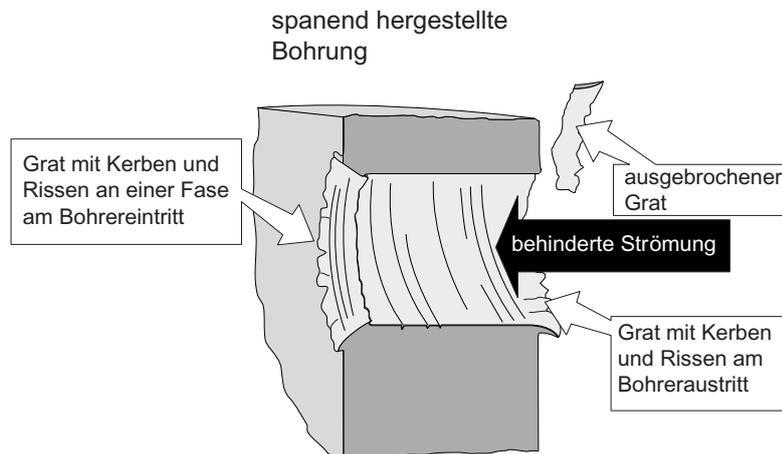


18.2 Grate und scharfe Kanten

Grate müssen entfernt oder vermieden werden.



Folgeschäden durch Grate:

- Kerben und Risse in Graten können zu Ermüdungsrisswachstum und Bauteilversagen führen.
- Ausgebrochene Gratpartikel können Luft-, Öl- und Kraftstoffführungen blockieren sowie Lagerlaufbahnen, Dichtflächen und Zahnräder beschädigen.
- Die Anlage und das Fügen von Bauteilen wird erschwert. Fügeflächen können beschädigt werden.
- Behinderung der Durchströmung infolge starker Strahleinschnürung.

Unter einem **Grat** (engl. **Burr**) wird ein unerwünschter, dünner Steg verstanden, der material-schlüssig mit einer Fläche, insbesondere einer Kante verbunden ist. Nicht nur **unverrundete bzw. nicht angefasste, spanend bearbeitete scharfe Kanten** können Grate aufweisen. Grate können auch auf Flächen an Riefen und als Rattermarken entstehen. Selbst wenn Kanten keinen Grat aufweisen, besteht doch die erhöhte Wahrscheinlichkeit von Schwachstellen. Kleine Ausbrüche, Rissbildung und Beschädigungen sind Graten ähnliche Fehlstellen (Bild 12.2.2.2-2). Fertigungs-schritte wie Kugelstrahlen oder Bürsten können an scharfen Kanten besonders leicht Grate bilden. Grundsätzlich unterliegen **Kanten bei der Bearbeitung einer intensiveren Aufheizung** als weiter innen liegende Bearbeitungsflächen. Solche örtlichen Aufheizungen können Zugeigen-spannungen induzieren (Bild 18.6-3 und Band 3, Bild 12.2.1.1-2) und so die nutzbare Schwingfestigkeit herabsetzen (Bild 18.2-1).

Grate sind ein nahezu allgegenwärtiges Problem der Fertigung. Obwohl sich Grate meist bei der Zerspanung bilden, gibt es darüber hinaus viele Entstehungsmöglichkeiten (Bild 18.2-4). In man-chen Fällen ermöglicht das **Aussehen eines Grates Rückschlüsse auf ursächliche Einflüsse** und lässt somit eine gezielte Abhilfe, z.B. durch Optimierung der Prozessparameter, Hilfsstoffe und/oder der Werkzeuge zu. (Bild 18.2-5).

Häufig beruht die subjektive Motivation zur Entfernung von Graten in der **Arbeitssicherheit**, die eine **Minimierung des Verletzungsrisikos** fordert. Die definierte, zeichnungsgerechte Entfern-ung von Graten hat jedoch einen **wichtigen technischen Hintergrund**. Negative Auswirkungen erstrecken sich sowohl auf nachfolgende **Fertigungsprozesse als auch auf die späteren Betriebs-**

eigenschaften des Bauteils (Bild 18.2-6). Ein Grat kann in mehrfacher Hinsicht eine Schwachstelle darstellen (Bild oben). Er kann **als Kerbe die Schwingfestigkeit so absenken**, dass es zum frühzeitigen Versagen des Bauteils kommt (Bild 18.2-3). Auch die **Funktion eines Bauteils** kann von Graten unzulässig beeinflusst werden. Grate, die das Betriebsverhalten des Bauteils oder anderer Bauteile gefährlich beeinflussen, können auf vielfältige Weise entstehen (Bild 18.2-3).

Die Entfernung von Graten, das „**Entgraten**“ an Bauteilen die in Festigkeit und/oder Funktion im Grenzbereich belastet sind, ist eine besonders verantwortungsvolle Aufgabe. Sie bedarf der gleichen Sorgfalt und Reproduzierbarkeit wie andere sog. definierte Fertigungsprozesse (Bild 18.2-6).

