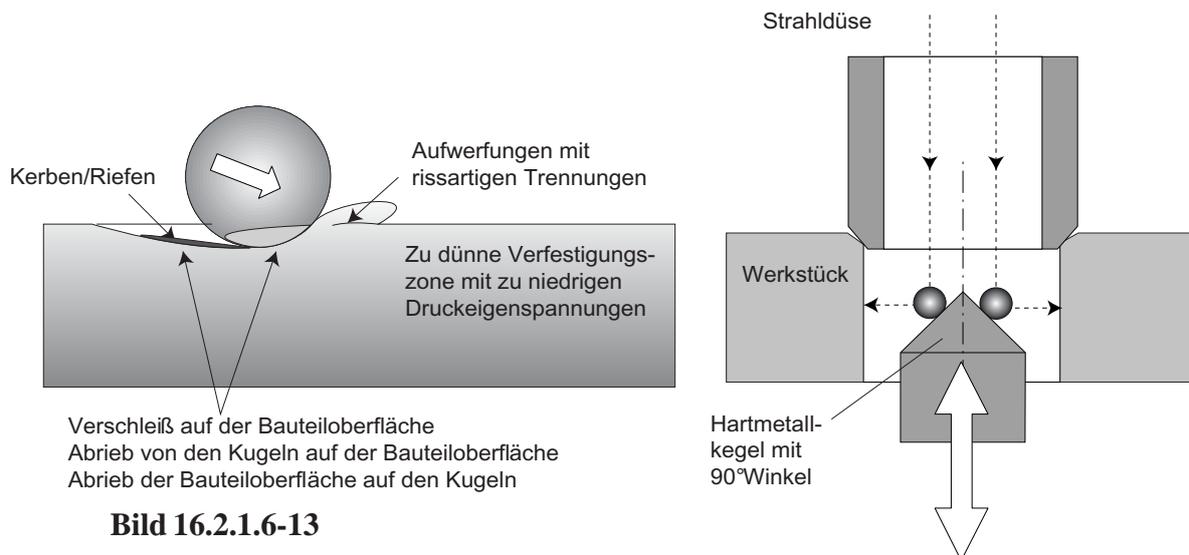
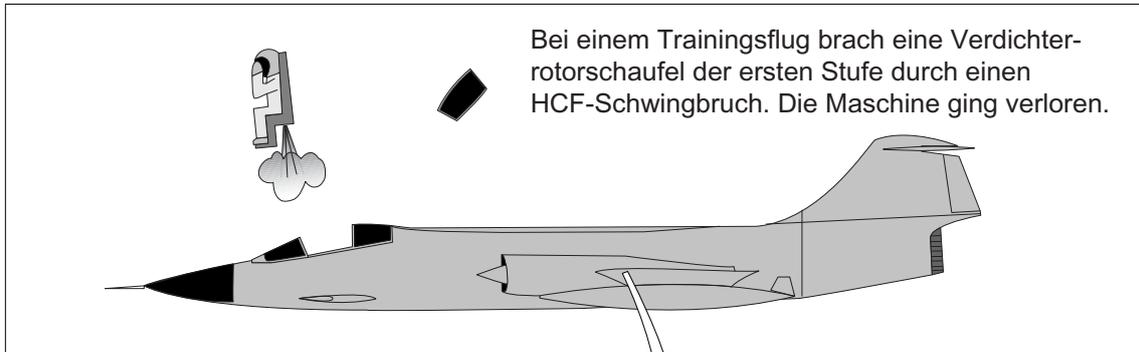


Bild 16.2.1.6-13: Für eine **maximale Strahlintensität** ist der **90° Strahlwinkel**, d. h. senkrechtetes Auftreffen der Strahlpartikel optimal. So wirkt der größte Impuls. Diese Bedingung ist jedoch nicht immer erreichbar. Besonders wenn die geometrischen Bauteilgegebenheiten eine entsprechende Düsenstellung verhindern. Je schräger das Strahlmittel auftrifft, umso größer ist ein beim Kugelstrahlen unerwünschter Abtrag. Zusätzlich muss mit Überlappungen im Mikrobereich gerechnet werden (Skizze links). Diese können sich rissartig auswirken und die Bauteilsicherheit gefährden (siehe auch Bild 16.2.1.6-14 und Bild 16.2.1.5-15).

Die Intensität nimmt mit dem Sinus des Einfallwinkels ab. Ein nahezu senkrechtetes Auftreffen des Strahlmittels läßt sich an schlecht zugänglichen Bauteilflächen in vielen Fällen dadurch erreichen, dass man **Prallkörper aus Hartmetall** geeignet anordnet (Lit. 16.2.3.6-1). Die Strahlpartikel werden von einer schräg zur Düsenachse verlaufenden Prallfläche auf die Strahlfläche gelenkt (Skizze rechts). Ein typisches Beispiel hierfür ist die Verwendung eines

kegeligen Stifts aus Wolframkarbid (WC) um Bohrungswände zu strahlen. Wird die Ablenkfläche gleich in die Strahldüse integriert, erhält man eine **Winkeldüse** mit ähnlicher Wirkung.

Auch für das Kugelstrahlen gilt: "Zuviel des Guten kann schädlich sein."



