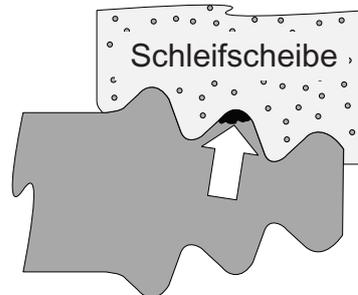


16.2.1.1 Spanende Bearbeitung



Üblicherweise werden zwei Hauptgruppen **spanender Bearbeitung** unterschieden. Solche mit **definierter Schneide** wie Drehen, Fräsen, Räumen und Bohren und Verfahren mit **undefinierter Schneide** wenn eine Vielzahl Schneidpartikel im Eingriff sind. Dies gilt für Verfahren wie Schleifen, Trennen, Bürsten, Polieren, Läppen. Darüber hinaus kommen Verfahren wie Druckfließlappen, Ultraschallbearbeitung oder Wasserstrahlschneiden zur Anwendung. Hier werden die schneidenden Hartstoffpartikel in einem strömenden Medium wie Wasser oder einer viskosen Masse transportiert. Beim Vibrationsschleifen werden abrasive Schleifkörper in schwingende „Schneidbewegung“ versetzt.

Weil viele Probleme und Schäden bereits in anderen Kapiteln im vorliegenden Band und in den Bänden 1,2 und 3 unter besonderen Aspekten behandelt werden, enthält Bild 16.2.1.1-1 eine **Liste mit Querweisen**.

Probleme und Schäden spanender Bearbeitung zeigen sich in erster Linie in der zerspannten Oberfläche (Bild 16.2.1.1-2). Es handelt sich um eine Vielfalt von Veränderungen gegenüber dem erwünschten bzw. spezifizierten Zustand. Besonders schädigend wirkt Rissbildung auf die zyklische Bauteillebensdauer. Aber auch festigkeitsmindernde Gefügeveränderungen und Zugeigenspannungen wirken sich in ähnlicher Weise aus.

Auch unzerspannte Bauteilzonen können im Zusammenhang mit einem Zerspannungsvorgang geschädigt werden. Denkbar ist z.B. die örtliche Überlastung mit einer ungeeigneten Spannvorrichtung (Bild 16.2.2.5-1).

Probleme der spanenden Bearbeitung stehen nicht zuletzt im Zusammenhang mit **Kühlschmierstoffen** (KSS, Bild 16.2.1.1-13). Die Aufheizung der Bearbeitungsfläche hängt von Eigenschaften der KSS ab die den Schnittvorgang unterstützen und vom Zustrom des KSS zur Schnittfläche. Ungeeignete und/oder nicht ausreichend entfernte Prozessmedien können in nachfolgenden Fertigungsschritten unerwünschte Oberflächenreaktionen wie Oxidbildung (bei einer Wärmebehandlung) bis hin zu Rissen (Bild 16.2.1.7-8) auslösen. Wird die Benetzbarkeit der Bauteiloberfläche beeinträchtigt besteht die Befürchtung einer verschlechterten Rissauffindbarkeit einer Eindringprüfung.

Am Kapitelende werden typische Schadensfälle, bei denen es sich auch um **Scheibenbrüche in Zusammenhang mit Fertigungsmängeln** handelt, dargestellt. Sie werfen auch ein Licht auf die neben dem Zerspanungsprozess weiteren ursächlichen Einflüsse und zeigen die Auswirkungen von Fertigungsmängeln auf die Betriebssicherheit (Bilder 16.2.1.1-9.1 bis -9.8 und Bild 16.2.1.7-8).

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung

Querverweise auf die Behandlung von Zerspanungsproblemen im vorliegenden Band 4 sowie den Bänden 1,2 und 3.

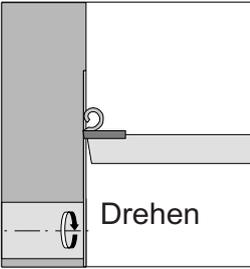
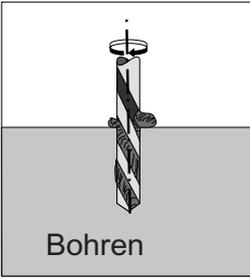
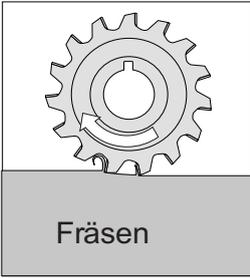
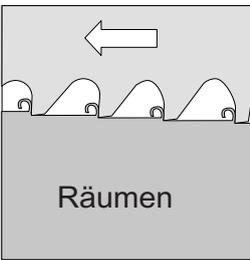
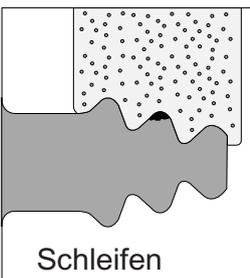
	Problem/Schaden	Bild Nr.
 <p>Drehen</p>	Überhitzung 16.2.1.1-13; 16.2.2.2-1 Grate, Kanten 16.2.2.2-1 Spänestau 16.2.2.5-3 Zugeigenspannungen 16.2.2.4-3; 16.2.2.4-5.0 Rissbildung, Kommarisse 16.2.1.1-2 Rattern 16.2.2.5-2; 16.2.1.1-12 Überlastung durch Spankräfte 16.2.2.5-1 Werkzeugbruch 16.2.2.5-5 Parametereinfluss 16.2.1.1-3	
 <p>Bohren</p>	Überhitzung 16.2.1.1-9.1 bis -9.3; 16.2.2.5-3, 16.2.2.7-6 Grate, Kanten 16.2.2.2-5 Spänestau 16.2.1.1-9.1 bis -9.7; 16.2.1.1-8 Zugeigenspannungen Werkzeugbruch 16.2.1.1-9.1 bis -9.3; 16.2.1.1-10 Parametereinfluss Kühl- und Schmiermittel 16.2.1.1-13 Prüfbarkeit 16.2.1.1-9.5, 16.2.1.1-9.6	
 <p>Fräsen</p>	Überhitzung Grate, Kanten Zugeigenspannungen 16.2.1.1-8.1; 16.2.2.4-13 Rattern Funkenbildung Parametereinfluss	
 <p>Räumen</p>	Grate, Kanten 16.2.2.2-6; 16.2.2.2-8 Zugeigenspannungen Rattern 16.2.2.5-2 Funkenbildung 16.2.1.1-8.2; 16.2.2.6-2 Parmetereinfluss	
 <p>Schleifen</p>	Überhitzung 16.2.1.1-2; 16.2.1.1-4 Rissbildung 16.2.1.1-2; 16.2.1.1-4 Grate, Kanten 16.2.2.2-1 Zugeigenspannungen 16.2.2.2-1, 16.2.1.1-3 Rattern Funkenbildung 16.2.2.6-2; 16.2.2.6-5 Parmetereinfluss Kühlmittel 16.2.1.1-13	

Bild 16.2.1.1-1

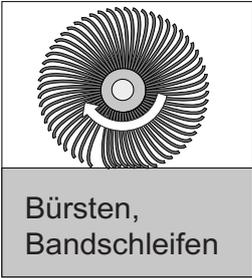
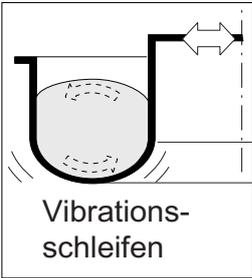
	Problem/Schaden	Bild Nr.
 <p>Bürsten, Bandschleifen</p>	Überhitzung ----- Grate, Kanten ----- Zugeigenspannungen ----- Parametereinfluss ----- Schleifkorneinfluss/Reaktionen ----- Funken -----	16.2.1.1-8.2 16.2.2.2-8 16.2.1.1-4 Band 2, 7.1.4-14; 16.2.1.1-5; 16.2.2.3-8 16.2.2.6-5
 <p>Vibrations- schleifen</p>	Beschädigungen ----- Schleifflüssigkeit ----- Parametereinflüsse -----	16.2.1.1-5

Bild 16.2.1.1-2: Es handelt sich um eine **Zusammenstellung typischer Effekte in einer spanend hergestellten Bearbeitungsoberfläche** (Lit. 16.2.1.1-14).

„A“ Eigenspannungen: Bei jeder Zerspanung ist mit plastischen Verformungen, zumindest im Mikrobereich und deshalb mit der Entstehung von Eigenspannungen zu rechnen (Kapitel 16.2.2.4). Deren Größe und Art (Zug, oder Druck) und damit der Einfluss auf die Bauteileigenschaften hängen sehr sensibel von den Zerspanungsparametern, der Geometrie und dem Zustand der Werkzeugschneide ab. Grundsätzlich gilt: Zugspannungen mindern die Schwingfestigkeit und erhöhen das Risiko einer Risskorrosion (Bild 16.2.2.3-15) und von Lötrissigkeit (Bild 16.2.2.3-12).

„B“ Festigkeits- und Härteänderung als folgen einer Gefügeveränderung (Bild 16.2.1.1-3.1): Die Wärme aus dem Zerspanungsvorgang kann die Oberfläche schädigend aufheizen. Wenn z.B. ein Bohrer „blau“ wird (Bild 16.2.1.1-7.2 und Bild 16.2.2.5-3) ist dies ein deutlicher Hinweis, dass auch die Bearbeitungsfläche, d.h. die Bohrungswand gefährlich überhitzt wurde.

Die Aufheizung wird von vielen Prozessparametern und den physikalischen Eigenschaften des Werkstücks beeinflusst. Darüber hinaus hängt der „Wärmehaushalt“ des Schneidvorgangs entscheidend von der Zuführung und den Eigenschaften des Schneid- und Kühlmittels ab. Gehärtete bzw. vergütete Stähle erleiden beim Überschreiten der Anlassstemperatur einen Härteabfall. Wird bei aushärtbaren Legierungen wie Nickellegierungen die Lösungsglüh-temperatur überschritten, geht die, die Warmfestigkeit bestimmende, Aushärtungsphase (γ -Phase) mit zunehmender Temperatur und Zeit in Lösung.

„C“ Rissbildung: Diese entsteht wenn die Schnittkräfte den Werkstoff mechanisch überlasten. Ni-Basis Schmiedelegierungen wie Waspaloy kennen sog. „**Kommarisse**“. Es handelt sich um transkristalline Gewaltrisse die auf ein Korn beschränkt sind. Ähnliche Risse können im Zusammenhang mit Rattermarken entstehen (Bild 16.2.2.5-2). Besonders gefährliche Gewaltanrisse können beim Anstreifen von Werkzeughaltern entstehen (Bild 16.2.1.1-3.1) Eine andere Form der Rissbildung sind sog. Warm- oder Heißrisse (Bild 15.1-8 und 16.2.2.7-

6). Diese entstehen bei hohen Temperaturen die bereits eine ausreichende Erweichung der Korngrenzen auslösen, sodass Wärmespannungen und/oder Schnittkräfte zu interkristallinen Rissen führen. Typisches Beispiel sind Schleifrisse in Superlegierungen.

„D“ **Nachweisverschlechterung infolge mechanischem Schließen von Fehlstellen und Rissen:** Fehlstellen wie Risse und Poren können durch den Zerspanungsvorgang im Oberflächenbereich zugeedrückt werden (Bild 17.3.1-4). Diesen Effekt kann man besonders ausgeprägt beim Schleifen bearbeiten. Hier werden zuvor entstandene Schleifrisse so geschlossen, dass eine Eindringprüfung kein befriedigendes Ergebnis ermöglicht. Zur Öffnung der Risse wird dann ein Wärmebehandlungszyklus notwendig (Bild 17.3.1-7).

„E“ **Gefügeveränderung, ausgelöst von plastischer Verformung und Erwärmung** (Lit 16.2.3-5, Bild 16.2.1.1-3.1): Extreme plastische Verformung führt zu schlecht anätzbaren, bei martensitischen Stählen meist spröden Gefügeständen, sog. „**White-etching Layer**“. Man spricht auch von „**White Etching Areas**“ (weiße Schichten) wobei Effekte wie „**Butter Fly-Bildung**“ (Lit. 16.2.1.1-17) gemeint sein können. Dagegen sind dünnste (μm -Bereich), schlecht anätzbare, weiche Schichten auf Zerspanungsflächen meist unvermeidbar und nicht zwangsläufig schädigend. Die Schnittrichtung lässt sich bei stark drückenden Werkzeugschneiden an einer ausgeprägten „**Faserkrümmung**“ in Oberflächennähe erkennen. Ob diese negativ zu beurteilen ist, hängt von den beim Verformungsvorgang eingebrachten Eigenspannungen ab. Zugspannungen senken die Schwingfestigkeit. Hohe Temperaturen beim Bearbeitungsvorgang können, wie bereits unter „H“ beschrieben, das Gefüge unerwünscht verändern.