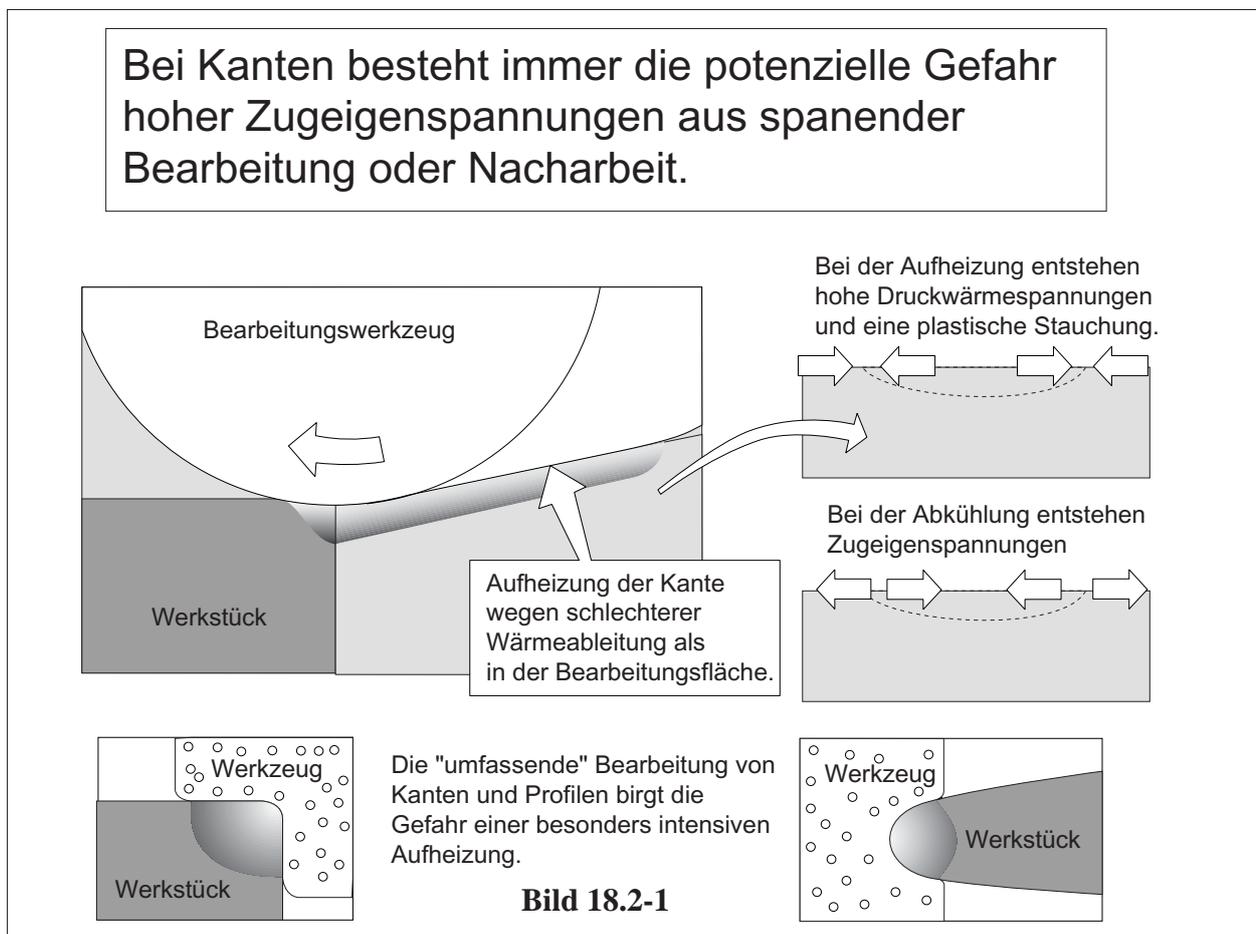


Bild 18.2-1: Das ungünstige Verhältnis von aufgeheizter Bearbeitungsfläche zum wärmeableitenden Volumen begünstigt an den **Kanten** hohe Druckwärmespannungen. Übersteigen diese die Fließgrenze, kommt es zur plastischen Stauchung. Beim nachfolgenden Abkühlen entstehen Zugeigenspannungen welche als Mittelspannungserhöhung die Schwingfestigkeit mindert (Bild 18.4-4).

Eine zusätzliche Schädigungsmöglichkeit ist ein **Festigkeitsabfall durch Gefügeverände-**

rungen wie Lösungsglühen aushärtbarer Legierungen.

Derartige Bearbeitungsverfahren sind nicht nur Fräsen, Räumen und Schleifen. Besonders wichtig ist die **Kantenrundung mit handgeführtem Werkzeug**. Wenn die gesamte Kante vom Werkzeug umfasst wird, z.B. um ein Kantenprofil zu erzeugen, ist mit einer Verstärkung des schädigenden Effekts zu rechnen.

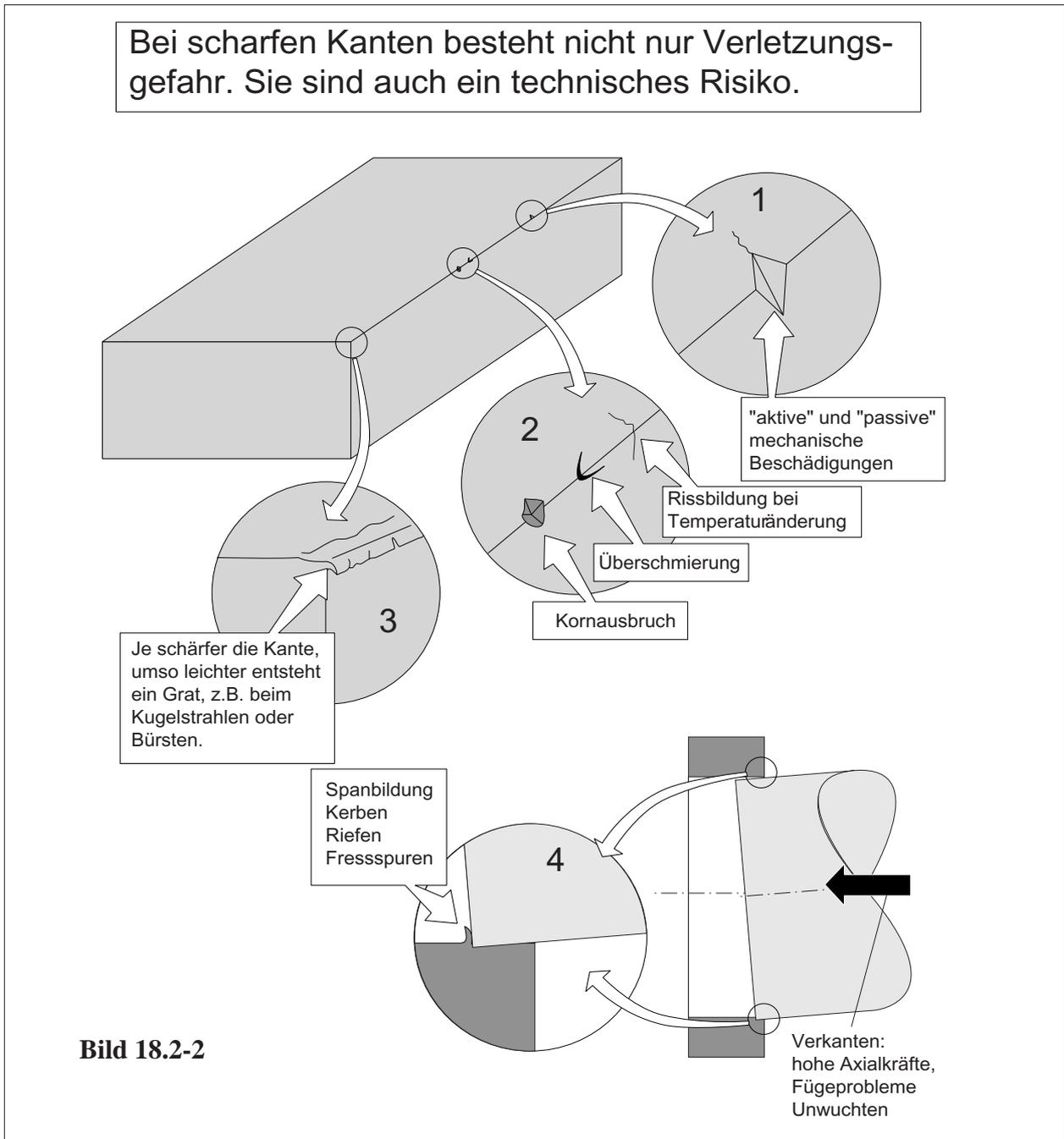


Bild 18.2-2: Wird das Fasen oder Verrunden versäumt, begünstigen scharfe Kanten potenzielle Fehlstellen.

Scharfe Kanten sind für „passive“ mechanische Beschädigungen beim „Handling“ empfindlich (Detail 1, Bild 14-5). Solche Kerben sind für Schwingrisse prädestiniert. Andererseits können scharfe Kanten auch andere Bauteile „aktiv“ beschädigen, indem sie dort Riefen und Kerben eindrücken.

Bearbeitungsvorgänge der Kante können **Fehlstellen** wie Überlappungen und Kornausbrüche erzeugen (Detail 2). Besonders spröde und harte Werkstoffe sind empfindlich. Die schnellere Aufheizung oder Abkühlung der Kante kann Warmrissbildung (Bild 18.7-6 und Band 3, Bild 11.1-8) begünstigen.

Scharfe Kanten sind für eine plastische Verformung und Gratbildung bei nachfolgenden Fertigungsschritten wie Kugelstrahlen, abrasiv

Strahlen oder Bürsten besonders empfindlich (Detail 3).

Scharfe Kanten behindern Montage und Fügungen. Sie können insbesondere an Passdurchmessern zum **Verkanten** beitragen und in der Folge eine Beschädigung der Fügeflächen erzeugen (Detail 4). Die Folge sind **Montageprobleme**. Kommt es zu **Setzungen am Rotor beim Hochfahren**, ist mit **plötzlichen Unwuchten und gefährlichen Anstreifvorgängen** zu rechnen. Entstehen z.B. durch **Fügeprobleme ungleichmäßige Lötspalte oder Schweißspalte** (EB-Schweißen, Diffusionsschweißen) können **Bindefehler** entstehen.

Bild 18.2-3: Grate begünstigen auf sehr unterschiedliche Weise eine Rissbildung. So entsteht die Gefahr der Schwingermüdung mit einem sicherheitsrelevanten Bauteilversagen (HCF, LCF, Beispiel 18.2-1) und umfangreichen Folgeschäden.

Spannungserhöhung: Weil Grate an Kanten häufig an der Außenkontur des Bauteils liegen, sind sie mit einem großen Randfaserabstand bei Biegung besonders hoch belastet (Skizze oben).