Triebwerksschnitt ohne Nachbrenner dargestellt

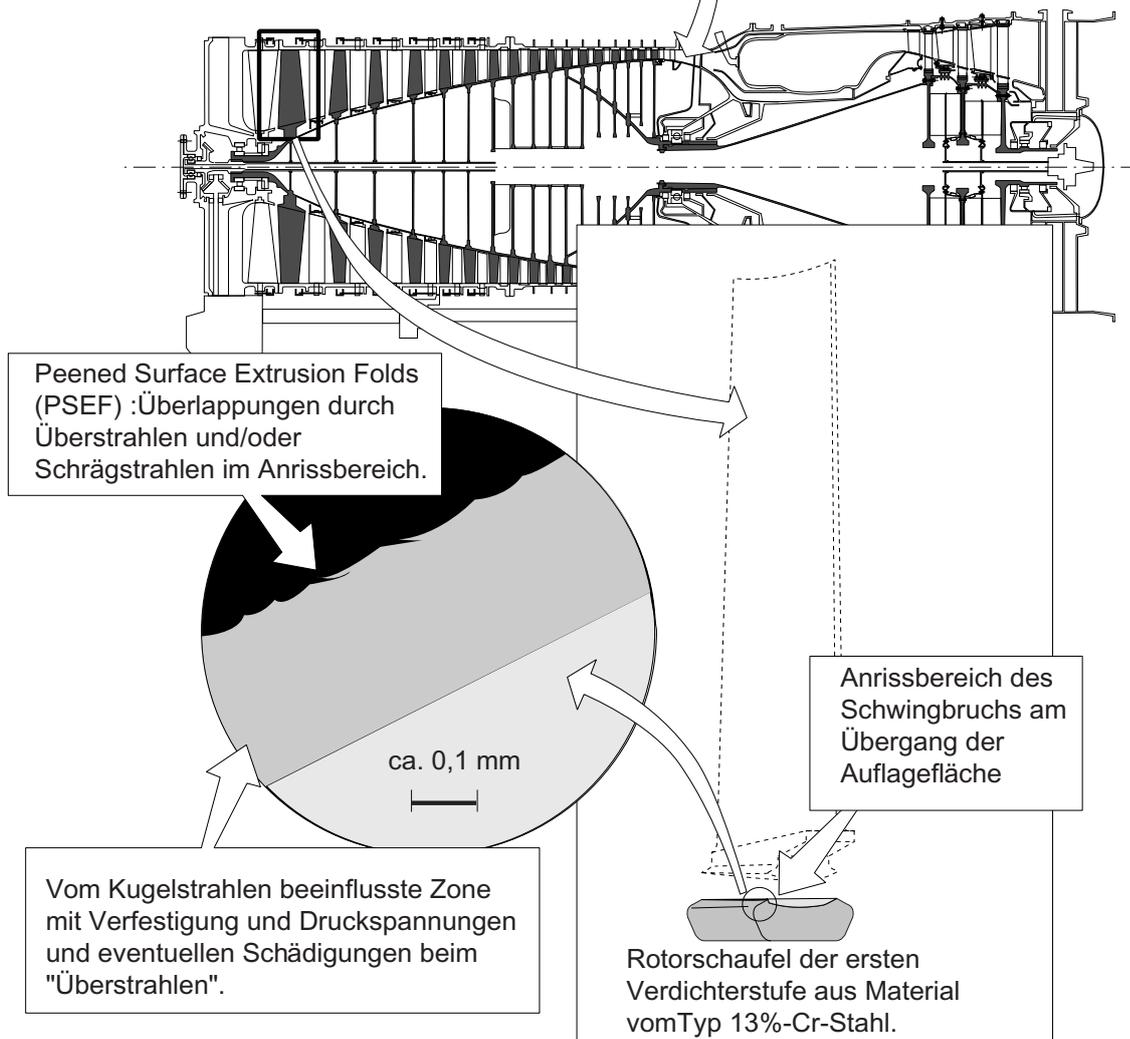


Bild 16.2.1.6-14

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Bild 16.2.1.6-14: Dieses Beispiel zeigt den Fall des **Bruchs einer vorderen Verdichtertorrotorschaukel**, was zum Absturz führte. Der den Bruch auslösende **Schwingriss in der Auflagefläche des Schaufelfußes** (Skizze unten rechts) wurde offenbar von einer **unzureichenden Kugelstrahlbehandlung** begünstigt. Ein metallografischer Schliff (Detail) ließ Anzeichen für „**Peened Surface Extrusion Folds**“ (= **PSEF**, Lit. 16.2.1.6-6) erkennen. Derartige Fehlstellen sind ein Merkmal ungünstiger Strahlbedingungen und können die Schwingfestigkeit beeinträchtigen (Bild 16.2.1.6-15).

Bild 16.2.1.6-15 (Lit. 16.2.1.6-6): Wenige Minuten nach dem Start kam es zu dem dargestellten Triebwerksschaden mit **austretenden Bruchstücken** (Skizze oben).

Die nachträgliche Untersuchung des betroffenen Triebwerks zeigte, dass, neben umfangreichen Durchschlagsschäden an den Turbinengehäusen, die Niederdruckwelle gebrochen war

und die Gehäuse sich axial um Zentimeter getrennt hatten. Die erste Stufe des **Hochdruckturbinenrotors** (HPT1, mittlere Skizze) zeigte einen Haircut. Ein großes Kranzsegment der Scheibe das ca. 14 Schaufelnuten enthielt, fehlte (Skizze unten links). Die temperaturbedingten Verfärbungen zeigten, dass es sich offenbar nicht um einen Folgeschaden handelte. Zwei weitere Schaufelnuten am verbliebenen Kranz wiesen im Grund radiale Risse auf. Einer war bereits ca. 25 mm bis zwischen die Verstärkungen um die Bohrungen fortgeschritten.

Die Oxidation der Bruchfläche zeigte, dass der zum Bruch führende Anriss ebenfalls an der Kante einer Scheibennut lag.