„F“ **Kerben:** Eine Zerspanung kann Kerben in Form von Bearbeitungsriefen (Bild 16.2.2.1-

5 und Bild 16.2.2.1-6, Lit 16.2.3-15 und Lit 16.2.3-16) und Rattermarken (Bild 16.2.2.5-2) erzeugen, die als Schwingbruchausgänge dienen. Eine weitere Schädigung von Ni-Basis-Werkstoffen ist das Ausbrechen ausgeprägter Karbide beim Zerspanungsvorgang. Damit entstehen merkliche Kerben.

„G“ **Werkzeugbruch** kann eine gefährliche Schädigung darstellen (Bild 16.2.2.5-5). Das gilt auch, wenn Reste der ausgebrochenen Werkzeugschneide in der Oberfläche verbleiben.

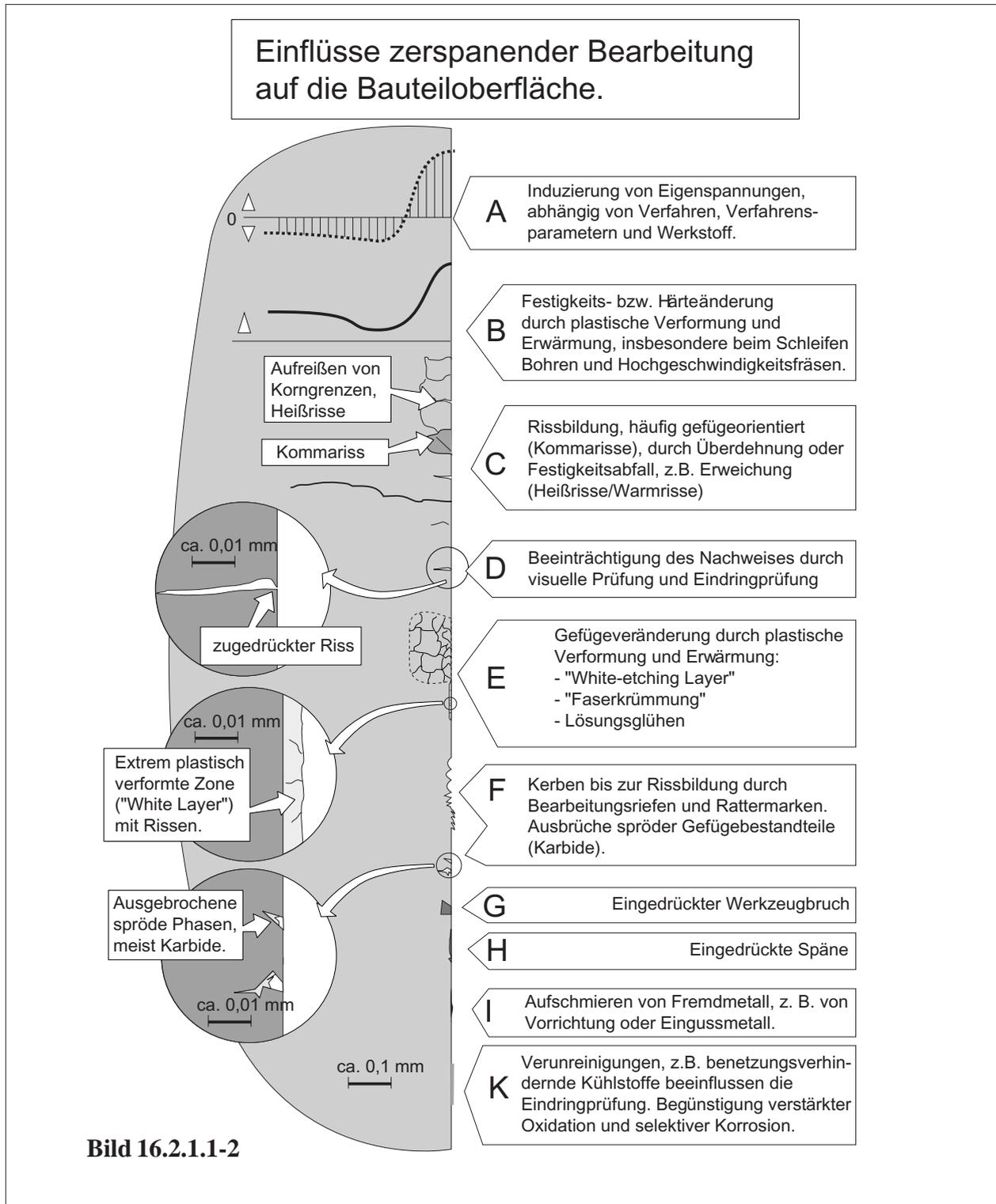
„H“ **Eingedrückte Späne** können als Kerben wirken. Dazu verwandt sind Aufschmierungen, die eine extreme Oberflächenverfestigung („E“) und Überhitzung mit Festigkeitsabfall („B“) erzeugen (Bild 16.2.2.5-3).

„I“ **Aufschmieren von Fremdmittel** kann auf unterschiedliche Weise beim Zerspanungsvorgang erfolgen. Denkbar ist Abrieb von Vorrichtungen (Bild 16.2.1.1-3.1, Bild 16.2.2.3-1) oder niedrig schmelzenden metallischen Eingussmassen (Bild 16.2.2.5-1). Solche Verunreinigungen können auf unterschiedliche Weise schadenswirksam werden, z.B. durch Elementbildung oder Lötrissigkeit (Kapitel 16.2.2.3 und Bild 16.2.2.5-10.1).

„K“ **Verunreinigungen** die im Ablauf des Fertigungsprozesses zwangsläufig auf die zerspannte Bauteiloberfläche gelangen, sind Kühl- und Schneidstoffe. Silikonöle, die zur Unterdrückung der Schaumbildung dienen, können die Benetzbarkeit der zerspannten Bauteile und durch Verschleppung (Bild 17.3.1-8), anderer Bauteile bedenklich verschlechtern. Dadurch wird die Wirksamkeit der Eindringprüfung in Frage gestellt. Die Folge ist eine Verunsicherung die erfahrungsgemäß einen umfangreichen Reinigungsaufwand mit hohen Kosten auslöst.

Aggressive Verunreinigungen durch **Ätz- und Reinigungsbäder** können bei nachfolgenden **Wärmebehandlungen** unzulässig starke Oxi-

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung



ation und/oder selektive Korrosion (z.B. interkristalliner Angriff) entstehen lassen (Bild 16.2.1.7-3).

Einfluss von Zerspanungsanomalitäten auf die LCF-Festigkeit.

nach W.D.Feist, F.Niklasson, K.M.Fox

LCF-Testergebnisse an gedrehten 4-Punkt-Biegeproben aus Ti-6Al-4V bei Raumtemperatur unter Sinusbelastung.

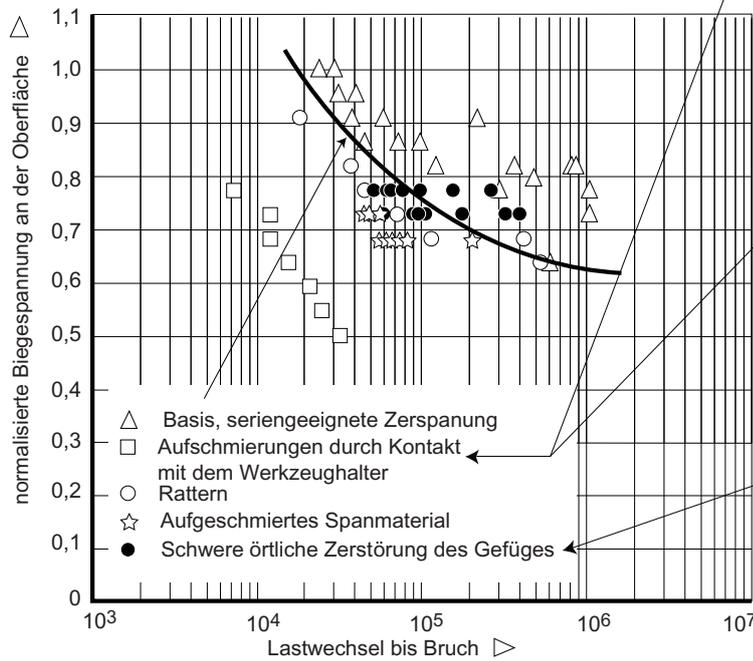


Bild 16.2.1.1-3.1

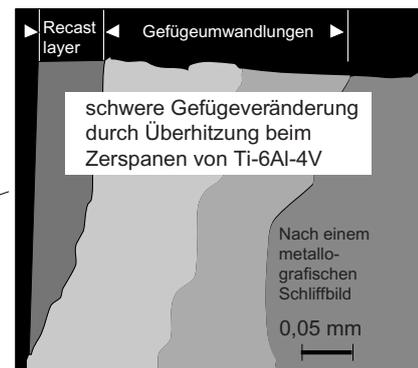
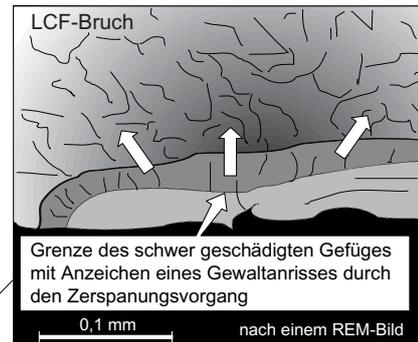
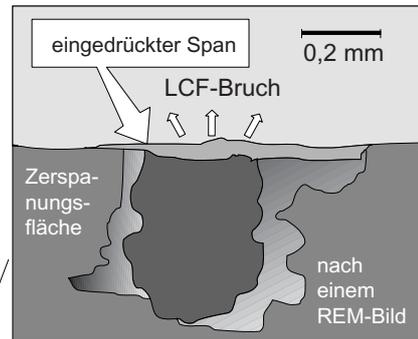


Bild 16.2.1.1-3.1 (Lit. 16.2.1.1-29): Während der Zerspantung kann die Oberfläche auf unterschiedliche Weise geschädigt werden. Die Auswirkungen der wichtigsten Schädigungsarten (Bild 16.2.1.1-2) auf die LCF-Festigkeit und damit auf die zyklische Lebensdauer von Rotorkomponenten (Scheiben und Ringe) zeigt das Diagramm. Den gravierendsten Einfluss haben offenbar **Aufschmierungen und rissartige Schädigungen** durch örtliche mechanische Überlastung (mittlere Skizze) beim **Kontakt mit dem Werkzeughalter** (Bild 16.2.2.5-4). Hierzu gehören auch Aufheizungen mit örtlichen Anschmelzungen (recast layer, Skizze unten) die sich bei dem Anstreifvorgang bilden. Danach folgen eingedrückte Späne (Skizze

oben, Bild 16.2.2.5-3) und der Einfluss deutlicher Gefügeveränderungen.

Beeinflussung einer spanend bearbeiteten Oberfläche im metallografischen Schliff.