Spannungserhöhend können Grate bei **Temperaturänderungen** wirken. Die zum Volumen relativ **große Oberfläche** eines Grates nimmt in der Aufheizphase über Strahlung und Konvektion viel Wärme auf. Der **dünne Querschnitt** kann diese Wärme nur ungenügend in das massive Bauteil ableiten. Im aufgeheizten Grat entstehen Druckspannungen auf Grund einer behinderten Wärmedehnung. In der Abkühlphase ist der Grat schneller und es entstehen in ihm Zugspannungen. Diese sind umso höher wenn beim Aufheizen plastisches Stauchen eintrat. So bilden sich beim Abkühlen hohe **Zugeigenspannungen**. Damit sind Grate potenziell besonders hoch **thermoermüdungsbeansprucht**.

Verwirbelt eine Gasströmung am Grat, ist der **Wärmeübergang besonders gut**. Damit werden **Wärmespannungen verstärkt** und **Thermoermüdung (TF)** im Betrieb unterstützt.

Die **Kerbwirkung von Graten** ist nicht auf den ersten Blick einsichtig. Betrachtet man einen Grat genauer, etwa unter dem Binokular, erkennt man meist eine Zerklüftung. **Kleine Risse und Kerben erhöhen die Betriebsspannungen** und führen bereits bei Auslegungsbeanspruchung zu **Schwinganrissen** (Detail).

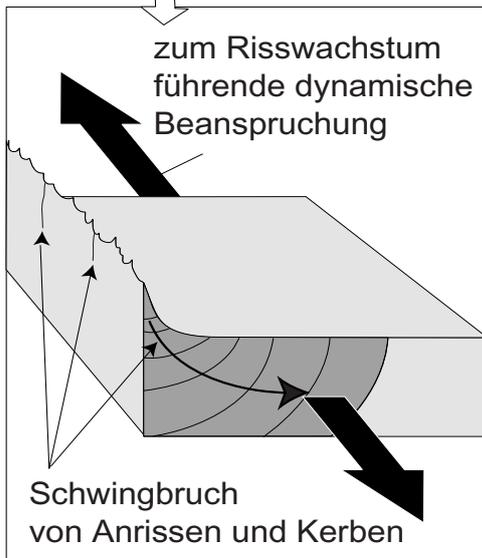
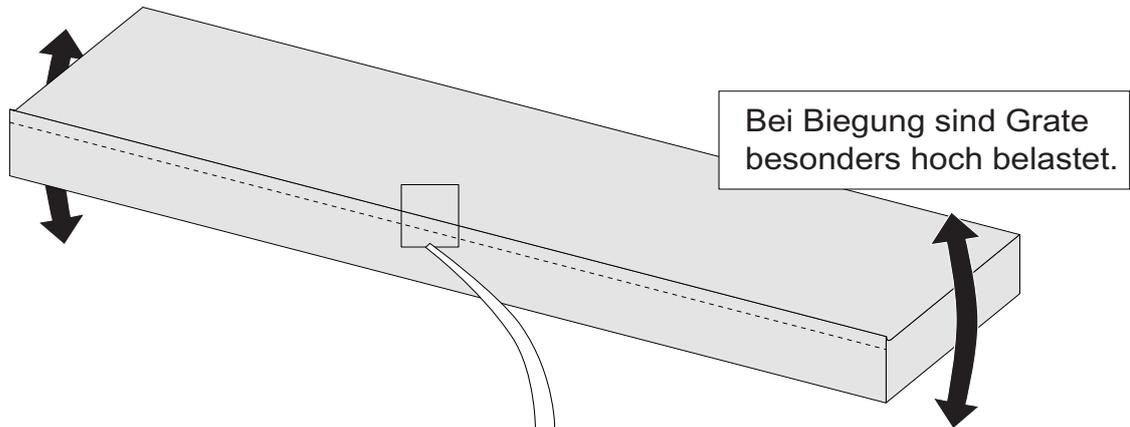
Versprödung: Grate entstehen unter starker plastischer Verformung. Erfolgt diese Verformung bei niedrigen Temperaturen, kommt es zur Kaltverfestigung und damit zu Zähigkeitsverlust (Versprödung, Abfall der Bruchzähigkeit), was die Schwingrisse und/oder Gewaltrisse begünstigt.

Entstehen im Grat hohe Zugeigenspannungen, wird in nachfolgenden Fertigungsprozessen die **Aufnahme von Wasserstoff** empfindlicher Werkstoffe und damit eine Versprödung unterstützt (Band 3, Bild 12.2.1.7-14).

Mit einer Versprödung ist auch zu rechnen, wenn sich der Grat **bei hohen Temperaturen** bildet. Eine solche Situation lassen Trenn- und Schleifvorgänge sowie Hochgeschwindigkeitszerpannung erwarten. Die im Vergleich zum Volumen große Oberfläche eines dünnwandigen heißen Grats kann besonders intensiv Sauerstoff aufnehmen und es entstehen spröde Oxide. Besonders Titanlegierungen sind für eine solche Versprödung anfällig.

Zugeigenspannungen: In Graten entstehen plastische Verformungen mit hohen Zugeigenspannungen. Das führt zu verstärkter **Aufnahme von Wasserstoff** und erhöht bei empfindlichen Werkstoffen und spezifischen Medien die Gefahr einer **Spannungsrissskorrosion** (SpRK, Bild 18.2-6). Diese Rissbildung muss nicht im Fertigungsprozess auftreten, sie kann auch während der Lagerung und im Betrieb entstehen.

Ein Grat ist eine typische Anrisstelle für Schwingrisse und Korrosionsrisse.



- Potenzielle festigkeitsmindernde Einflüsse an einem Grat:
- Kerben
 - Risse
 - Hohe Beanspruchung bei Biegung
 - Versprödung
 - Oxidation
 - Kaltverfestigung
 - Wasserstoffaufnahme
 - Zugeigenspannungen
 - Spannungsrisskorrosion
 - Hohe Wärmespannungen bei Temperaturänderung/ Thermoermüdung

Bild 18.2-3

Grate, welche die Betriebsfestigkeit gefährden, entstehen auf sehr unterschiedliche Weise.