Die Oberfläche im Bruchausgang wies das typische Kugelstrahlaussehen auf. Um die gesamte Kante herum waren **flache überlappungsartige ca. 25 µm tiefe Fehlstellen** zu erkennen (siehe auch Bild 16.2.1.6-14). Diese sind in Fachkreisen als „**Peened Surface Extrusion Folds**“ (= **PSEF**) bekannt. Solche Fehlstellen weisen auf eine **sehr hohe Strahlintensität und zu flachen Strahlwinkel** hin. Die Erfahrung zeigt, dass die **höchsten Schwingfestigkeiten an den meisten Werkstoffen mit moderaten Strahlintensitäten erzielt werden, die keine Überlappungen entstehen lassen**. Von den PSEF ging ein, für den Scheibenwerkstoff (Ni-Basis Schmiedelegierung IN 718) typischer interkristalliner LCF-Riss aus, der von Zonen mit Gewaltbruchmerkmalen unterbrochen war. PSEF's wurden auch im Ausgangsbereich der anderen Risse gefunden. Der unerwartet gravierende Einfluss der PSE kann auch im Zusammenhang mit einem **flachen Gradienten** der Tangentialspannung gesehen werden (Bild 16.2.2.4-9.3. Eine hohe Strahlintensität, d.h. eine ausgeprägte Druckspannungszone um die **Kante**, dürfte entsprechende Zugeigenspannungen unter der Oberfläche induzieren. Diese überlagern sich den Zugspannungen aus den Betriebslasten. Steigt so die Mittelspannung deutlich an, ist mit einer Abnahme der LCF-Festigkeit zu rechnen. Frühere Scheiben-

Es gibt Hinweise, dass auch Kugelstrahlen gefährlich schädigen kann: "Peened Surface Extrusion Folds".

Etwa 6 Minuten nach dem Start hörte die Besatzung während des Steigflugs einen lauten Knall auf der linken Flugzeugseite. Nach der Überprüfung der Anzeigen der Cockpitinstrumente wurde das linke Triebwerk abgestellt. Die Besatzung stellte bereits im Flug schwere Schäden an Zelle und Flügel fest. Das Flugzeug kehrte um und landete, von Rettungskräften und Feuerlöschmannschaft erwartet.

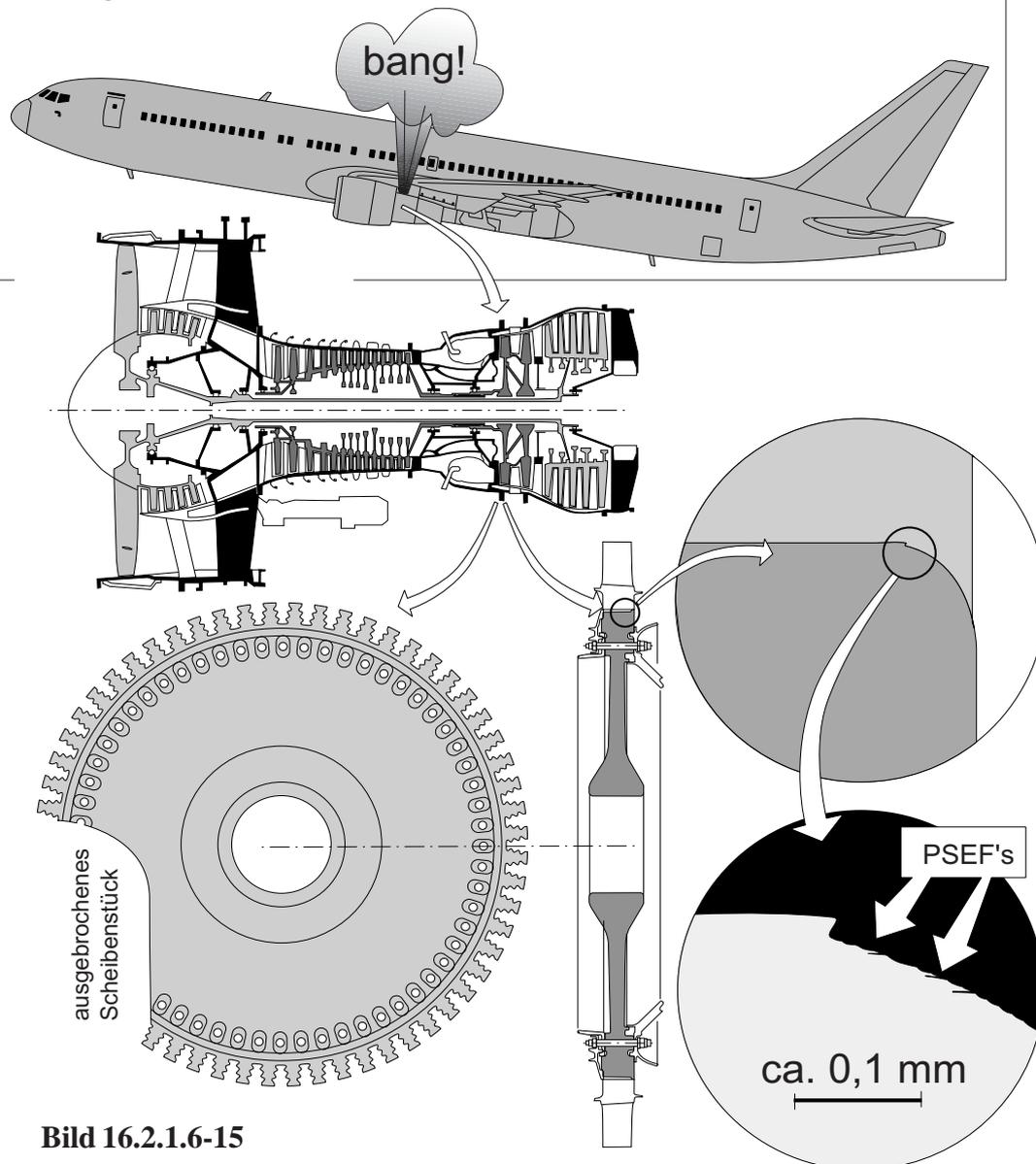


Bild 16.2.1.6-15

schäden, die auf andere Ursachen zurückgeführt wurden zeigen, dass die Scheibenzone im Anrissbereich besonders hohen Betriebsbelastungen unterliegt. Damit wäre auch die katastrophale Auswirkung der relativ kleinen Fehlstellen erklärlich.