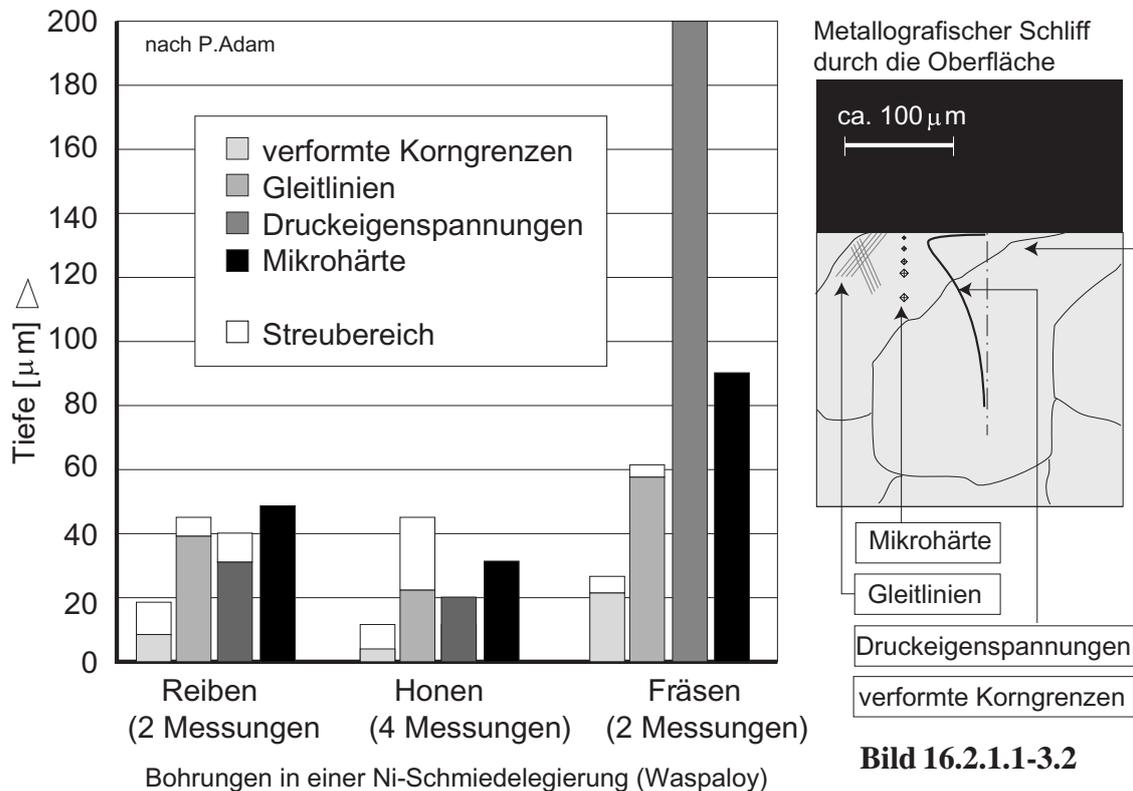


Bild 16.2.1.1-3.2 (Lit. 16.2.1.1-1): Das Beispiel von **Bohrungen in einem Scheibenwerkstoff** aus einer Ni-Schmiedelegerung gibt ein Gefühl für die **Beeinflussung der bearbeiteten Oberfläche**. Natürlich hängen diese Veränderungen außer von den Zerspanungsparametern auch **entscheidend von den Werkstoffeigenschaften ab**. Dabei spielt z.B. die **Verfestigungsneigung, das Gefüge und die Kristallstruktur** eine wichtige Rolle.

In erster Linie handelt es sich um vier Effekte. Die **Korngrenzenverformung** zeichnet sich durch eine **Verbiegung in Bearbeitungsrichtung** auf Grund einer merklichen plastischen Verformung aus (Detail rechts).

Gleitlinien werden von eng benachbarten parallel orientierten Linienfeldern gekennzeichnet. Sie entstehen durch das **Abgleiten des Werkstoffs auf den Gleitebenen der Kristalle** bei einer plastischen Verformung.

Druckeigenspannungen bilden sich auf Grund der unterschiedlichen plastischen Verformung im Abstand von der Oberfläche. Sie fallen verständlicherweise nach innen schnell ab. Man erkennt, dass beim (Zirkular-) Fräsen die **Druckeigenspannungen** unter den angewandten Zerspanungsparametern besonders tief wirken. Sie reichen deutlich über die Gefügemerkmale hinaus.

Die **Veränderung der Mikrohärtigkeit** ist auf eine Kaltverfestigung infolge der plastischen Verformung zurückzuführen. Entsprechend dem Verformungsverlauf ist mit dem Anstieg der Mikrohärtigkeit in Richtung zur Oberfläche zu rechnen.

Es lässt sich also über die erkennbaren Gefügeveränderungen im **metallografischen Schliff** und umgekehrt nicht unbedingt auf die Tiefe der Druckspannungen und einer Härteänderung rückschließen.

Bild 16.2.1.1-4: Die schwer zerspanbaren hochfesten Werkstoffe des Triebwerksbaus sowie die besonderen Ansprüche an Maßgenauigkeit und Oberflächengüte erfordern den Einsatz des **Schleifens**. Dabei können im Oberflächenbereich unterschiedlich starke Schädigungen auftreten. Es handelt sich bei Ni- und Ti-Legierungen (Lit. 16.2.1.1-2 und Lit. 16.2.1.1-14) in erster Linie um Schädigungen im Zusammenhang mit

- Eigenspannungen,
- Härte- bzw. Festigkeitsabfall,
- Rissbildung.

Martensitische Stähle können abhängig von Temperatur und Abkühlgeschwindigkeit auch einen Härteanstieg und eine Versprödung zeigen (Lit. 16.2.1.1-4, -6, -7, -8).

Beim Schleifen werden verschiedene Einflüsse in Kombination wirksam (Skizze oben). Sie hängen insbesondere von **Schleifparametern** wie Schnittgeschwindigkeit, Vorschub und Zustellung ab (Bild 16.2.1.1-3). Aber auch Merkmale wie die Art der **Schleifscheibe** und die Steifigkeit der **Schleifmaschine** sind von Bedeutung.

Wärmespannungen sind beim Schleifen eine Folge von **Temperaturgradienten**. Überschreiten diese die Fließgrenze, kommt es zu plastischen Verformungen. Beim Aufheizen entstehen Stauchungen die beim Abkühlen Zugspannungen auslösen. So können von der hohen Temperatur besonders geschwächte Korn Grenzen aufreißen (Heißrisse, Warmrisse, Bild 15.1-8).

Festigkeitsabfall insbesondere im Korngrenzenbereich durch hohe Temperaturen. Es kann eine Erweichung erfolgen, sodass minimale Zugspannungen für eine Rissbildung ausreichen. Selbst wenn keine Rissbildung auftritt, können aushärtbare Legierungen bei Überschreitung der Lösungsglühtemperatur eine Festigkeitseinbuße erleiden.

Plastische Verformung durch die Schnittkräfte: Gewöhnlich handelt es sich um einen Stauchprozess. Druckspannungen überlagern sich dabei mit den Wärmespannungen.

Riefenbildung ist von erheblicher Bedeutung für die erzielbare Schwingfestigkeit (Bild 16.2.2.1-7). Die Kerbwirkung von Schleifriefen macht sich mehr im HCF-Bereich als im LCF-Bereich bemerkbar.

„Peppering“: Hinter dieser Bezeichnung verbirgt sich eine Oberflächenbeschädigung in Form vieler kleiner Einschläge, vergleichbar denen eines abrasiven Strahlprozesses. Dieser Effekt beruht auf Abprallern oder dem Auftreffen von Partikeln der Scheibe und von Spänen die vom Kühlmittelstrahl mitgeführt werden.

Zuschmieren von Rissen: Erfahrungsgemäß werden gerade bei Nickellegierungen Schleifrisse vom Bearbeitungsvorgang zugeschmiert. Deshalb ist eine ausreichend sichere Auffindbarkeit erst nach einem geeigneteren Wärmebehandlungszyklus (Bild 17.3.1-1) zu erwarten.

Natürlich hängt die Auswirkung der Verfahrenseinflüsse auch von den Eigenschaften des jeweiligen Werkstoffs ab. Neben physikalischen Daten wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmedehnung und E-Modul spielt das Gefüge eine wichtige Rolle. Damit kommen vorhergegangene Fertigungsschritte wie Rohteilherstellung, und Wärmebehandlung ins Spiel.

Je nach Schleifbedingungen können diese Werkstoffeigenschaften unterschiedliches Gewicht haben und sich kombinieren. Risse (Schleifrisse) können je nach Werkstoff und Schleifbedingungen während des Zerspanungsvorgangs und/oder danach (verzögert) auftreten (Skizze unten). Gewöhnlich werden mehrere senkrecht zur Zerspanungsrichtung orientierte Schleifrisse beobachtet.

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung

Die Vorgänge im Bereich einer Schleiffläche bestimmen das spätere Betriebsverhalten des Bauteils.

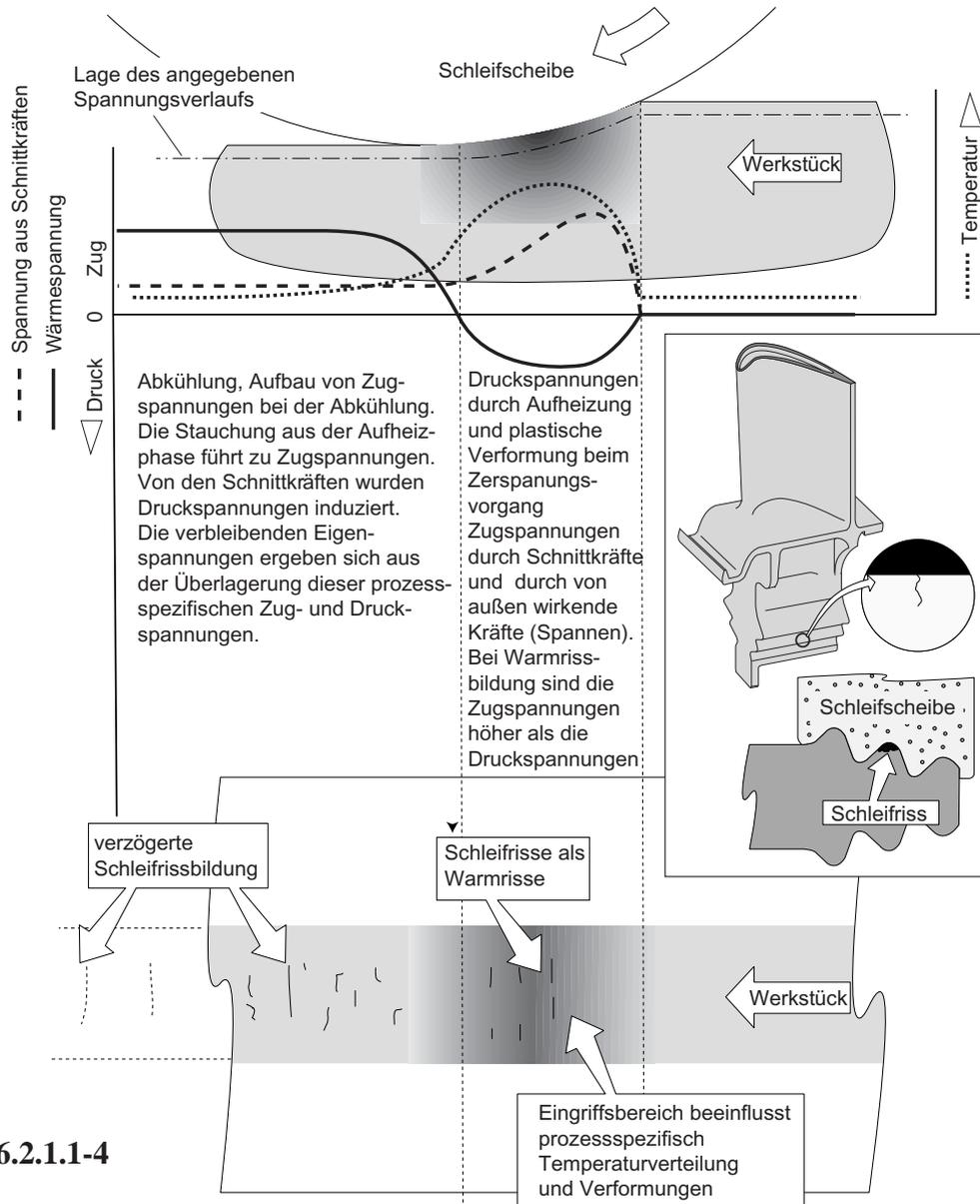


Bild 16.2.1.1-4

Dieser **Rissverlauf** erklärt sich aus Temperatur- und Verformungsverteilung (Lit 16.2.1.1-4) in der Werkstückoberfläche. Er wird von **umfassten Schleifkonturen** wie Kanten oder Höcker bei Formscheiben (mittlere Skizze) beeinflusst. In solchen Fällen trägt der behinderte **Kühlmittelzutritt** sowie die große Zerspanungsfläche im Verhältnis zum Wärmeableitenden Volumen zu einer Überhitzung mit Rissbildung bei.