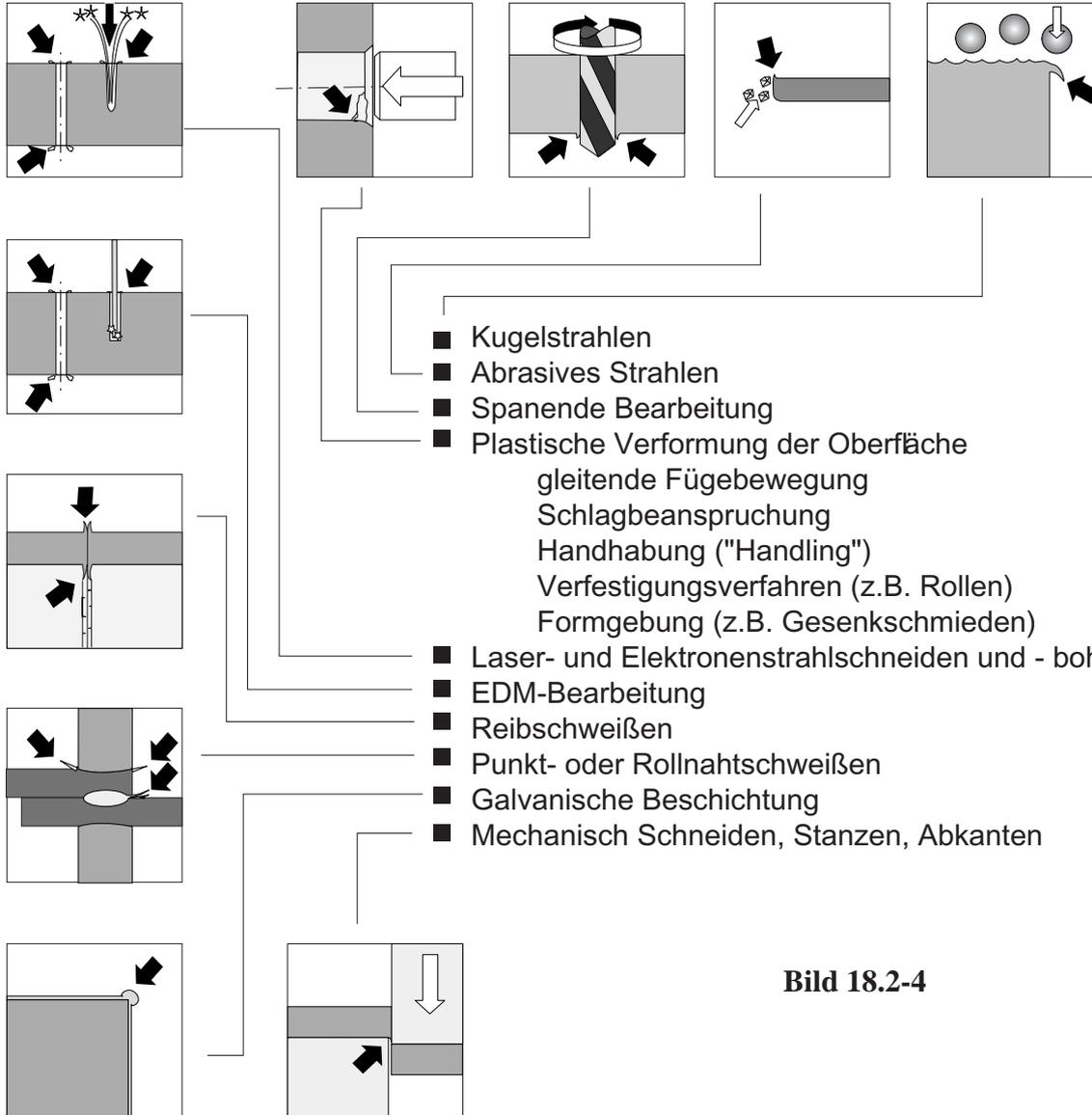


Bild 18.2-4

Bild 18.2-4: Grate (engl. Burr) sind unerwünschte, dünne Stege die materialschlüssig mit einer Fläche, vorzugsweise einer Kante verbunden sind. Sie lassen sich auf vielfältige Weise erzeugen. Voraussetzung um vorbeugend Grate mit der Auswahl geeigneter Verfahren und Prozessparameter (z.B. in der Arbeitsvorbereitung) zu vermeiden, ist die Kenntnis wo und wann Grate entstehen. Zunächst werden Grate lediglich mit Schneidvorgängen in Zusammenhang gebracht. Eine tiefere Beschäftigung mit diesem Thema lässt jedoch schnell erkennen, dass Grate, die das Betriebsverhalten der Bauteile unzulässig beeinflussten, während vieler anderer Fertigungsschritte auftreten.

Spanende Bearbeitung: Eine spanende Bearbeitung erzeugt gewöhnlich Grate am Auslauf der Bearbeitungsfläche (Bild 18.2-3). Aber auch am Anfang der Bearbeitungsfläche kann bereits ein, wenn auch kleiner, Grat aufgeworfen werden.

Mechanisches Schneiden, Stanzen, Abkanten: In Abhängigkeit von der Richtung des Schnitts bilden sich an den Trennflächen Grate.

Kugelstrahlen und abrasives Strahlen: Besonders eine schräge, bei Kanten nach außen gerichtete Beaufschlagung verschmiert Material zu einem Grat (Band 3, Bild 12.2.1.6-13). Kugelstrahlen erzeugt eine typische Gratform die wegen ihres Querschnitts als „Elephant Tail“ bezeichnet wird (Bild 12.2.1.6-15). Solche Grate können die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen wie Rotor-scheiben unzulässig vermindern.

Plastische Verformung der Oberfläche durch Handhabung und Transport, Fügebewegungen und Schlagbeanspruchung: Werden Kanten von Vorrichtungen schief angesetzt, können Grate aufgeworfen werden. Geraten diese Grate zwischen die Gleitflächen, ist Riefenbildung zum Fressen wahrscheinlich. Solche Schädigungen vermindern die Schwing-

festigkeit auf Grund der Kerbwirkung erfahrungsgemäß erheblich. Zusätzlich werden Füge- und Demontagekräfte sehr hoch. Ähnliche Gratbildung kann auch bei unvorsichtiger Handhabung der Teile auftreten. Grate entstehen bei Formgebungsverfahren wie Gesenkschmieden oder Gewinderollen als Folge einer plastischen Verformung.

Thermisches Schneiden (Plasma, Autogen, Laser, Elektronenstrahl): Die Schmelze aus dem Schnittspalt wird zum Austritt des Strahls transportiert und erstarrt dort als Grat und/oder Schmelzperlen (Bild 18.6-12).

Schweißen: Beim **Reibschweißen** wird ein ausgeprägter Grat aus dem Schweißspalt gepresst (Band 3, Bild 12.2.1.3.4-3 und 12.2.1.3.4-5). Dieser wird, soweit möglich, spanend entfernt. In unzugänglichen Hohlräumen wie Hohlwellen verbleibt der Grat. Auch beim **Punkt- und Rollnahtschweißen** („seam weld“) kann sich ein Grat bilden, welcher die Schwingfestigkeit mindert (Lit 18.2-2). Ungünstige Schweißparameter (zu hoher Schweißstrom) oder eine Naht die sehr nah an der Blechkante verläuft, können die Schmelze hier zum Austritt bringen (Band 3, Bild 12.2.1.32-1.2). Ein solcher Grat bildet sich entlang der Blechoberfläche und ist schwer entfernbar. Schweißungen an Hohlkörpern wie aus zwei Blechen gefügte Schaufelprofile mit innen laufenden Graten sind nach Möglichkeit zu vermeiden. Es sei denn, solche Grate können als Schwachstellen akzeptiert werden. Dann sind sie in der Auslegung zu berücksichtigen.

Galvanische Beschichtungen: An Kanten baut sich gratartig Material auf, weil hier das stärkere elektrische Feld zu einer schnelleren Abscheidung führt (Band 3, Bild 12.2.1.8.3-5).

Die Entstehung und Ausbildung von Graten am Bohrungsaustritt ist von vielen Bohrparametern beeinflusst. Sie sagt umgekehrt etwas über die Parameter aus.