Abhilfen gegen Probleme und Schäden beim Kugelstrahlen

Die Gewährleistung einer **reproduzierbaren spezifikationsgerechten Kugelstrahlbehandlung** erfordert die sichere Einhaltung der optimierten Prozessparameter (Prozessstabilität) sowie die Anwendung vorgeschriebener Vorrichtungen und Hilfsmittel (z.B. Abdeckungen). Dies ist umso wichtiger, als das Ergebnis eines Kugelstrahlverfahrens am Bauteil kaum mehr befriedigend sicher zerstörungsfrei überprüfbar ist. Das gilt zumindest für alle, die **LCF lebensdauerbeeinflussenden Oberflächen und hoch HCF beanspruchte Zonen**. Die Strahlqualität muss also mit Hilfe einer Überwachung und Dokumentation des Strahlvorgangs nachprüfbar gewährleistet werden. Diese Forderungen werden deutlich schärfer, sollte die Schwingfestigkeit in die Auslegung der Bauteile eingehen und nicht nur der zusätzlichen Absicherung dienen (Band 3, Bild 14-24). Voraussetzung für eine optimal wirksame Strahlbehandlung ist eine **geeignete konstruktive Gestaltung** der Bauteile.

Nachfolgend sind einige Grundregeln, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, angegeben.

Konstruktion:

- Kugelstrahlen als **absicherndes Verfahren** einsetzen, möglichst nicht in die Festigkeitsauslegung aufnehmen.
- **Optimale Strahlintensität** wählen (Bild 16.2.1.6-16). Im Zweifelsfall mit **bauteilrelevanten Versuchen** ermitteln. Eine **moderate Strahlintensität** gewährleistet bei den meisten Werkstoffen erfahrungsgemäß die **höchste Schwingfestigkeitssteigerung**.
- Vorsicht beim **Strahlen von Kanten**. **PSEF** (Bild 16.2.1.6-14 und Bild 16.2.1.6-15) und **Elefant Tails** (Bild 16.2.1.6-11) sind unbedingt zu vermeiden. Sie entstehen beim **Überstrahlen** und zu **flachen Strahlwinkeln**.
- **Zugänglichkeit zu schrägen Flächen** (Schaufelnuten in Scheiben), Bohrungen (Bild 16.2.1.6-13), engen Radien gewährleisten. Gegebenenfalls den Strahlkorndurchmesser geeignet wählen.
- Die Arbeitsfolgen so wählen, dass die gestrahlten Flächen nicht **auf zu hohe Temperaturen erwärmt** werden. Das kann z.B. beim Schweißen, einer Wärmebehandlung oder einer Beschichtung (Bild 16.2.1.6-9) auftreten.
- Keine beschichteten Flächen strahlen, die von Effekten wie **Ausplatzen oder geringstem Abtrag** geschädigt werden können.
- Falls im Betrieb/Überholung eine Regeneration mit **erneutem Kugelstrahlen** notwendig ist, muss diese gewährleistet sein.

Strahlverfahren:

- Prüfung des Strahlmittels **beim Eingang** und ständige **Kontrolle beim Strahlprozess** (z. B. Rundheit, Bruchanteil).
- Kontinuierliches **Aussortieren von Strahlgutbruch**.
- Prüfung des Strahlmittels auf Verunreinigungen mit einem Korrosionstest an einem gestrahlten Testblech.
- Optimierung und Erprobung des Strahlprozesses.
- Überwachung des Strahlvorganges während des Strahlprozesses. **Anbringung des Almenplättchens** an aussagekräftiger, bauteilrelevanter Position.

- **Kontrolle der gestrahlten Fläche** durch mikroskopische Untersuchung (REM) von Kunststoffabdrücken.
- Serienrelevante Erprobung der Strahlvorrichtungen und Abdeckungen.
- **Nachweis des Kugelstrahleffektes** in betriebsnahen **Bauteilversuchen** und im **Triebwerksbetrieb**. Hierbei sind besonders die **Bauteiltemperaturen** im Hinblick auf einen möglichen **Abbau des Strahleffektes** durch Relaxation, zu berücksichtigen,
- **Glättung gestrahlter Flächen** auch durch „geeignete“ **abrasive Verfahren** nach Möglichkeit **vermeiden**.
- **Keine scharfe Begrenzung der Strahlfläche** sondern gleichmäßiger Übergang (Bild 16.2.1.6-11).
- **Keine scharfen Kanten strahlen**. Kanten gut anfasen oder abrunden. Überprüfung der gestrahlten Werkstücke auf PSEF und Elephant Tails.
- **Abdecken empfindlicher Bereiche** und **verstopfungsgefährdeter Hohlräume** mit geeigneten Abdeckvorrichtungen oder Abdeckmaterial. Verunreinigung des Strahlgutes mit Abrieb der Abdeckungen vermeiden. **Ungeeignet ist z. B. Bleiband**, da Bleirückstände auf Heißeilen katastrophale Schädigungen erzeugen können (Bild 16.2.2.3-10.2).
- **Optimaler Oberflächenzustand** vor dem Strahlen (z. B. keine Korrosion oder tiefe Bearbeitungsriefen).
- **Nicht verschiedene Werkstofftypen** (z.B. Ni-Legierungen und Stähle) in der gleichen Maschine mit der gleichen Strahlgutfüllung bearbeiten. Es besteht die Gefahr der Materialübertragung (Korrosion).
- **Kugelstrahlen als letzten Verfahrensschritt** bei der Fertigung anstreben.
- Nach dem Strahlen **Teile trocknen, nicht unkonserviert lagern**.
- Vorsicht bei der Möglichkeit, dass **brennbare bzw. explosive Stäube** entstehen. (Al, Mg, Ti). Diese Gefahr besteht eher beim abrasiven Strahlen. Gegebenenfalls Nassstrahlen.