Bild 16.2.1.1-5 : Schleiffrisse sind ein typisches Problem (Lit.16.2.1.1-1 und Lit. 16.2.1.1-26) der Bearbeitung hochpräziser Anlageflächen an Deckband und Fuß von Turbinenschaufeln (Skizze oben links). Das typische Erscheinungsbild sind, bevorzugt auf konvexen Konturen, quer zur Schnitttrichtung orientierte Rissfelder (Skizze unten links). Die Risse verlaufen bevorzugt entlang spröder Phasen wie Karbiden. Je

Schleifrisse sind ein typisches Problem der Fertigung von Turbinenschaufeln.

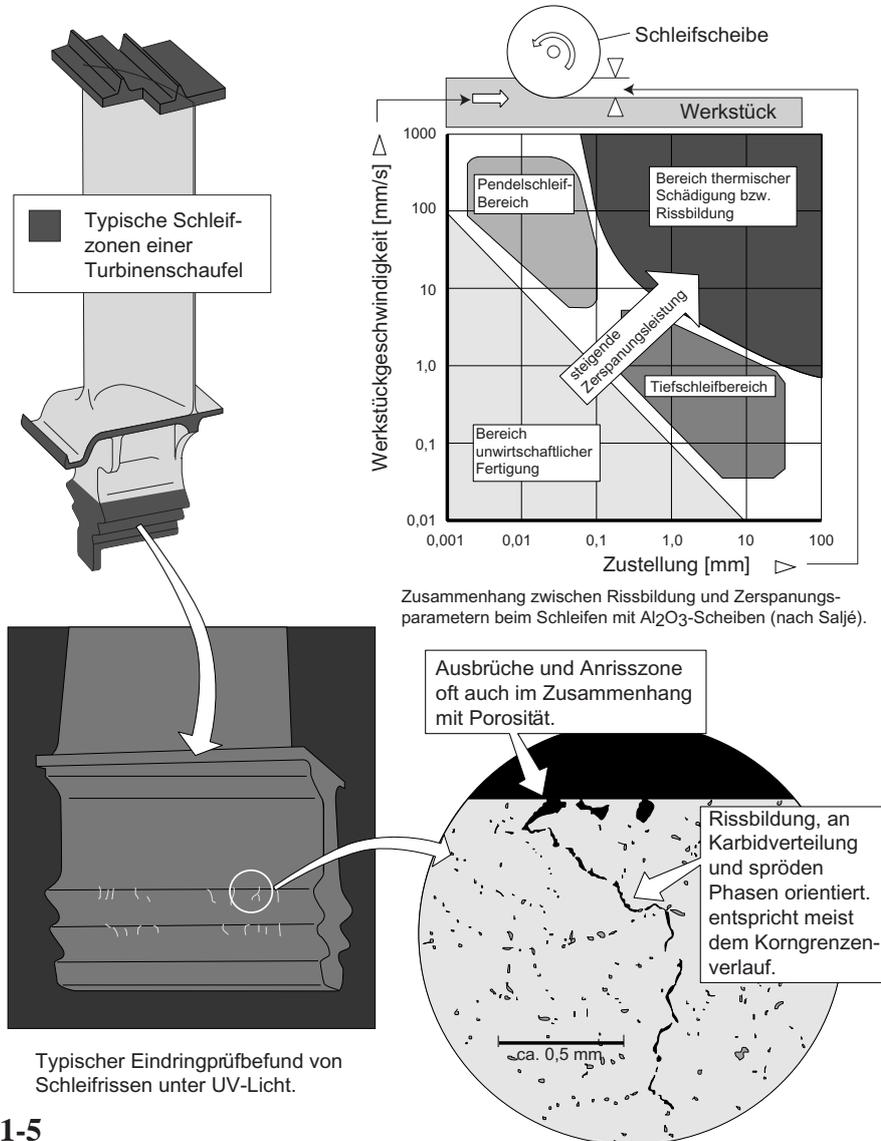
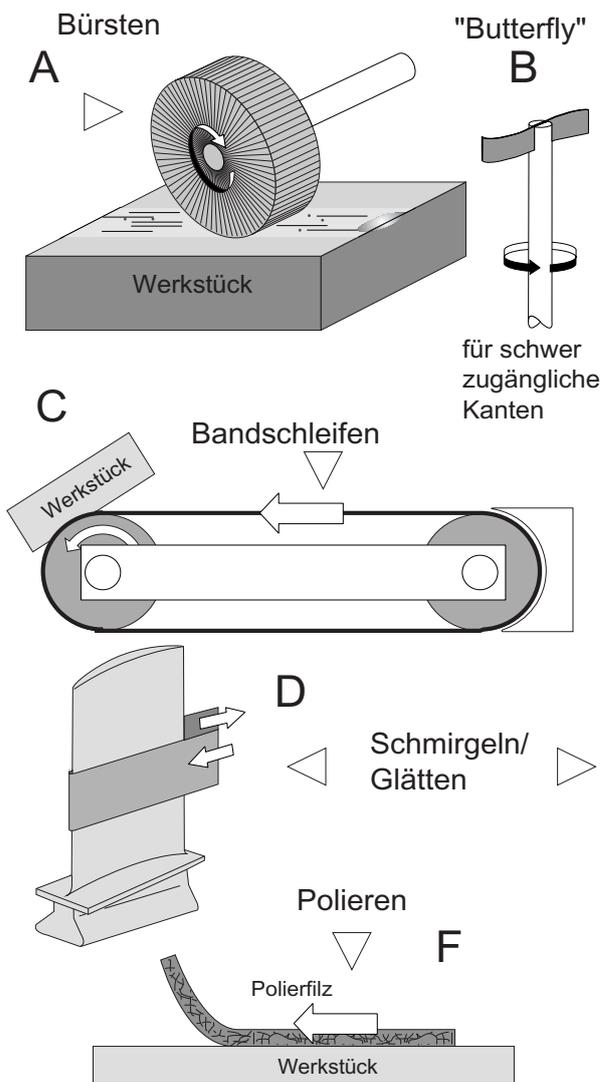


Bild 16.2.1.1-5

stärker diese werkstoffspezifisch ausgeprägt sind (Detail), um so mehr besteht eine **Tendenz zur Schleifrissebildung**. Deshalb spielt das Gefüge eine Rolle bei der Beurteilung der „Schleifbarkeit“ eines Werkstoffs bzw. Gefüges. **Besonderheiten des Gießprozesses** können sich chargenabhängig bemerkbar machen. Schleifrisse orientieren sich auch an Mikrolunkern. Diese können geöffnet werden und den Eindringsprüfbefund so beeinflussen, dass **Rissbildung und Porosität verwechselt** werden. Andererseits besteht die Gefahr eines Verschmierens der Schleifrisse. Deshalb wird

gewöhnlich nach dem Schleifprozess, vor der Eindringsprüfung ein Warmbehandlungszyklus zur Rissöffnung eingesetzt (Bild 17.3.1-7). Das Diagramm oben rechts zeigt beispielhaft die **Einschränkungen der Schleifparameter um unter ökonomisch sinnvollen Bedingungen Schädigungen zu vermeiden**. Einestils versucht man in einem wirtschaftlichen Bereich oberhalb einer Mindestzerspanungsleistung zu arbeiten. Auf der anderen Seite begrenzt die thermische Schädigung (Bild 16.2.1.1-2) die Zerspanungsleistung.

Potenzielle Probleme handgeführter Feinbearbeitung, Entgraten und Verrunden mit Hartpartikeln auf einem flexiblen Träger (Schmirgelleinen, Schmirgelpapier).



- Eisen, Bronze oder Messing-Auftrag von den Borsten:
 - Korrosion, bei Eisenabrieb Rost
 - Reaktionen mit Grundwerkst.
 - Abscheidung und/oder Haftung von Schichten
 - Begünstigen von Wasserstoffversprödung
- SiC-Partikel mit Gefahr der Werkstoffschädigung von Heißeilen im Betrieb
- Übertragung von Fremdmaterial von einem Bauteil auf das andere:
 - Korrosion,
 - Haftprobleme von Schichten
 - Gratbildung
- Riefenbildung
- Überhitzung der Bearbeitungsfläche
 - durch den Bearbeitungsvorgang
 - Überhitzung durch Funken

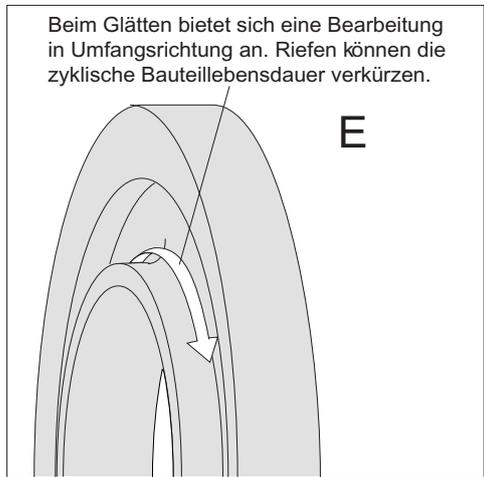


Bild 16.2.1.1-6

Bild 16.2.1.1-6: Das „handgeführte“ Entgraten, Glätten und Verrunden hartpartikelbestückter, flexibler, flächiger Träger und Bürsten mit Borsten aus Werkstoffen wie Stahldrähten oder Messingdrähten, kann durchaus problematisch sein (Bild 16.2.2.3-11 und Bild 16.2.2.3-13). Es gibt für das Werkstück mehr Schädigungsmöglichkeiten als auf den ersten Blick erkennbar:

Aufschmieren von Borstenmaterial („A“): Abhängig vom Bauteilwerkstoff sind viele Schadensmechanismen möglich (Bild 16.2.2.3-1, Bild 16.2.2.3-2, Bild 16.2.2.3-11, Lit 16.2.1.1-18). **Stahlbürsten** aus Kohlenstoffstahl hinterlassen z.B. auf **Titanscheiben** Rückstände die im Betrieb **Korrosion** auslösen (Lit. 16.2.1.1-20). Eine besondere Gefahr besteht für Oberflächen mit metallischen Aufschmierungen

die einer **Wärmebehandlung** unterzogen werden. Es kann bei Ni- und Ti-Legierungen wie bei Stählen mit werkstoffspezifischen Aufschmierungen, zu **LME-Rissbildung** kommen (Bild 16.2.2.3-11).

Für Titanlegierungen besteht die erhöhte Gefahr unzulässiger Veränderungen (Festigkeit, Zähigkeit) durch **Wasserstoffaufnahme in Ätz- und Reinigungsbädern** (Bild 16.2.2.3-13). Beobachtet wurde, dass Fe-Verunreinigungen der Oberfläche, beim **Schweißen von Ti-Legierungen**, mit der Bildung spröder Phasen, Risse begünstigen können (Bild 16.2.1.3-19). Weiter besteht die potenzielle Gefahr, dass Beschichtungen wie Diffusionsschichten, Lackierungen und galvanische Beschichtungen beeinflusst werden.

Reaktionen mit Schleifkörnern: SiC-Partikel können bei hohen Temperaturen, wie sie bei Wärmebehandlungen, Schweißen, Löten und Diffusionsbeschichtung zu erwarten sind, mit dem Grundmaterial, insbesondere **mit Ni- und Ti-Legierungen reagieren** (Band 2, Bild 7.1.4-14). Es bilden sich spröde Phasen und Anmelzungen mit gefährlichem Festigkeitsabfall. Deshalb ist darauf zu achten, dass **nur Schleifmaterial mit unbedenklichen Hartstoffpartikeln** wie Al_2O_3 (Korund) zur Anwendung kommen. Sinngemäß gilt diese Empfehlung auch für **Polierfilze** („F“).

Übertragung von Abrieb anderer Bauteile: diese Gefahr besteht bei der **Verwendung des gleichen Glättungswerkzeugs** (z.B. „A“, „B“) **an Bauteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen**. So kann z.B. Abrieb von Titanlegierungen auf Ni-Legierungen und umgekehrt übertragen werden. Die Gefahren sind dann mit den bereits beschriebenen Aufschmierungen vergleichbar (Bild 16.2.2.3-1).

Gratbildung: Grate können die Schwingfestigkeit deutlich herabsetzen (Kapitel 16.2.2.2). Gerade weil Glättungsverfahren besonders zum Entgraten angewendet werden,

ist darauf zu achten, dass dabei nicht neue Grate auftreten.