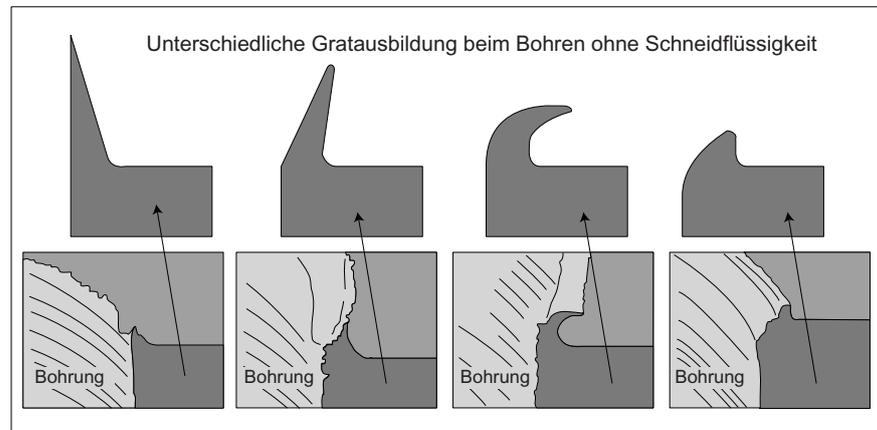
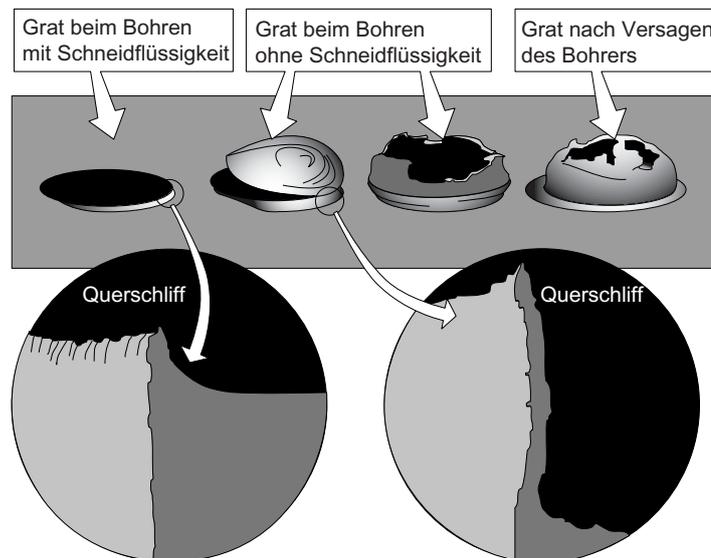
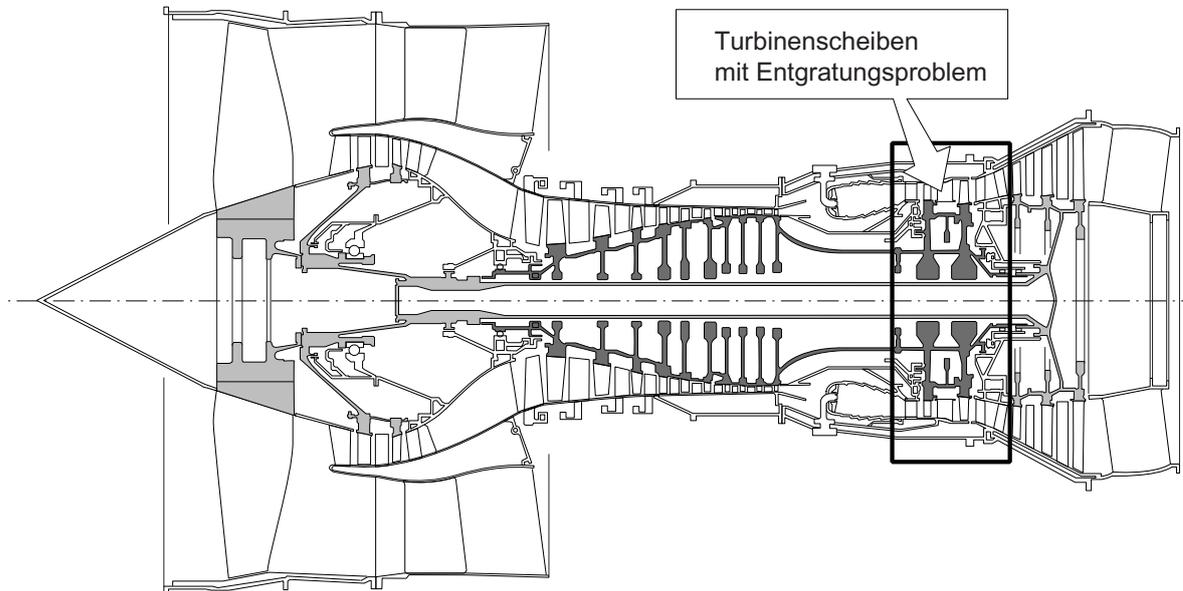


Bild 18.2-5

Bild 18.2-5 (Lit. 18.2-1): Bis zu 30 % der **Fertigungskosten** eines Bauteils aus einer Titanlegierung muss für die **Entgratung** aufgewendet werden. Dazu trägt besonders die Gratabbildung an Bohrungen bei. Die schlechte Wärmeleitfähigkeit und die Neigung zur Kaltverschweißung (Fressen) sowie chemische Reaktionen beschleunigen den Verschleiß des Schneidwerkzeugs. Die Schneidengeometrie beeinflusst eine Gratabbildung besonders. Für die Auswahl geeigneter Zerspanungsparameter eignen sich als Kriterium neben der Spanbildung die Grate.

Üblicherweise entstehen beim Bohren am Ein- und am Austritt Grate. Der Grat am Austritt ist sehr viel ausgeprägter und bedarf deshalb besonderer Aufmerksamkeit. Die Gratabbildung hängt besonders vom Kühlschmierstoff (KSS, Band 3, Bild 12.2.1.1.2-13 und Bild 12.2.1.1.2-14) ab. Die Skizzen oben zeigen Grate an Bohrungen in einem Blech aus TiAl6V4. Ohne Schneidflüssigkeit entstehen sehr ausgeprägte Grate mit typischer, den Prozessparametern zuordenbarer Ausbildung (Bild unten).



Beispiel 18.2-1 (Lit. 12.2.2.2-3):

Zitat:“ ...the operators have been warned that there is a risk of uncontained failure of their ...(engines) unless certain high pressure turbine (HPT) components are replaced early. The warning came in a ... US Federal Aviation Administration emergency airworthiness directive (AD). In USA 25 engine units with...(known) serial numbers are affected. The AD warns that **a manufacturing process change** on some ...high pressure turbine discs **has reduced their ‘maximum cyclic life’**.

Operators must replace the discs with the newly issued cycle limits, the AD states, explaining that some HPT stage 1 discs need replacing between 2 600 and 3 600 cycles, and some stage 2 discs need to be replaced before 3 800 cycles.

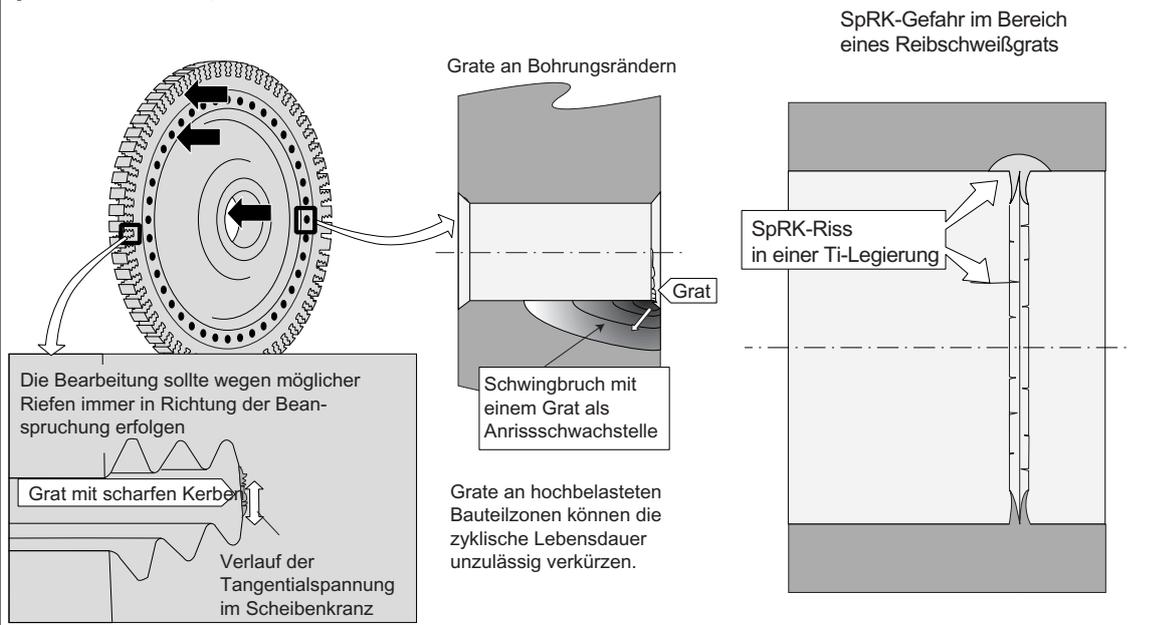
... ‘Rig testing has revealed that **the fatigue life of the ...turbine discs is more sensitive to a certain deburring process than expected**. The life limit of a restricted number of affected discs has been reduced’ ...“

Kommentar: Es geht offenbar nicht darum, dass nicht entgratet (deburring) wurde, sondern dass ein **ungünstiger Entgratungsprozess** angewendet wurde. Dass dies die Lebensdauer der Turbinenscheiben so stark negativ beeinflusste ist eine wichtige Lehre (Bild 18.2-6). **Entgratung ist ein äußerst wichtiger Fertigungsprozess**. Dieser bedarf Verantwortungsgefühl und Fachkenntnis.