Bild 16.2.1.6-16 (Lit. 16.2.1.6-1): Kugelstrahlen als kontrolliertes Bearbeitungsverfahren erfordert Angaben (Zeichnung, Spezifikationen, Arbeitsplan) zur Almenintensität. Dies ist eine Voraussetzung um ein gewünschtes Betriebsverhalten des Bauteils zu gewährleisten.

Eine Strahlbehandlung sollte zumindest durch folgende Angaben festgeschrieben sein:

- *Eindeutige Bezeichnung der zu strahlenden Flächen,*
- *Almenintensität,*
- *Strahlmittel,*
- *Kugelgröße,*
- *Bedeckung in %.*
- *gegebenenfalls Vorrichtungen und Abdeckungen*

Es ist zu prüfen, inwieweit diese Angaben bei sicherheitsrelevanten Teilen vom OEM und/oder zuständigen Behörden, zugelassen werden müssen.

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Üblicherweise angewandte Almenintensitäten

Werkstoff	Strahlmittel	Materialdicke [mm]	Almenintensität
Stahl mit > 1400 MPa	Stahlkugeln	< 2	-
		2 bis 10	0,15 bis 0,25 A
		> 10	0,15 bis 0,25 A
Stahl mit < 1400 MPa	Stahlkugeln	2 bis 10	0,2 bis 0,3 A
		> 10	0,3 bis 0,4 A
Titanlegierungen Scheibennuten, Rotoren	Stahlkugeln	< 2	-
		2 bis 10 > 10	0,15 bis 0,25 A 0,15 bis 0,25 A
Titanlegierungen Schaufelblätter	Glasperlen		0,1 bis 0,15 N
Ni-Legierungen	Stahlkugeln	entsprechend Stahl	entsprechend Stahl
Al-Legierungen	Glasperlen	< 2,3	0,1 bis 0,2 N
		2,3 bis 9,5	0,2 bis 0,3 N
		> 9,5	0,3 bis 0,4 N
Mg-Legierungen	Al-Kugeln	entsprechend Al-Leg.	entsprechend Al-Leg.

Bild 16.2.1.6-16

Ein möglichst guter Strahleffekt erfordert eine **auf das Bauteil abgestimmte Strahlintensität**. Diese darf nicht zu niedrig, aber auch nicht zu hoch sein (Bild 16.2.1.6-14 und Bild 16.2.1.6-15).

Die Ermittlung der optimalen Strahlparameter erfolgt in einem **iterativen Prozess** zwischen bauteilrelevanten Strahlversuchen und Probenauswertung.

- Auswertung der **Strahlversuche** mit Untersuchungen der Strahlproben. Zur Anwendung kommen **metallografische Schlitze**, mit denen sich die **Verformung** beurteilen und der **Härteverlauf** ermitteln lässt.

- **Eigenspannungsmessungen** zur Bestimmung des Verlaufs in den Werkstoff und des Maximums (Lit. 16.2.1.6-1, Bild 16.2.1.6-2 und Bild 16.2.2.4-5.3).

- **Mikroskopische Oberflächenbewertung (REM)** des Bedeckungsgrades (Lit. 16.2.1.6-3, Bild 16.2.1.6-4) und der Oberflächenstruktur (z.B. Beschädigungen durch Bruchkorn oder Überstrahlen).

Wird bereits bei der **Neukonstruktion** eines Bauteils eine Kugelstrahlbehandlung vorgesehen, sind für den Strahlprozess **geeignete geometrische Verhältnisse** vorzusehen, um die Strahlbehandlung optimal wirksam werden zu lassen. Gegebenenfalls ist eine entsprechende Gestaltung des Bauteils oder eine geeignete **Strahlvorrichtung** erforderlich.

16.2.1.6.2 Abrasives Strahlen

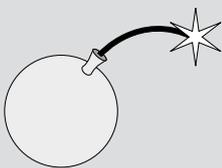
Abrasives Strahlverfahren (engl. **Blasting**) verwenden gewöhnlich nichtmetallische (keramische) Hartpartikel. Im Triebwerksbau handelt es sich in erster Linie um Al_2O_3 (Korund) oder SiC, die mit einer Luftströmung („**dry blasting**“) und/oder mit Wasser (nasses Strahlverfahren, „**wet blasting**“, „**vapour blasting**“) auf die Oberfläche transportiert werden. Nasse Strahlverfahren werden verwendet, wenn ein **schonender Abtrag** im Vordergrund steht. Sie sind notwendig, wenn die **Gefahr explosiver Metallstäube** (z.B. Leichtmetalle wie Ti-, Al-, Mg-Legierungen) besteht. Der Abtragungsmechanismus beruht auf einem erosiven Abtrag (Band 1, Bild 5.3.1-3) der in erster Linie durch die Schneidwirkung der Strahlpartikel entsteht.