Riefenbildung: Kann an hochbeanspruchten Bauteilzonen Schwinganrisse begünstigen (Bild 16.2.2.1-7 und Bild 16.2.2.1-8). Leider „**provokiert**“ oft die **Bauteilform mit ihrer Zugänglichkeit eine Bearbeitungsrichtung quer zur Hauptbetriebsspannung**. Typisches Beispiel ist die Kantenverrundung an Schaufelblättern („D“) und die Glättung von Übergangsradien an Scheiben („E“, Bild 16.2.2.2-8).

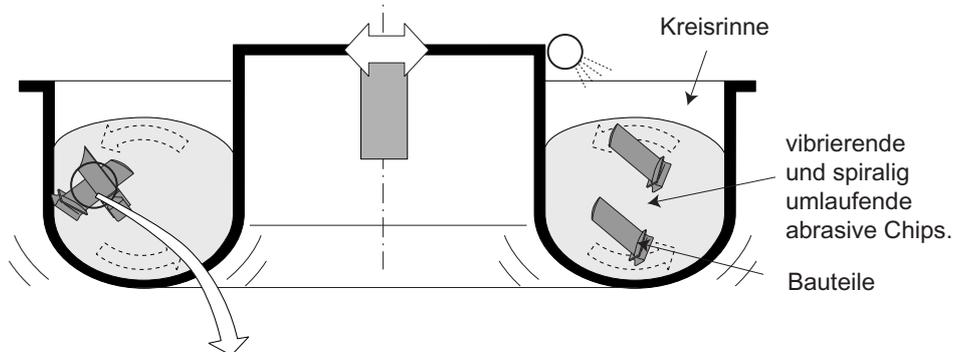
Überhitzung: Eine Gefügeveränderung bis hin zur Rissbildung, kann die Bauteilfestigkeit unzulässig absenken. Die **Gefahr unbemerkter Überhitzungen** durch den Bearbeitungsvorgang ist nicht zu unterschätzen (Bild 16.2.1.1-8.2). **Warnende Verfärbungen (Anlauffarben)** sind das einzige äußere Anzeichen für eine mögliche Schädigung (Bild 16.2.2.6-11) können im selben Bearbeitungsvorgang wieder entfernt werden. Damit gewinnt die **fachkundige Beobachtung des Prozesses durch den erfahrenen Werker** besondere Bedeutung (Bild 17-5).

Eine weitere gefährliche Überhitzungsmöglichkeit ist durch das Auftreffen von Funken bei einem intensiven Glättungsprozess, z.B. am Schleifband („C“) gegeben (Bild 16.2.2.6-4).

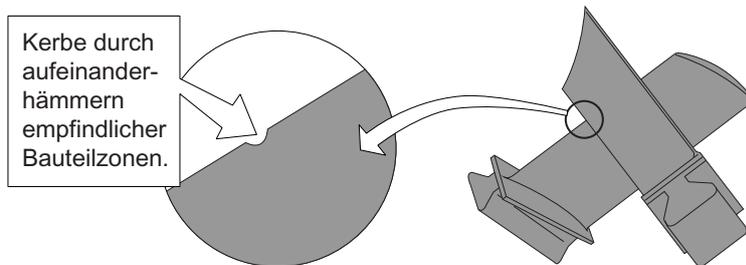
Bild 16.2.1.1-7: Obwohl der Abtragungsvorgang beim **Vibrationsschleifen** (Lit. 16.2.1.1-1 und Lit. 16.2.1.1-3, Skizze oben) äußerst schonend ist, kann es doch zur Beschädigung von Werkstücken kommen. Möglichkeiten sind **verstärkter örtlicher Abtrag** an exponierten Bauteilzonen (Skizze unten rechts) und längeres örtliches Einwirken einzelner Bearbeitungschips möglich werden. Intensiver dürften sich jedoch Beschädigungen während einer ungünstigen **Berührung der Bauteile** beim Bearbeitungsprozess auswirken (mittlere Skizze). Problema-

Probleme beim Vibrationsschleifen

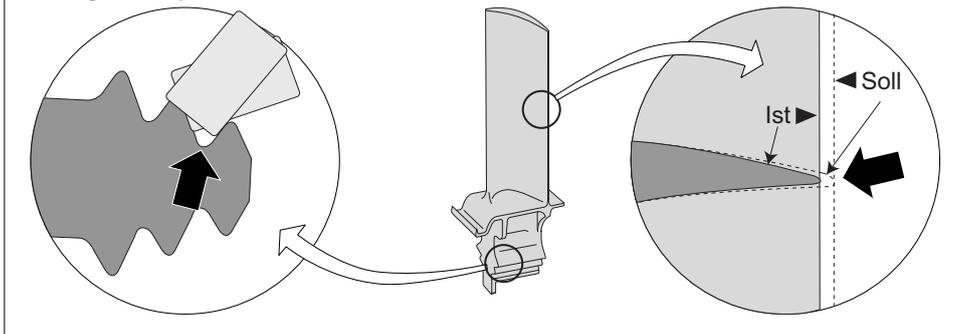
Schematische Darstellung einer Anlage zum Vibrationsschleifen



Vibrationsschleifen kann auch Beschädigungen erzeugen.



Ungünstige Chipgeometrie verhindert Abtragung in Kerben. Dies sind gewöhnlich auch hochbeanspruchte Bauteilzonen. Dafür ist ein verstärkter Abtrag an exponierten Außenkanten zu erwarten.



Bei chemischer Unterstützung des Vibrationsschleifens mit einem Cl-haltigen Medium besteht für Bauteile aus Ti-Legierungen die Gefahr einer Rissbildung durch Spannungsrissskorrosion!

Bild 16.2.1.1-7

tisch kann auch fehlender Abtrag sein. Die örtliche Bauteilform kann den Kontakt mit den (engl. „Chip“) verhindern (Skizze unten links). So besteht die Möglichkeit, dass unerwünschte Grate und Riefen nicht entfernt werden.

Eine scheinbar kleine Abweichung vom erprobten Fertigungsablauf kann gravierende Folgen haben.

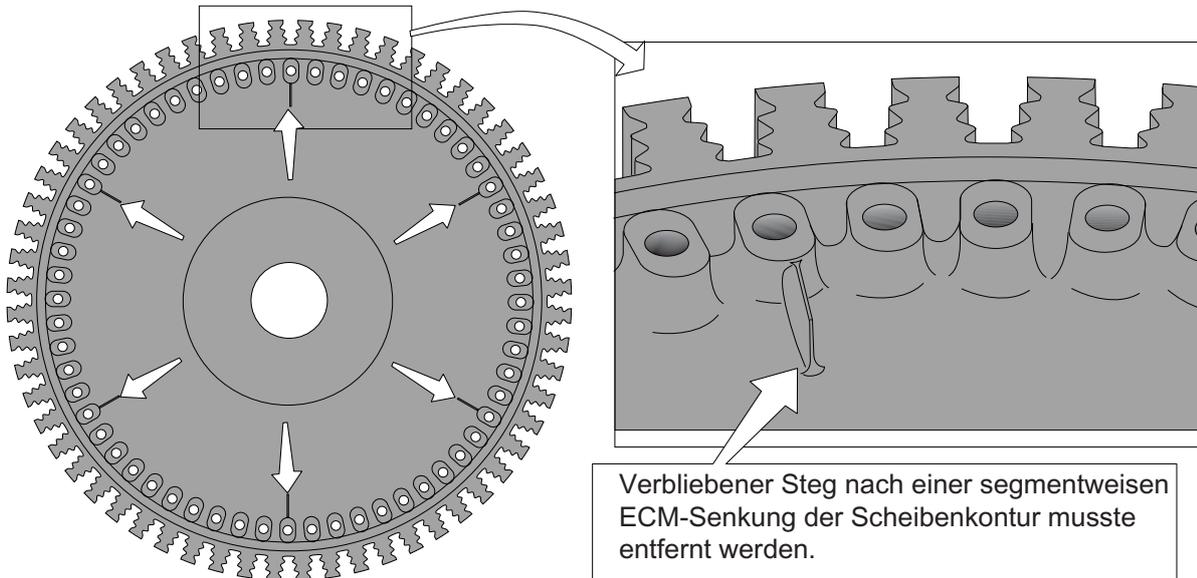


Bild 16.2.1.1-8.1

Bild 16.2.1.1-8.1 (Lit.16.2.1.1-9, -10, -11): Dieser spektakuläre Schadensfall wurde von einer **fertigungsbedingten Schwachstelle** in einer nicht „bewussten“, sehr hoch zyklisch (LCF) belasteten Scheibenzone, begünstigt. Während einer Übergangszeit musste zur ECM Herstellung der komplexen Kontur im Kranzbereich der Turbinenscheibe, segmentweise vorgegangen werden. Es entstanden am Umfang verteilt mehrere dünne, radial verlaufende Stege (Skizze rechts). Diese Stege waren nachträglich zu entfernen. Das geschah in der **Endbearbeitung handgeführt** zerspanend (Bild 16.2.1.1-8.2). Dabei wurde die hochbeanspruchte Radiuskontur in einzelnen Fällen unbemerkt **überhitzt**. Ein leichter Abfall der LCF-Festigkeit genügte für gravierende Folgen (Bild 16.2.1.1-8.2).

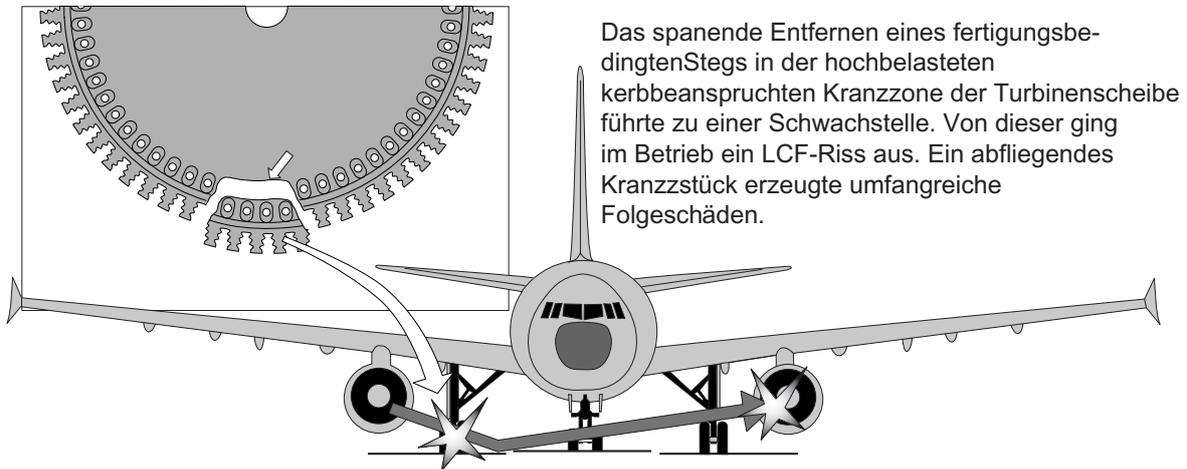
Bild 16.2.1,1-8.2 (Lit.16.2.1.1-9, -10, -11): Während des Starts eines Verkehrsflugzeugs kam es zum **Scheibenschaden mit Bruchstückaustritt**. Das Bruchstück prallte

von der Landebahn ab, zerstörte Reifen des Fahrwerks und beschädigte das zweite Triebwerk (Skizze oben). Trotz eines Feuers gelang die Evakuierung des Flugzeugs ohne Personenschäden.

Die Schadensuntersuchung zeigte, dass die Scheibe als Folge eines LCF-Anrisses im Bereich einer Bearbeitungsstelle versagte. Während der Neuteilfertigung erfolgte eine Nacharbeit am Übergangsradius zu einem Höcker (engl. „Boss“) in der Nähe der Kranzkontur (Bild 16.2.1.1-8.1). Offenbar war die Scheibe dieser Zone geschädigt worden (Rahmen unten). Schädigungsmodi werden in Bild 16.2.1.1-2 und Bild 16.2.1.1-4 beschrieben. Eine Vielzahl von Triebwerken war potenziell betroffen. Einige gelaufene Scheiben zeigten bei der Überprüfung bereits Rissbildung. Umfangreiche Nacharbeits- und Abhilfeaktionen wurden notwendig.

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung

Die manuelle mechanische Nacharbeit ist eine anspruchsvolle und verantwortungsvolle Aufgabe.