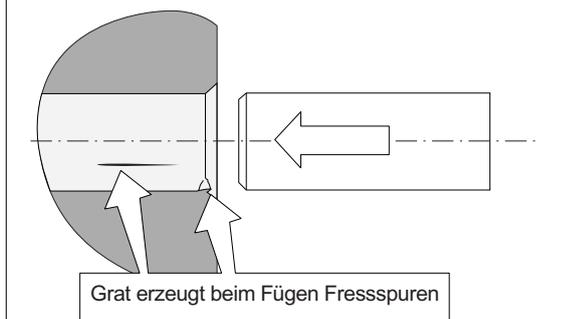
Leider machen die verfügbaren Unterlagen keine Angaben über das Entgratungsverfahren, sowie Art und Ort der Schädigung.

Schädigende Auswirkungen von Graten auf das Bauteilverhalten im Betrieb.

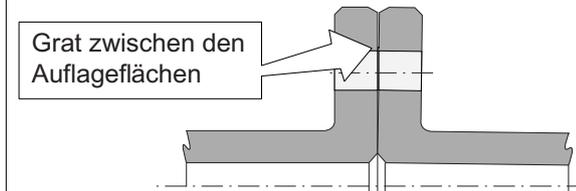
1 Abfall der zyklischen Lebensdauer bei Rotorteilen



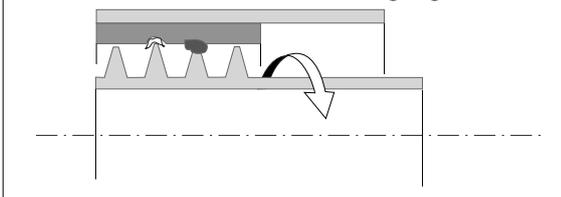
2 Ausfall der Bauteilfunktion, z.B. bei Gleitbewegungen (Regler, Verstellsysteme). Beschädigung von Passflächen: Abfall der Schwingfestigkeit, Montageprobleme.



3 Probleme an Auflage- und Kontaktflächen: Kerben, schlechte Druckverteilung.



4 Auslösen eines Labyrinthschadens: Verschleiß, selbstverstärkender Anstreichvorgang



5 Abgelöster Grat in durchströmtem Querschnitt

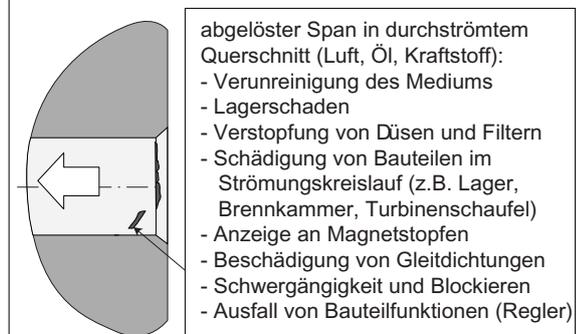


Bild 18.2-6

Bild 18.2-6: Grate können das **Betriebsverhalten des Bauteils** und auch das anderer Teile schadensursächlich beeinflussen. Die folgenden Beispiele sollen das verdeutlichen. Ein Fall, wie sich ein Grat auf die Strömung und dadurch entstehende potenzielle Schäden auswirkt, zeigt Bild 18.2-6.

„1“ **Absenkung der Schwingfestigkeit:** Grate können einen unzulässigen Abfall der LCF- und HCF-Festigkeit verursachen (Bild 18.2-3, Beispiel 18.2-1). Im ungünstigen Fall kann die zyklische Lebensdauer davon bestimmt sein. Hoch belastete Scheibenzonen (Skizze links), weil mit einer für die Entgratung bzw. **Kantenrundung** „komplexen“ Geometrie (Bild 18.2-8), ist besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Dazu gehören Schaufelaufnahmenuten (Tannenbaum, Schwalbenschwanz) und Bohrungen (Band 3, Bild 12.2.1.1.2-5 bis -10). Die rechte Skizze zeigt einen Fall, bei dem während einer Reibschweißung Rissbildung auftrat, die offenbar im Zusammenhang mit Anrissen im Reibschweißgrat stand. Es besteht der Verdacht, dass die kleinen Anrisse im Grat im Zusammenhang mit Handschweiß SprK in diesem Titanbauteil auslöste (Bild 18.3-16).

„2/3“ **Montageprobleme und mechanische Beschädigungen:** Fügebewegungen zwischen Passflächen (z.B. Einführung eines Spannbolzens in eine Scheibenbohrung) können außer Grate, **Riefen und Fressspuren** erzeugen (Bild 18.2-2). Kommt es zum **Kaltverschweißen (Fressen)**, ist eine deutlich erhöhte Fügekraft zu erwarten („2“). Wird eine erforderliche Axialkraft so vermindert, dass sie eine Anlage verhindert, kann es im Betrieb zu gefährlichen Lagerüberlastungen und/oder Setzbewegungen kommen. Entstehen bei der Fügebewegung Riefen, ist für querlaufende Belastungen mit einem gefährlichen Abfall der Schwingfestigkeit zu rechnen.

Skizze „3“ skizziert den Fall, wenn Grate die **Auflage von Flanschen und Passflächen** verhindern. Ein **Setzen der Flansche** im Betrieb,

möglicherweise bei instationären Bedingungen wenn sich die Verspannung verändert, führt zu **Unwuchten und Schwingungen**. Späne von Graten zwischen den Flanschanlageflächen können durch **Relativbewegungen wandern und dabei Kerben erzeugen**.

„4“ **Auslösen eines Labyrinthenschadens:** Die Erfahrung weist darauf hin, dass Späne und Grate bei neuen Labyrinthen einen selbstverstärkenden Anstreifvorgang begünstigen oder auslösen können, der zu einem katastrophalen Versagen des Labyrinthings führt (Band 2, Bild 6.10.3.1.2-4).

„5“ **Grate als Schadensursachen in durchströmten Querschnitten: Fremdkörper aus abgebrochenen Graten** die von einem strömenden Medium transportiert werden, können an anderen Bauteilen Schäden auslösen.

Geraten solche Partikel in **Wälzlager** und kommt es dort zu Eindrücken und Überwalzungen sind die Laufflächen ermüdungsgefährdet.

Lagerschäden können ebenfalls von teilweise verstopften Öldüsen und Filtern ausgelöst werden. Ein reduzierter Durchfluss führt zu schädigender Überhitzung und metallischem Kontakt der Wälzflächen. Auch verlegte **Kraftstoffdüsen** können die Triebwerkssicherheit gefährden, wenn der Kraftstoffstrahl abgelenkt wird und es zu **örtlichen Überhitzungen** an Brennkammer und Gehäuse kommt (Lit. 18.2-4).

Gratpartikel zwischen Gleitflächen wie in **Zahnradpumpen** oder **Reglern** (z.B. **Schiebern**), können ein Blockieren auslösen.

Werden **Blenden** und **Zumessbohrungen** in **Reglern** (hydraulisch, pneumatisch) verlegt, ist die Funktion beeinflusst.

Besonders empfindlich sind gekühlte **Heißeile** wenn der Kühlluftstrom auch nur wenig abnimmt. Eine solche Situation kann eintreten, wenn die **Kühlluftbohrungen von Turbinenschaufeln** mit nur wenigen Zehntelmillimetern Durchmesser ganz oder teilweise blockiert wer-

den. Es genügt z.B. schon, dass eine Entstaubungsbohrung an der Schaufelspitze verlegt wird (Bild 18.3-9).

Selbst wenn Gratpartikel von einem **magnetischen Abscheider** festgehalten werden, kann eine Warnanzeige im Cockpit **Notmaßnahmen** erforderlich machen und eine gefährliche Situation entstehen lassen.