Abrasives Strahlverfahren werden zu unterschiedlichen Zwecken angewendet und beruhen auf besonderen Eigenschaften der Strahlfläche:

- Kostengünstig,
- Abtrag von Verunreinigungen und Reaktionsschichten (meist chemisch sehr stabile Oxide) vor Ätzverfahren und/oder Eindringprüfung (17.3.1-7).
- Entfernen von Beschichtungen bei Nacharbeit und Wiederbeschichten.
- Entgratung, Kantenrundung (Bild 16.2.2.2-8).
- Aufrauung für eine bessere Haftung von Beschichtungen, insbesondere thermischen Spritzschichten (Bild 16.2.2.8-3.1) und von Klebeverbindungen (Bild 16.2.1.5-6).
- Aktivierung der Oberfläche für Diffusionsschweißungen und Lötverfahren. Dabei kann der Beladungseffekt (Bild 16.2.1.6-17) für bestimmte Reaktionen genutzt werden. Hierzu gehört die Verbesserung der Benetzung von Hochtemperaturloten (Bild 16.2.1.4-5) auf Ni-Legierungen im Zusammenwirken mit verbliebenen SiC-Partikeln.
- Aktivierung von Oberflächen vor Diffusionsprozessen.

Natürlich sind **mit abrasiven Strahlverfahren auch Gefahren** verbunden (siehe Merksatz). Diese lassen sich mit geeigneten Vorsichtsmaßnahmen vermeiden.

Merksatz:



Beim Trockenstrahlen können trockene Metallstäube entstehen. Wenn sie sich entzünden, ist mit einer gefährlichen Staubexplosion zu rechnen. **!**

*ren, dass das Gewicht **steckengebliebener Strahlpartikel** (Detail) überwiegt. Erst bei fortschreitendem Abtrag macht sich der Beladungseffekt nicht mehr bemerkbar (Diagramm). Der Beladungseffekt kann sich auf die nachfolgenden Fertigungsschritte und im Triebwerk auswirken.*

Bild 16.2.1.6-17: Bei Erosionsvorgängen kennt man den **Beladungseffekt** (Band 1, Bild 5.3.1-7). Es handelt sich um das scheinbar paradoxe Phänomen, dass am Beginn eines Erosionsversuchs nicht eine Gewichtsabnahme als Folge des Abtrags, sondern eine Zunahme beobachtet wird. Das lässt sich darauf zurückfüh-

Positive Auswirkung: Bekannt ist die bessere **Benetzung von Ni-Basislegierungen** durch artgleiche Hochtemperaturlote (Lit. 16.2.1.6-2). Die intensive Reaktion zwischen SiC und Ni-Loten bei hohen Temperaturen dürfte sich in diesem Fall bemerkbar machen.

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

Der Beladungseffekt kann sich durchaus auf nachfolgende Fertigungsprozesse und den späteren Betrieb auswirken.