Potenzielle Mängel bei örtlicher mechanischer Nacharbeit

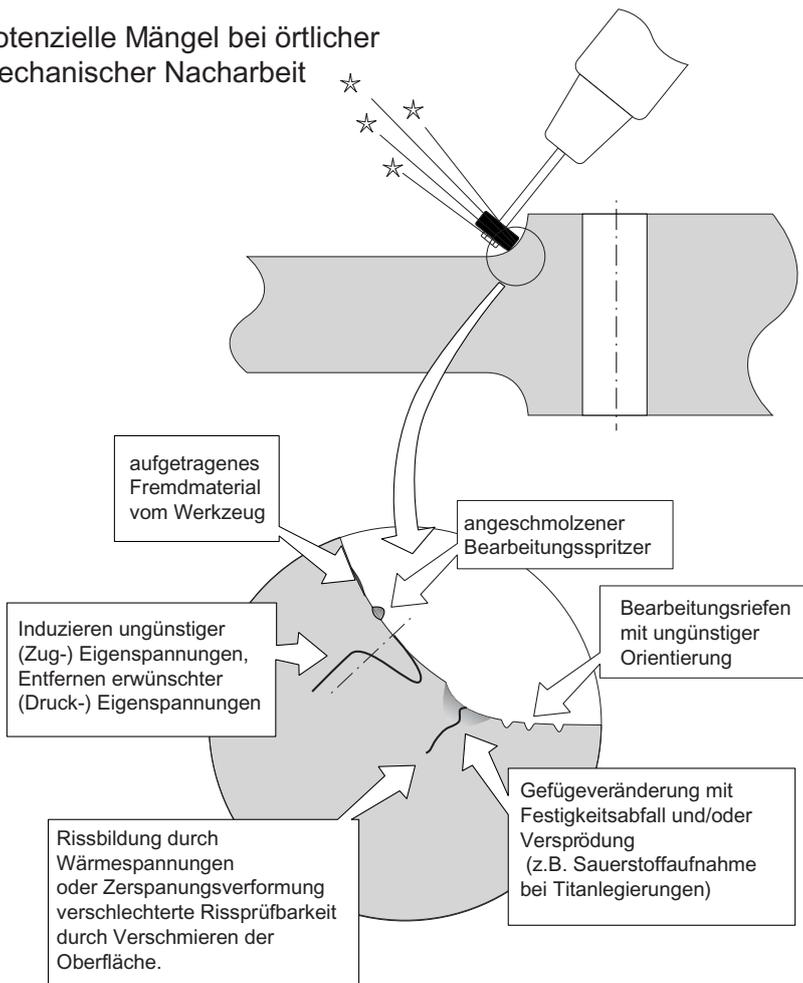


Bild 16.2.1.1-8.2

Bild 16.2.1.1-9.1, -9.2, -9.3, -9.4, -9.5, -9.6: Dieser Schaden ist äußerst lehrreich. Er wird deshalb in mehreren Bildern entsprechend Angaben aus dem „Aircraft Accident Report“ NTSB/AAR-98/01 (Lit. 16.2.1.1-13) möglichst anschaulich dargestellt.

Ablauf des Flugunfalls (Bild 16.2.1.1-9.1): Der Triebwerksschaden entstand an einer kleineren Verkehrsmaschine mit zwei hinten montierten Triebwerken (Skizze oben). Das Ereignis trat zu Beginn des Starts ein. Bruchstücke der **Fanscheibe** (Skizze unten links) und Schaufeln traten aus dem linken Triebwerk und durchschlugen die benachbarte Seite der Flugzeugzelle. Daraufhin wurde der Start abgebrochen und das Flugzeug kam auf der Startbahn zum Stehen. Zwei Passagiere verloren durch die Bruchstücke das Leben, zwei wurden schwer verletzt.

Die Schadensuntersuchung ergab, dass die Schadensursache in einem LCF-Schwingbruch der Fanscheibe, die aus einer hochfesten Titanlegierung gefertigt ist, zu suchen war. Der Bruch ging von einer der Bohrungen der Verschraubung zum Flansch der Niederdruckwelle, aus. Es zeigte sich, dass sie im Anrissbereich einer, offenbar beim Fertigungsprozess geschädigten Bohrungswand lag (Skizze oben links, Bild 16.2.1.1-9.2).

Schadensuntersuchung und Befund (Bild 16.2.1.1-9.3): Zuerst war die Art der Schädigung am Anriss zu klären (Bild 17-11). Eine weitere Frage ist, warum diese Schädigung nicht im Rahmen der Neuteilfertigung erkannt wurde.

Die Scheibe wurde aus der hochfesten Titanlegierung Ti-6Al-4V gefertigt.

Im Bereich der Fehlstelle weist die Bohrungswand auf ca. 23 mm Länge Bearbeitungsriefen und Verfärbungen auf (Detail oben rechts).

Ein metallografischer Schliff ließ im Anrissbereich eine ca. 0,25 mm tiefe Gefügeveränderung mit Mikrorissen (engl. „**ladder**

cracking“) erkennen. Im Schädigungsbereich lag die Härte mit 52 HRC deutlich höher als die maximal zulässigen 39 HRC. Makrorisse lagen nicht vor. Es ließen sich drei Gefügezonen unterscheiden (Detail Mitte rechts).

Zone 1: Rekristallisierte Körner aus α -Phase entstehen bei Temperaturen oberhalb 650°C. Weil eine solche Gefügeveränderung mit zeitabhängigen Diffusionsprozessen verbunden ist gilt: je kürzer die Temperatur einwirkte, umso höher muss sie gewesen sein. Es ist also für die relativ kurzen Aufheizzeiten eines Bohrprozesses zu erwarten, dass die Temperaturen deutlich höher als der Grenzwert für die beobachtete Gefügeveränderung lagen. Zusätzlich wurde eine **Eisenanreicherung** in der Bohrungsoberfläche nachgewiesen. Es darf auf Grund dieser Befunde spekuliert werden, dass der Bohrer zumindest Anlauffarben zeigte, möglicherweise glühte (siehe Reproduktionsversuche, Seite 16.2.1.1-23).

Bei solchen Temperaturen nehmen Titanlegierungen Sauerstoff aus der Luft auf. Das stabilisiert die α -Phase. Eine solche Temperatur ist bei schneidendem Bohrer und ausreichender Kühlung, wie sie der vorgeschriebene Bohrvorgang gewährleisten müsste, nicht zu erwarten.

Zone 2: Dieser unterhalb Zone 1 liegende Bereich weist stark parallel zur Oberfläche verformte Körner auf. Die darunter liegende **Zone 3** zeigt Gefüge mit einer in Umfangsrichtung „verbogenen“ Mikrostruktur.

Eine elektronenmikroskopische Auswertung der Bruchfläche (Bild 17.3.2-7) ergab (Bild 16.2.1.1-9.3), dass beim Schadenseintritt nach 16545 Betriebsstunden mit 13 835 Start/Abstellzyklen der LCF-Riss eine kritische Länge von 37,5 mm erreicht haben musste. Er ging von zwei, dem Bohrvorgang zuordenbaren Fehlstellen in ca. 7,5 und 12,5 mm Abstand von der Scheibenoberfläche aus.

Die Untersuchungsergebnisse ließen folgende **Rückschlüsse auf die Schadensentstehung** zu:

Fortsetzung auf Seite 16.2.1.1-22

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung

Fanscheibenbruch als Folge von Fertigungsproblemen bei der Herstellung der Bohrungen für die Befestigungsbolzen.

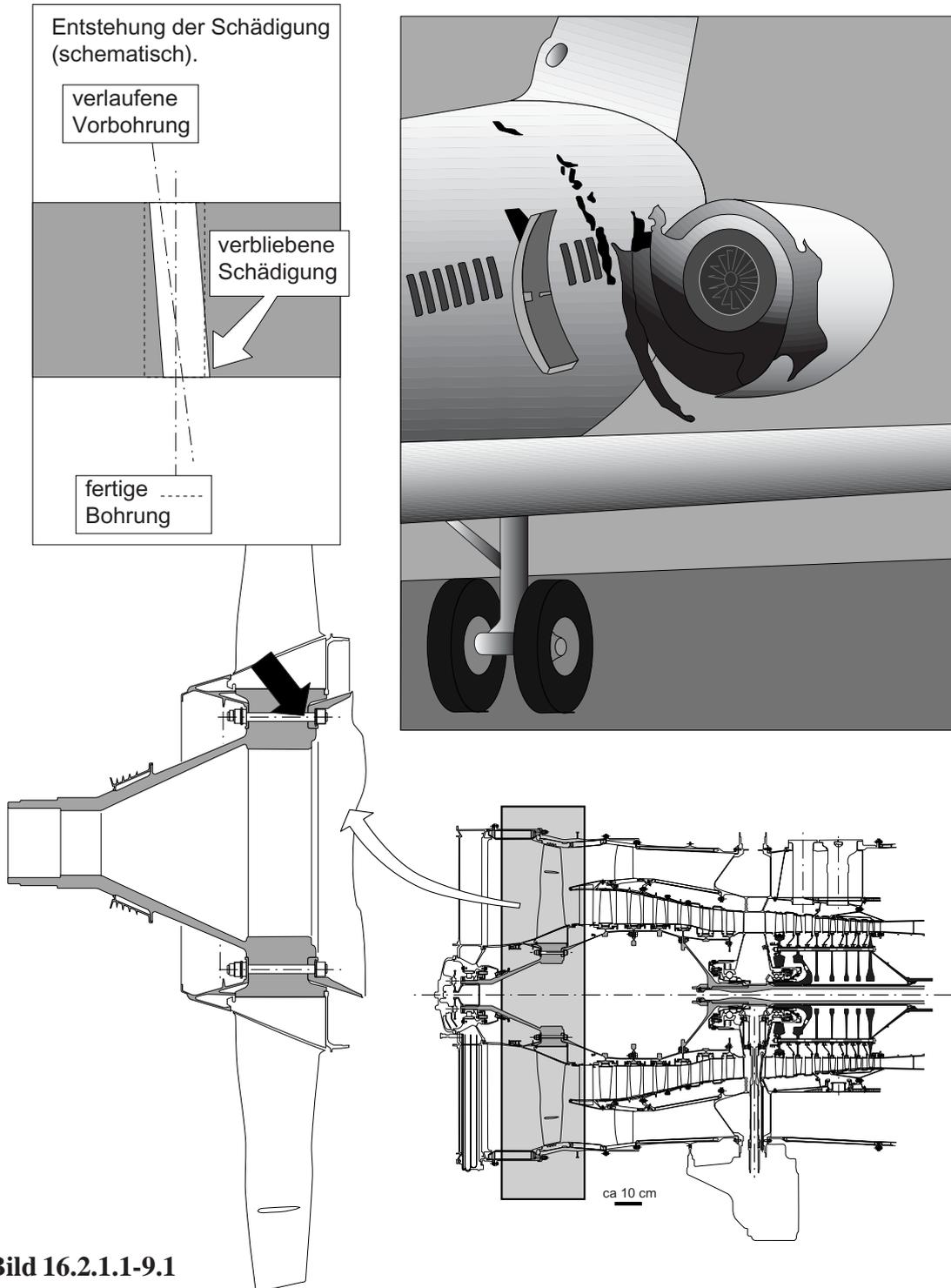
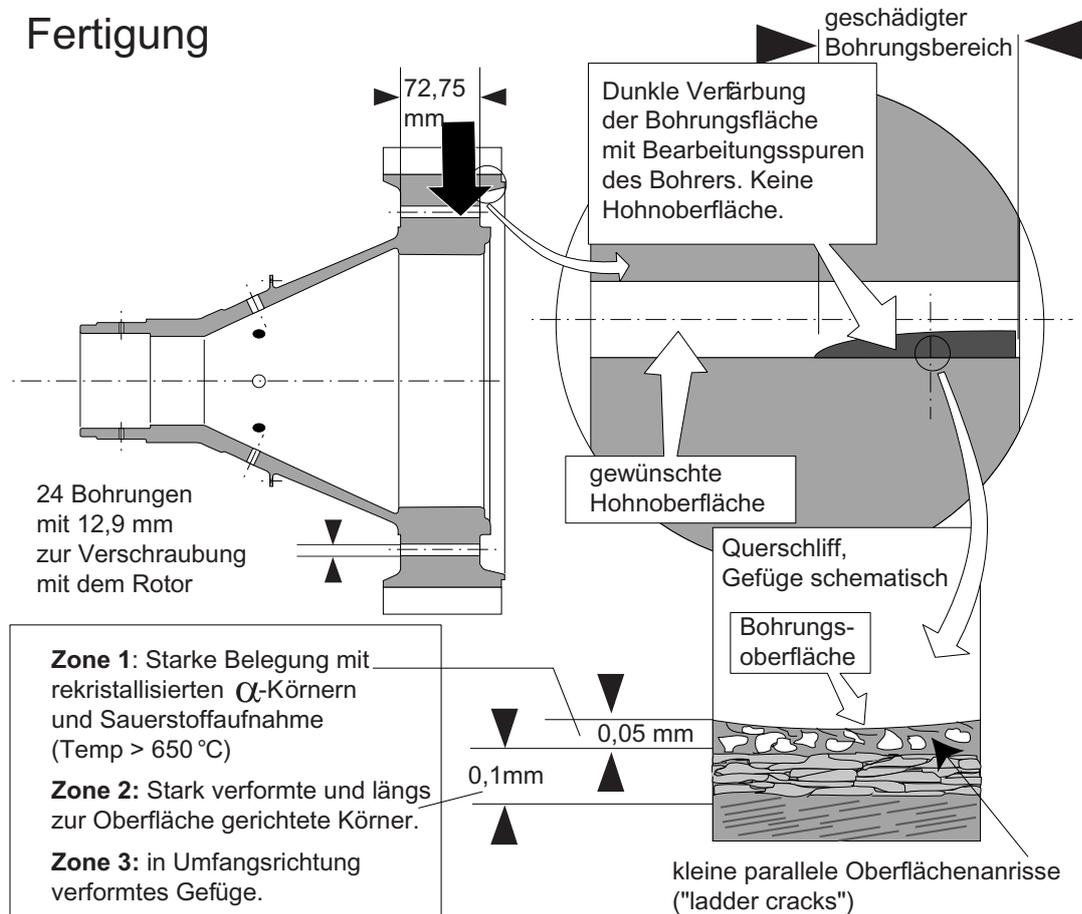