Gelangen Gratpartikel zwischen die Dichtflächen einer **Gleitringdichtung**, ist eine Leckage mit gravierenden Folgeschäden (z.B. durch ein anschließendes **Ölfeuer**) möglich.

Bild 18.2-7: Grate in durchströmten Querschnitten können die Strömung stören. In einer Rohrleitung kann ein Grat neben einer Widerstandserhöhung zu örtlicher Verwirbelung führen und Kavitation auslösen (Skizze oben; Band 1 Kapitel 5.5.1.3, und Band 2 Bild 6.11.1.2-8). Das System kann so zu Schwingungen mit der Gefahr von Schwingbrüchen angeregt werden. Möglich ist auch, dass die Druckschwingungen im Strömungsmedium die **Funktion des Systems beeinträchtigen** (Regler, Einspritzung). Kavitation kann auch Materialabtrag an den betroffenen Oberflächen verursachen und diese schädigen. Scharfe Kanten an einer Öffnung rufen eine Strömungseinschnürung mit Anstieg des Widerstands hervor, bzw. sie reduzieren die Durchflussmenge.

Kleinere Durchflussmengen als es der Auslegung entspricht sind vielfältig schadensauslösend:

- Überhitzung gekühlter Heißeile (Luft)
- Versagen von Lagern (Öl)
- Fehlfunktion von Brennkammern (Kraftstoff, Luft).

Die Skizze unten zeigt die **Folgen einer „sorglosen“ Umstellung des Fertigungsprozesses**. Günstigere Fertigungskosten verlangten nach einer Änderung des Bohrverfahrens für die Luftbohrungen in Rohrbrennkammern (Skizze unten). Eine bedenkliche Abweichung gegenüber den bisherigen Bohrungen war mit den üblichen Inspektionsmethoden nicht aufgefallen. In Prüfläufen war jedoch das Betriebsverhalten des Triebwerks inakzeptabel. Als Ursache erwies sich das neue Bohrverfahren. Die Analyse des Problems ergab, dass abweichend vom bewährten Verfahren, eine scheinbar vernachlässigbare Gratbildung die Durchströmung und damit die Luftzufuhr unzulässig störte.

Grate und gratähnliche Strömungsstörungen in Rohrleitungen und Bohrungen verschlechtern manchmal die Bauteilfunktion entscheidend.

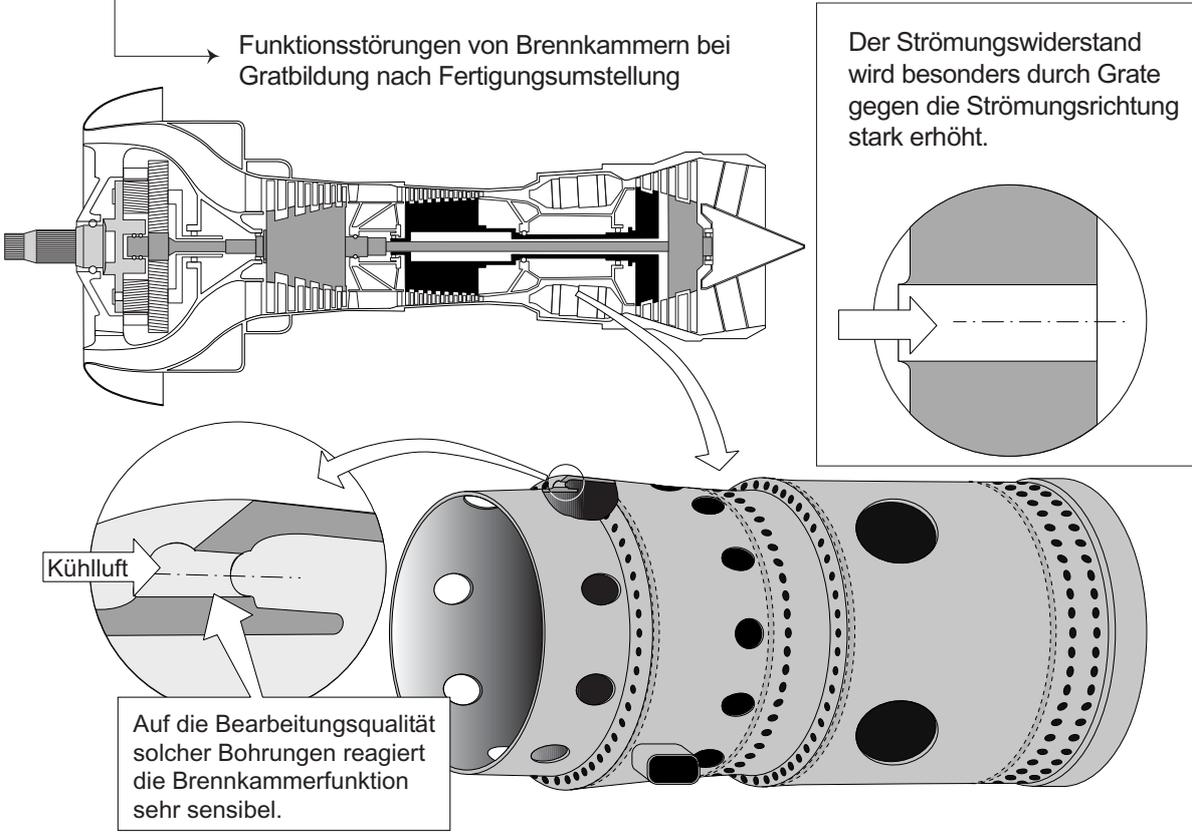
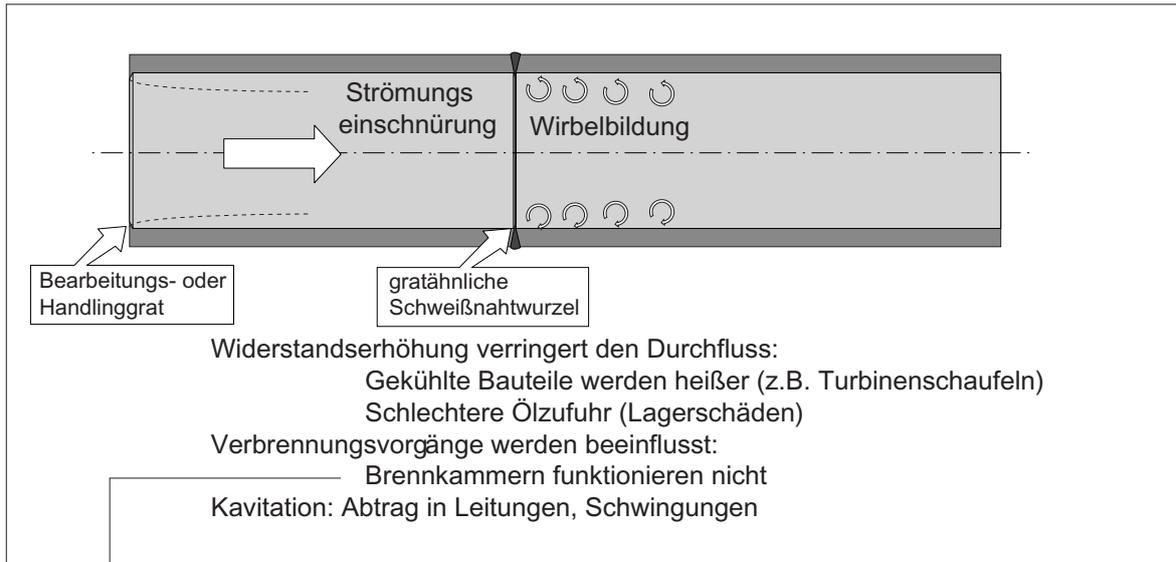


Bild 18.2-7

Das Entgraten der Kanten ist von großer Bedeutung für die Bauteilsicherheit.