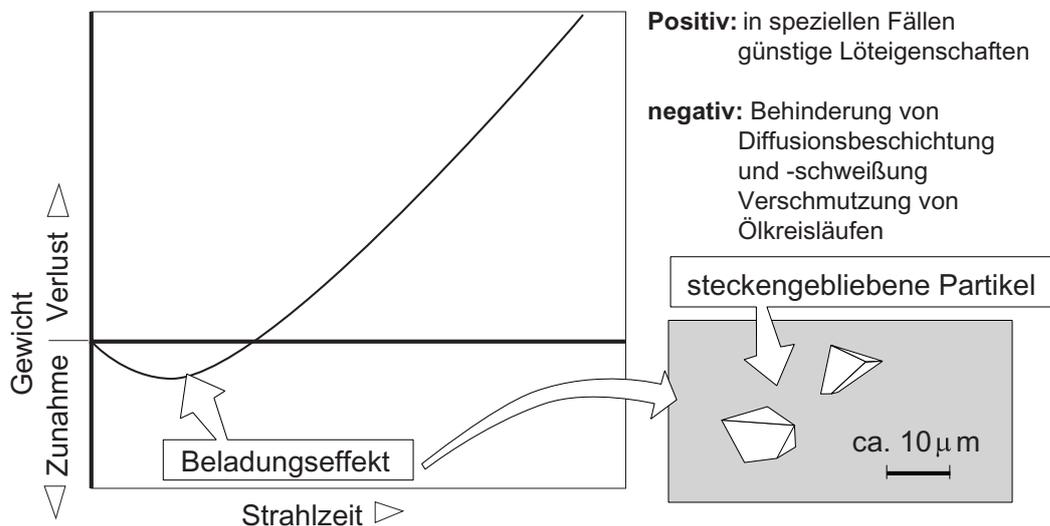


Bild 16.2.1.6-17

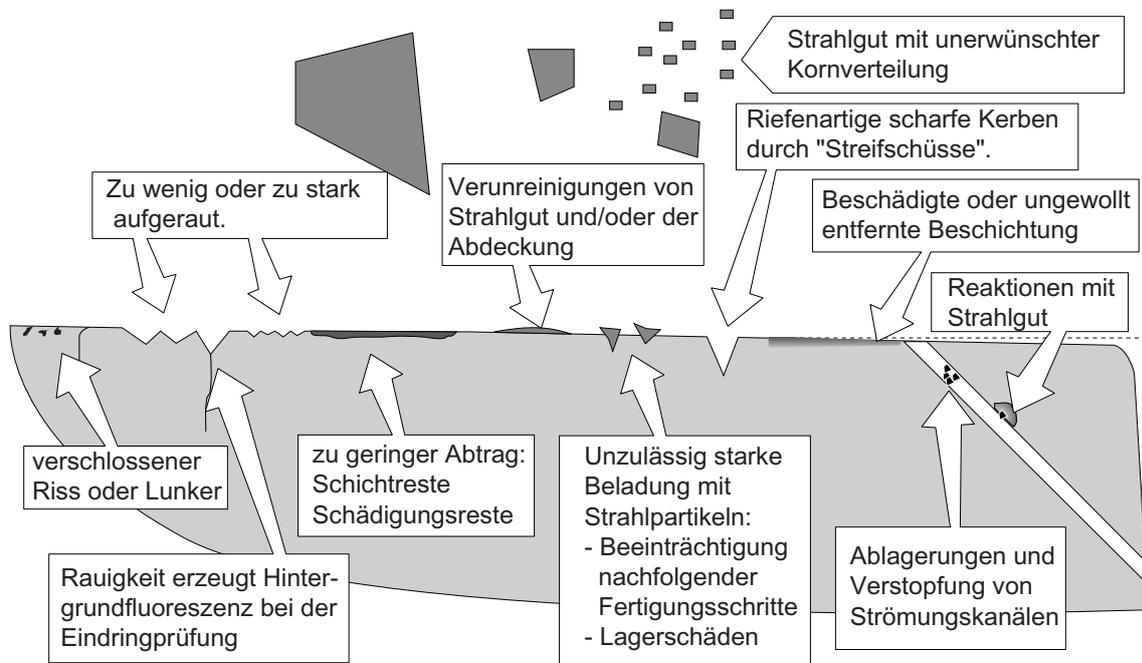
Negative Auswirkungen: Nachfolgende Fertigungsschritte wie **Diffusionsschweißen** oder **Diffusionsbeschichten** können von den verbliebenen Strahlpartikeln beeinträchtigt werden (Bild 16.2.1.8.1-3). So können in Diffusionsschutzschichten Fehlstellen entstehen, die eine örtliche Oxidation begünstigen. Der Schichtaufbau von **Bedampfungsschichten**, wie **PVD-Wärmedämmschichten**, kann gestört werden.

Sich lösende Partikel können im Triebwerk in den Ölkreislauf gelangen und auf den **Lagerlauflächen Ermüdungsschäden** auslösen.

Bild 16.2.1.6-18: Abrasive Strahlverfahren können durchaus problematisch sein. Sie sind häufig eine Voraussetzung für nachfolgende Fertigungsschritte und beeinflussen diese. Eine besondere Bedeutung kommt dem Strahlgut und den spezifizierten Prozessparametern zu. Werden vom **Strahlgut Abrieb und Verunreinigungen verschleppt**, können diese auf mehrfache Weise schädigend wirken (Kapitel 16.2.2.3). Erhöhte **Temperaturen** können die Schädigung auslösen und/oder verstärken. Sprödes keramisches Strahlgut zersplittert beim Aufschlag. Damit wird die Korngrößenverteilung verschoben. Die Spezifikation muss also mit einer kontinuierlichen Sortierung und Überwachung gewährleistet werden. Die Aufrauung der Oberfläche kann die Eindringprüfung mit einer „**Hintergrundfluoreszenz**“ erschweren. Zur gleichen Problematik gehört auch, wenn Fehler wie Risse und Lunken geschlossen oder verstopft werden (Bild 17.3.1-7).

Die **Schwingfestigkeit** kann mit gefährlichen riefenartigen Kerben von „**Streifschüssen**“ (Bild 16.2.1.6-19) beeinträchtigt werden.

Probleme abrasiven Strahlens.



Eintritt von Strahlgut in nicht ausreichend abgedeckte Bohrungen.

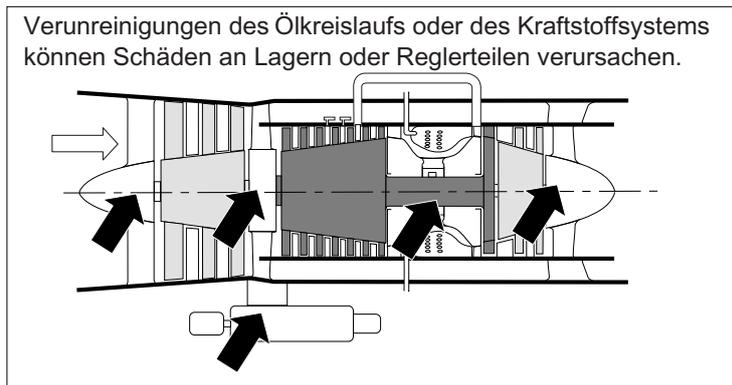


Bild 16.2.1.6-18

Steckengebliebenes Strahlgut („Beladungseffekt“, Bild 16.2.1.6-17) kann sich ebenfalls störend auswirken.

Verstopft Strahlgut Strömungskanäle (Skizze unten links) sind Betriebschäden wie **Überhitzungen von Heißeilen oder Lagerschäden** (Skizze unten rechts) typische Folgen.

Mit Titan- und Ni-Legierungen reaktives Strahlgut wie SiC kann bei Wärmebehandlungen schädigend wirken. Dieser Effekt ist bei Strahlmittelrückständen im Inneren von Turbinenrotorschaukeln besonders problematisch.