Bild 16.2.1.1-9.1

Schadensrelevante Besonderheiten des Pensacolaunfalls.

Fertigung



Inspektionsvorgang:

- Nach dem Bohren Blue Etch anodize (BEA) und visuell.
- Fertiges Teil: visuell, Eindringprüfung (Fluorescent Penetrant Inspection = FPI).

Problem der visuellen Prüfung: Siehe Bild 16.2.1.1-9.3

- Zu geringer Brennpunktstand
- Spiegelung in der Bohrung verhindert das Erkennen von Details.

Problem der FPI: Siehe Bild 16.2.1.1-9.4

Trocknung, Verteilung des Entwicklers, Zeitablauf, Human factors (monoton, Frust), Verschmutzung von Oberfläche und Reinigungsflüssigkeit, Hintergrundfluoreszenz.

Fehlstelle: Bearbeitungsriefen und Verfärbung ca. 23 mm, Gefügeveränderung (unter 0,25 mm), Mikrorisse, erhöhte Härte (52 HRC statt max zul. 39 HRC). **Kein makroskopischer Riss**

Bild 16.2.1.1-9.2

Bildbeschreibung auf Seite 16.2.1.1-18, - 22, und - 23

Rissgrößen und Lebensdauer bei Scheibenbruch

Schaden bei 16 545 Betriebsstunden mit 13 835 Start/Abstellzyklen.
Die zulässige Betriebszeit bis zum Austausch liegt bei 20 000 Zyklen

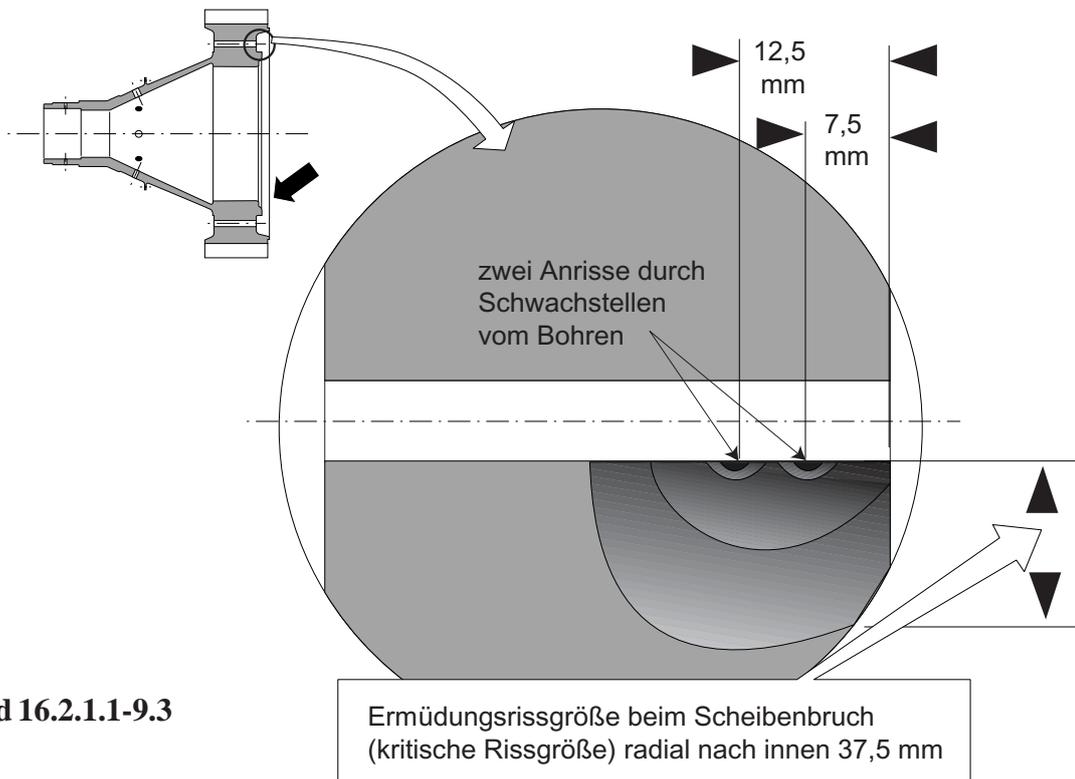


Bild 16.2.1.1-9.3

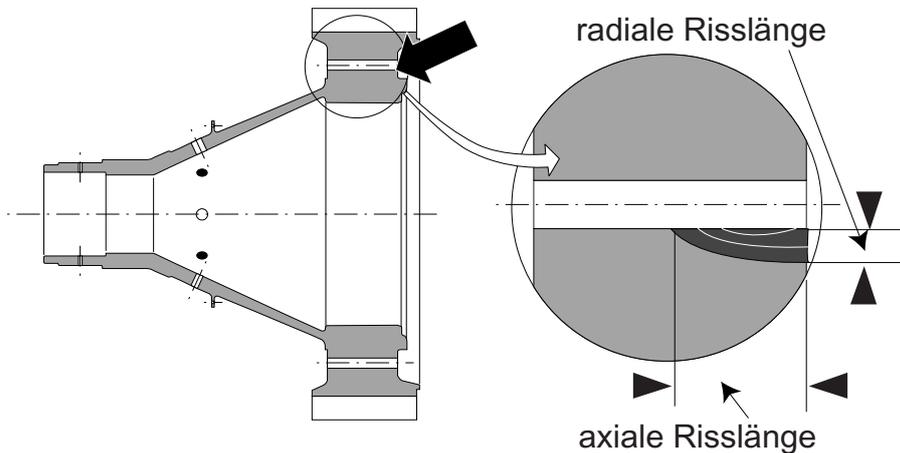
Schlussfolgerungen zur Schadensentstehung:

- Eine Form von Bohrerbruch oder Versagen des Bohrvorgangs in Kombination mit örtlichem Kühlflüssigkeitsmangel und Späneansammlung führte beim Schadensteil während des Bohrvorgangs zur Veränderung der Gefügestruktur und Mikrorissbildung ("ladder cracking").
- Von den Mikrorissen in den Bohrungen wuchsen sofort nach der Inbetriebnahme Ermüdungsbrüche.
- Obwohl das veränderte Gefüge in der Bohrung des Unfallteils durch "Blue Etch Anodizing" (BEA) auffindbar war, wurde es nicht als unzulässiger Fehler erkannt, weil die Mustertafel keinen entsprechenden Fehler zeigte.
- Weitere unzulässige BEA-Anzeigen können vorhanden gewesen sein, wurden jedoch nicht erkannt.
- Die Schädigung vom Bohren verlief viel tiefer in die Bohrungswand als vom OEM für das Verfahren angenommen worden war.

Bild 16.2.1.1-9.3

Inspektion bei den Überholungen

nach 4 456 Zyklen erfolgte eine visuelle Inspektion beim Betreiber im Rahmen eines "Shop visit" für einen Wartungsvorgang an der Beschaufelung.



Inspektionsvorgang: Bohrungen von beiden Seiten bei weißem fluoreszierenden Licht mit 3 x Vergrößerung auf Kratzer, Eindrücke und Korrosionsnarben.

Ergebnis/Entscheidung: Keine Nacharbeit

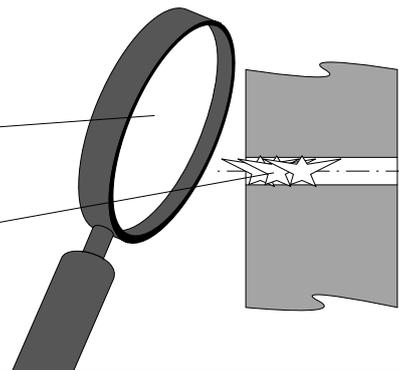
Problem: - Zu geringe Tiefenschärfe der Lupe,
- Spiegelung in der Bohrung verhindert das Erkennen von Details.

Bild 16.2.1.1-9.4

Fehlstelle: Wahrscheinliche Ermüdungsrissgröße
axial 0,5 mm, radial 0,25 mm

Problem der visuellen Prüfung:

- Zu geringe Brennweite
- Spiegelung in der Bohrung verhindert das Erkennen von Details.



Fortsetzung von Seite 16.2.1.1-18

Die Schädigungen im Anrissbereich sind auf ein Versagen des **Bohrvorgangs** zurückzuführen (Bild 16.2.1-9.2). Als Rissstarter wirkten Mikrorisse. Die Tiefe der Schädigung ging deutlich über die Erwartung für einen unbemerkten Ausfall des Bohrverfahrens hinaus.

Weiter war zu klären, wie es möglich sein konnte, dass eine so gefährliche Schädigung nicht während oder nach dem Fertigungsprozess erkannt wurde.

Das Neuteil wurde beim Hersteller vermessen und einer visuellen Prüfung sowie einer Eindringprüfung und einer Makroätzung (**elek-**

trochemisches Anodizierverfahren, engl. „Blue Etch Anodizing“ = BEA) unterzogen. In diesem Ablauf werden die Bohrungen auf Verlauf, Zentrierung und Durchmesser überprüft. BEA reagiert auf Gefügeveränderungen (z.B. α - und β - Ansammlungen, ungewöhnliches Kornwachstum, Schmiedefalten) und zeigt diese als Verfärbungen (ähnlich Anlauffarben) an. Das Verfahren ist auf alle Titanlegierungen anwendbar. Beim Vorbohren wurden vom **Werker an zwei Löchern Rattermarken beobachtet**. Nach dem folgenden Bohren und Hohnen auf Maß waren diese Bearbeitungsspuren offenbar nicht mehr zu erkennen. Darauf wurde das Bauteil frei gegeben. Bei der folgenden BEA-Prüfung wurden in einer Bohrung „Herstellungsmarkierungen“ festgestellt. Die Anzeige entsprach keinem der zu dieser Zeit vorliegenden **Vergleichsbilder** für fertigungsbedingte Schädigungen und wurde **nicht als BEA-Anzeige eingestuft**. Die Fertigungsunterlagen zum Schadensteil enthielten somit keinen Hinweis auf eine Schädigung. Beim Versuch die **Schädigung der Bohrung zu reproduzieren**, gelang dies nur mit vollkommenem Abschalten der Kühlflüssigkeit, unvorschriftsmäßig hoher Bohrerzahl und großem Vorschub. Der Versuch führte zum **Bohrerbruch** oder zum Versagen des Bohrers und zum **Spänestau** (Bild 16.2.2.5-3). Neben typischen Gefügeveränderungen wurde auch eine hohe Eisenkonzentration (Bohrermaterial), entsprechend dem Schadensfall, an der Bohrungswand gefunden. Mit den nachfolgenden „maßgebenden“ Verfahren (Hohnen) ließen sich vergleichbare Schädigungen nicht erzeugen.