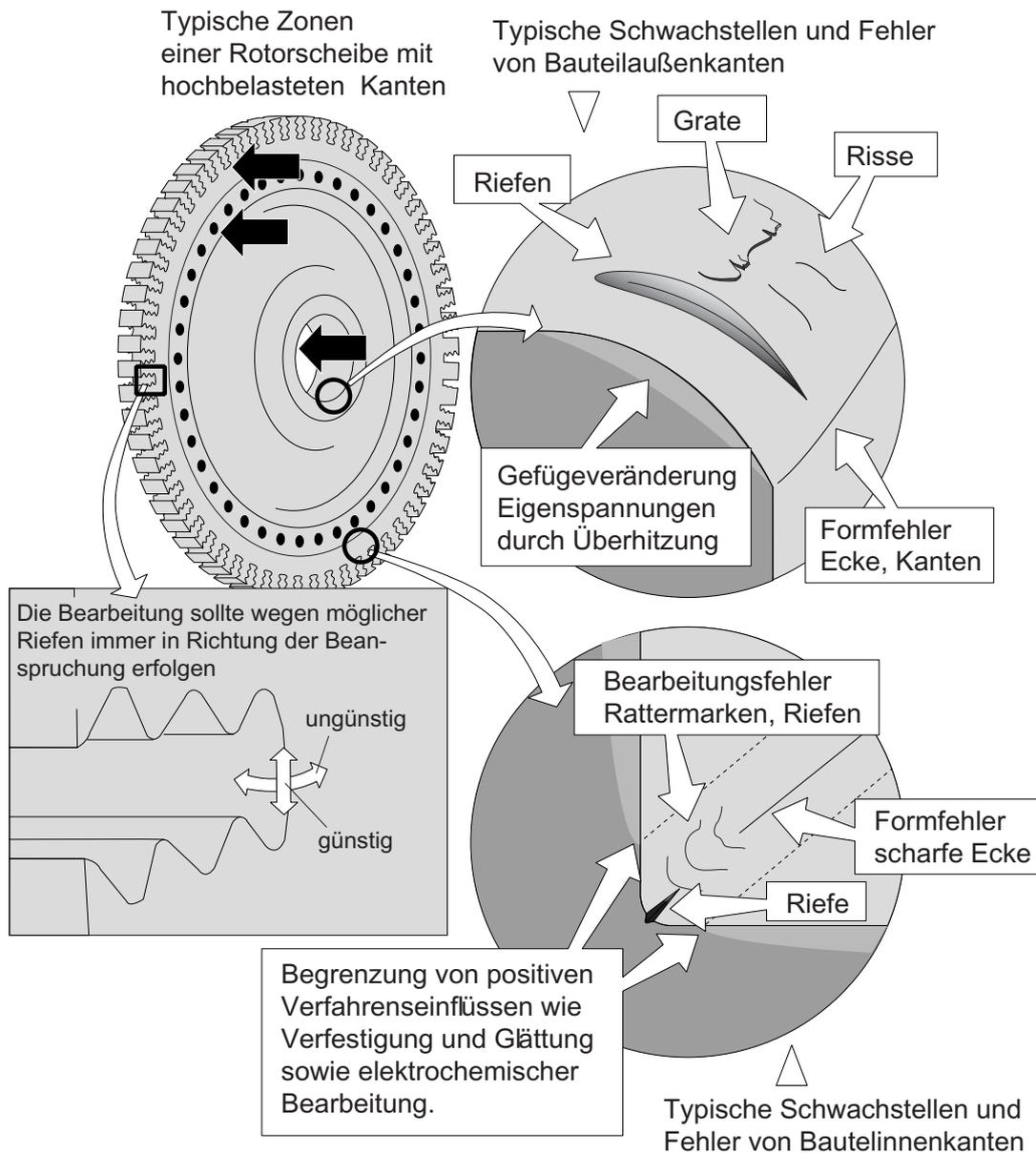


Bild 18.2-8

Bild 18.2-8: Entgraten ist gewöhnlich mit dem Verrunden von Kanten gleichzusetzen. Im Folgenden wird der Einfachheit halber immer von „Entgraten“ gesprochen. Wird diese Tätigkeit als wenig qualifizierte abgetan, handelt es sich um eine **gefährliche Unterschätzung** (Beispiel 18.2-1, Lit 18.2-4). Gerade die etwas **eintönig erscheinende aber Fachkenntnis, Geschick und Motivation erfordere Tätigkeit an sehr sensiblen Bau-teilzonen kann eine spezifische Personalauswahl** notwendig machen.

Nicht nur in hoch zyklisch beanspruchten Zonen wie Schaufelaufnahmenuten und Bohrungen (Skizze oben links) sondern am gesamten Bauteil ist Entgraten wichtig. Nur mit **zugelassenen Verfahren im Rahmen abgesicherter Prozessparameter** darf entgratet werden. Dabei spielen bei einer spanenden Entgratung per Hand sowohl das Werkzeug nach Art und Werkstoff, als auch Parameter wie Andruck und Drehzahl sowie eventuelle Hilfsstoffe eine wichtige Rolle. In übertragenem Sinn gelten diese Forderungen natürlich auch für andere Entgratungsverfahren wie

- abrasives Strahlen
- Scheuern, gegebenenfalls mit chemischer Unterstützung.
- Druckfließläppen
- elektrochemische Verfahren (ECM)

Zu „aggressive“ **Prozessparameter**, besonders spanende Entgratung mit hochoberigen Fräsern und Schleifwerkzeug kann Kanten schädigen:

- **Aufbau neuer Grate** und/oder von **Überlappungen** („Schuppen“, Details).
- **Überhitzung** mit Festigkeitsabfall als Folge einer **Gefügeveränderung** und im Extremfall **Rissbildung**.
- Aufbau von **Zugeigenspannungen** die sich Betriebsspannungen ungünstig überlagern.

Weitere Probleme, die eher mit der Handhabung der Werkzeuge in Zusammenhang stehen, sind:

- ungünstige **Verrundungskontur**
- ungünstige **Bearbeitungsrichtung**. Dies ist der Fall, wenn **Bearbeitungsriefen quer zu den lebensdauerbestimmenden Betriebsspannungen** verlaufen (Detail unten links). Leider lassen sich häufig spanende Entgratungsverfahren in für die Bauteilfestigkeit ungünstiger Richtung, effektiver und leichter anwenden. Deshalb ist besonders darauf zu achten, dass dem Personal dieses Risiko bewusst ist.

Weitere Entgratungsverfahren haben ebenfalls ihre spezifischen potenziellen Probleme:

Elektrochemische Verfahren müssen einen verstärkten Abtrag der Kanten beherrschen. Ursache ist die Konzentration des elektrischen Feldes. Auch von der Bauteilform „abgeschirmte“ Bereiche müssen zuverlässig entgratet werden. Dabei darf kein selektiver Angriff (Korngrenzenangriff) gefährliche Kerben erzeugen.

Abrasives Strahlen kann, abhängig von Strahlgut und Prozessparametern wie Intensität, Auftreffrichtung und -winkel neue Grate oder bedenkliche Riefen erzeugen. Als besonders empfindlich können **Kanten von Verdichterschaukeln** gelten.

Literatur zu Kapitel 18.2

- 18.2-1** D.A.Dornfeld, J.S.Kim, H.Dechow,J.Hewson, L.J.Chen, „Drilling Burr Formation in Titanium Alloy, Ti-6Al-4V“, Berichte der internationalen Forschungsgemeinschaft für mechanische Produktionstechnik (CIRP Annals 1999, Manufacturing Technology), Volume 48/1/1999, Seite 73-76.
- 18.2-2** „Metals Handbook Ninth Edition, Volume 11, Failure Analysis and Prevention“, ISBN 0-87170-007-7, American Society for Metals, 1986, 442.
- 18.2-3** „FAA warns Boeing 717 operators of BR 700 engine component failure“, Zeitschrift „Flight International“, December 18, 2000.
- 18.2-4** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 3“, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Kapitel 11.2.2.2.