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Verfestigungs- u. Abrasionsstrahlen

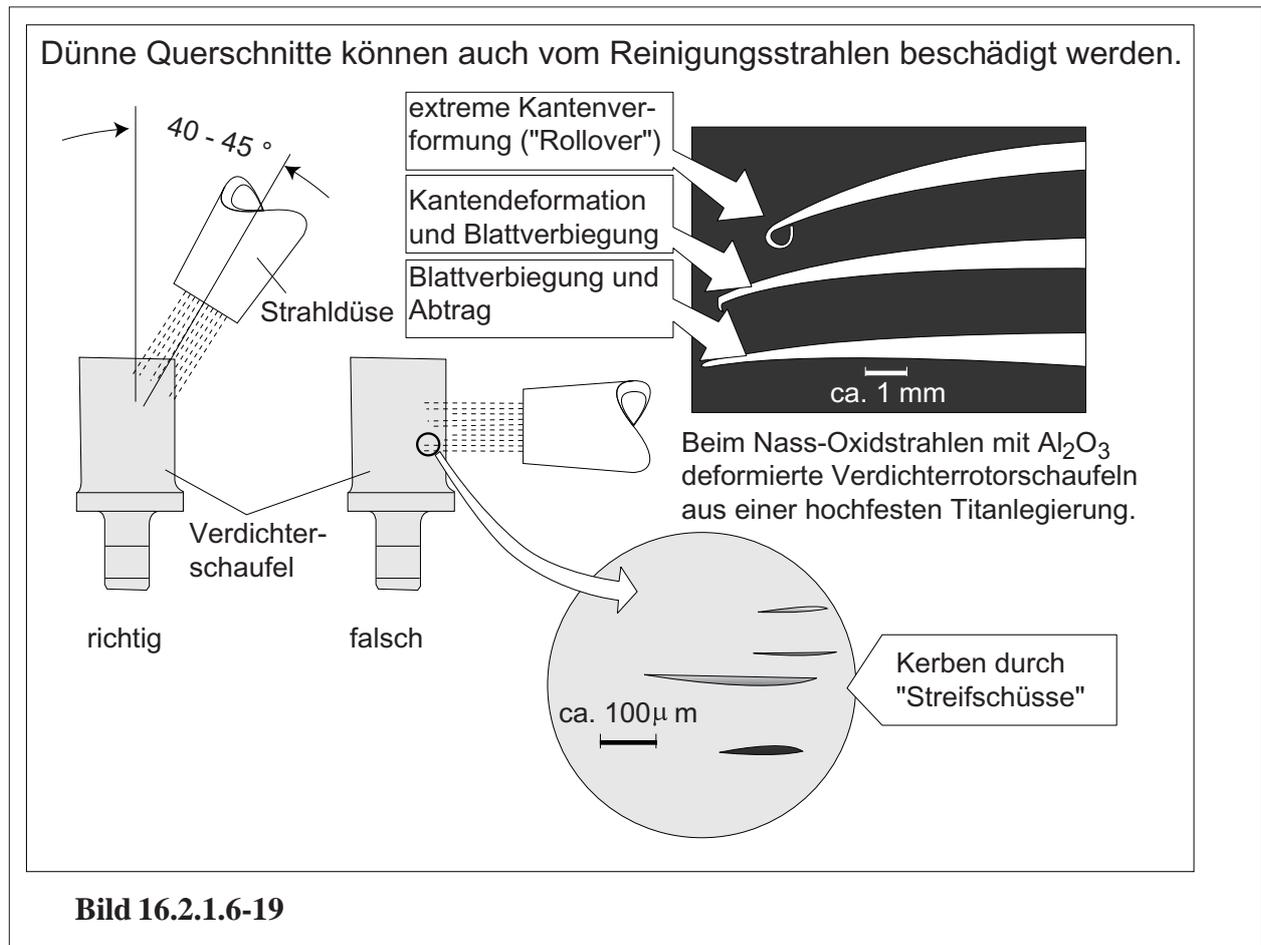


Bild 16.2.1.6-19: Auch das abrasive Strahlen kann ähnlich wie Kugelstrahlen (Bild 16.2.1.&11) oder extreme Erosionsvorgänge im Triebwerk (Band 1, Bild 5.3.2-5) zum Einrollen scharfer dünnwandiger Blattprofile („Rollover“, Skizze oben rechts) führen. Dieser Schaden lässt sich mit einer schrägen Düsenrichtung vermeiden (Skizze links). Eine axiale Düsenausrichtung parallel zum Blattprofil erhöht die Wahrscheinlichkeit gefährlicher axialer Kerben durch „Streifschüsse“ (Detail unten). Diese können bei Blattbiegeschwingungen **Ermüdungsrisse** auslösen. Andererseits ist eine axiale **Orientierung der Rauigkeit** aus aerodynamischer Sicht günstig (Band 3, Bild 11.2.1.1-9.1)

Literatur zu Kapitel 16.2.1.6

- 16.2.1.6-1** P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“, Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 105-112, 245.
- 16.2.1.6-2** ASM „Metals Handbook“, „Volume 5- Surface engineering“, ISBN 0-87170-377-7, 1999, „Shot Peening“ Seite 126-135, „Abrasive Cleaning“ Seite 55-66, 781.
- 16.2.1.6-3** J.Horowitz, „Das ‘Shot-peening’ -Verfahren“, Zeitschrift „Metalloberfläche“ 32 (1978) 7, Seite 285-292.
- 16.2.1.6-4** Ch.W.Fabry, „Kugelstrahlen, Theorie-Versuche-Praxis“, Zeitschrift „Konstruktion“ 17 (1965) Heft 4, Seite 141-153.
- 16.2.1.6-5** Veröffentlichung der Fa. Metals Improvement Company, „Shot Peening“, Seite 3-47
- 16.2.1.6-6** ATSB, Aviation Safety Investigation Report 200205780, „In-flight uncontained engine failure and air turn-back...“, 8. December 2002, ISBN 1877071 83 8, Seite 1-43.
- 16.2.1.6-7** L.Engel, H.Klinge, „Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Metallschäden“, Carl Hanser Verlag, 1982, ISBN 3-446-13416-6, Seite 179, 180.
- 16.2.1.6-8** V.T. Kozyrev, „Estimating the strength of turbine rotor blades taking into account operational damage“, Zeitschrift „Strength of Materials“, Verlag „Springer New York“, Heft: Volume 9, Number 3/März 1977, Seite 250-258.