Die Kontrolle der Bohrungen mit Eindringprüfung und BEA erfolgt sowohl an den Neuteilen als auch bei Überholungen (Bild 16.2.1.1-9.4). Beide Prüfungsanzeigen der Bohrungen wurden beidseitig visuell unter Verwendung einer Lupe ausgewertet. Das Problem der verwendeten **Lupe war die geringe Tiefenschärfe**. Dadurch war eine ausreichende Übersicht nicht gegeben. Erschwert wurde die Bewertung

von der spiegelnden Bohrungsoberfläche, was Details nicht erkennen ließ.

Der **Schadensablauf** dürfte sich entsprechend den Untersuchungsergebnissen wie folgt abgespielt haben:

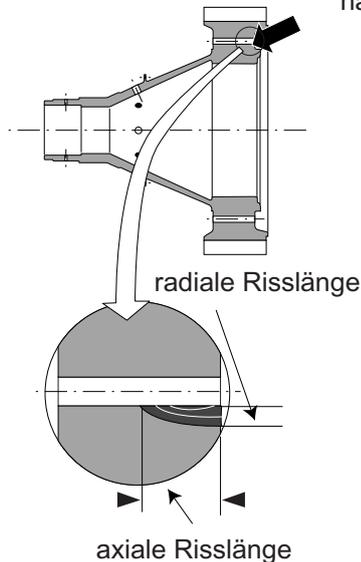
Bei ersten Überholungen kann man von ca. 0,5 x 0,25 mm großen LCF-Rissen ausgehen. Die letzte Überholung („Heavy Maintenance“) erfolgte vor dem Schadenseintritt bei 12 693 Zyklen (Bild 16.2.1.1-9.5). Entsprechend der Bruchflächenauswertung dürfte bei der letzten Überholung bereits ein Riss von axial 20mm und radial 10 mm Länge vorhanden gewesen sein.

Wie ist zu erklären, dass ein Riss solcher Größe nicht erkannt wurde? Man kann in diesem Zusammenhang wohl von „**Human Factor**“ sprechen (Bild 17.3.1-9). Dazu gehören erfahrungsgemäß ein Überschreiten des „Erwartungshorizonts“ und fehlende Erfolgserlebnisse (Frustration) weil nur sehr selten ein solcher Fehler auftritt. Weitere Probleme sind ein nicht optimaler Ablauf der Vorbehandlung (Verschmutzung) und des Prüfprozesses wie Zeitabläufe, Verteilung des Entwicklers und Trocknung.

Ein **Audit der Eindringprüfung (FPI)** beim Hersteller und den Überholwerkstätten ließ potenzielle Mängel erkennen (Bild 16.2.1.1-9.5). Es existiert eine erstaunliche Zahl an **Möglichkeiten, ein scheinbar einfaches zerstörungsfreies Prüfverfahren wie das Eindringverfahren in seiner Effektivität zu beeinträchtigen** (Bild 16.2.1.1-9.6). Damit ist beispielhaft die **notwendige erfahrungsbasierte Expertise und die Einhaltung von Vorschriften sowie die kritische Beobachtung eines Prüfprozesses** aufgezeigt.

Eindringprüfung im Rahmen der "Heavy Maintenance"

nach 12 693 Zyklen "Heavy maintenance" beim Betreiber.



Inspektionsvorgang: Eindringprüfung (FPI)

Problem: FPI Durchführung: Trocknung, Verteilung des Entwicklers. Zeitablauf, Human factors (monoton, Frust), Verschmutzung von Oberfläche und Reinigungsflüssigkeit, Hintergrundfluoreszenz,

Fehlstelle: Wahrscheinliche **Ermüdungsrisssgröße**
axial, ca. 20 mm, radial ca. 10 mm

Ein Audit des Eindringprüfungsprozesses (FPI) ergab die folgenden Mängel:

1. Es gibt keine Gewähr, dass die **Sauberkeit des Bauteils** für eine befriedigende FPI ausreichte.
2. Kein formales "**on-the-job-Training**" des Prüfpersonals. Keine **Sensibilisierung** für die Kritikalität des Bauteils im Rahmen der Schulungen.
3. Die beim Audit vorhandenen **Reinigungsmittel** waren mit fluoreszierenden Stoffen stark verunreinigt.
4. Erkennbare Asche und **Verunreinigungen** unter den **Transportrollen** der FPI-Linie. Weil keine schützenden Abdeckungen über den Behältern der FPI- **Hilfsstoffe** vorhanden waren, sind entsprechende Verunreinigungen auch in den FPI-Stoffen zu erwarten.
5. Die **Transportringe** der Teile beim FPI-Prozess konnten leicht durch fluoreszierende Stoffe verunreinigt werden. Die Bohrung war schlecht inspizierbar weil der dahinter sichtbare Transportring starke **Hintergrundfluoreszenz** aufwies. Der Versuch des Prüfers, den Ring mit den Handschuhen abzuschirmen, führte zu deren Fluoreszenz.
6. Ein Prüfer **verschmierte** vor der Prüfung den zu prüfenden Bereich durch Berühren.
7. Es scheint keine **gleichbleibende Vorgehensweise** zu geben, mit der die Teile im Prüfraum bei der **Auswertung** gehandhabt und markiert werden.

Bild 16.2.1.1-9.5

Bildbeschreibungen auf Seite 16.2.1.1-18, -22 und -23

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung

- Der **Riss war groß genug** um ihn bei der letzten FPI des Betreibers vor dem Flugunfall zu erkennen.
- Es bestehen ernste Fragen zur Zuverlässigkeit des **Trocknungsvorgangs** ("flash drying") der dazu dient, das Spülwasser aus den Rissen zu entfernen. Im Riss verbliebenes Wasser verhindert das Eindringen des Prüfföls und damit die Risserkennung.
- Bessere Techniken sind erforderlich, um die volle **Bedeckung der Bohrungswand mit Entwicklerpulver** zu garantieren.
- Es war kein System zur **zeitlichen Kontrolle des FPI-Prozessdurchlaufs** vorhanden. Dies ist ein deutlicher Mangel.
- Die FPI - Anzeigen und deren Erkennbarkeit reagieren empfindlich auf **Handling, Befestigungen und Abstützungen** der Teile. Dies kann die Aufmerksamkeit des Prüfers von bestimmten Bereichen des Prüfteils behindern.
- Ein oder mehrere Mängel der **Reinigung und Trocknung** im Ablauf des FPI-Prozesses beim Betreiber können das Erkennen des Risses verhindert haben.
- Diese Mängel können auch bei anderen Überholbetrieben vorhanden und teilweise Ursache dafür sein, dass auch in **anderen Fällen** Risse nicht festgestellt wurden.
- Es gibt **keine menschlichen und physikalischen Faktoren**, welche den FPI-Prüfer daran gehindert haben, den Riss festzustellen.
- Der versehentliche Fehler des Prüfers, **systematisch absichernde Nachprüfungen** zu suchen und wenn notwendig an allen Flächen der Scheibe durchzuführen, kann zum Übersehen des Risses geführt haben.
- Eine **niedrige Erwartung** in diesem Bauteiltyp Risse zu finden, könnte den FPI-Prüfer daran gehindert haben, die Rissanzeige zu registrieren oder richtig einzuschätzen.
- Die **Dauer der Prüfung und der Zeitaufwand** der Folgeschritte kann die Effektivität des Prüfers beeinflusst haben.
- Die hohe potenzielle Gefahr eines übersehenen Risses in einem kritischen Bauteil erfordert es, **FPI-Prüfer auf Ihre Fähigkeiten** Fehler zu erkennen und diese zu dokumentieren zu prüfen.
- Das Übersehen des Risses beim Betreiber ist entweder auf einen Fehler bei der **Reinigung** und dem **FPI-Prozess**, einen Fehler des Prüfers den **Riss zu erkennen** oder einer Kombination dieser Einflüsse zurückzuführen.
- **Die bisherige Fertigung und der Prüfprozess beim Betreiber, garantieren kein fehlerfreies Rotorbauteil aus einer Titanlegierung über die gesamte Lebensdauer. Alle kritischen Rotorteile aus Titan sind für Fertigungsrisse empfindlich. Der folgende Rissfortschritt im Betrieb kann zu einem katastrophalen Unfall führen.**

Bild 16.2.1.1-9.6

Bildbeschreibungen auf Seite 16.2.1.1-18, - 22 und -23

Bohrerbruch als Ursache für LCF-Rissbildung im Zusatzverdichter ("Inducer") der Hochdruckturbinen.

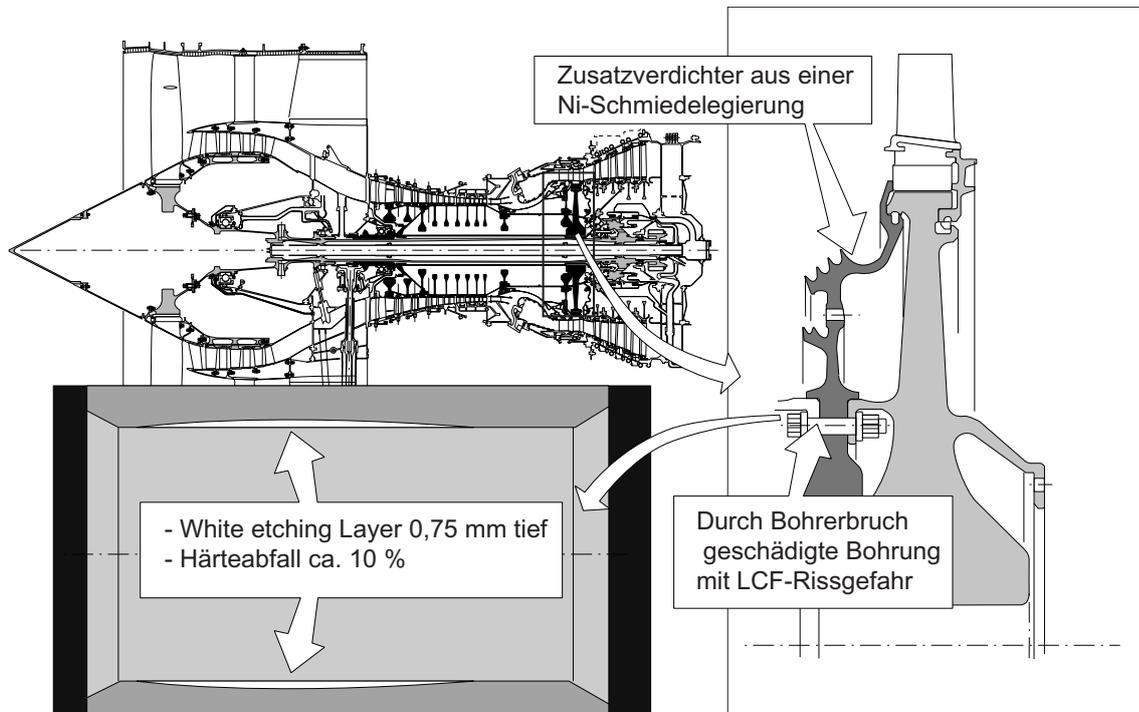


Bild 16.2.1.1-10

Bild 16.2.1.1-10 (Lit. 16.2.1.1-19): Beim Steigflug nach dem Start kam es an einem Triebwerk der zweistrahligen Verkehrsmaschine zu einem Rotorschaden mit Bruckstückaustritt. Die „HPTR fan disk“ vor der Hochdruckturbinen für die für die Schaufelkühlluft war gebrochen. Es handelt sich um einen **Zusatzverdichter** (engl. **inducer, cover plate**, Skizze rechts) der von vorne mit der Hochdruckturbinenscheibe verschraubt ist.

Dieses Beispiel zeigt, dass nicht nur für Titanlegierungen (Bild 16.2.1.1-9) die Gefahr gefährlicher **Schädigungen beim Bohren** besteht. Bruchausgang ist eine der Befestigungsbohrungen („rim bolt holes“). Das Schadensteil ist aus einer **Nickellegerung** (IN718) gefertigt. In einem Querschliff (Detail) wurde eine **schwer anätzbare Zone** (white etching layer) von ca. 0,75 (!) mm gefunden. Dies ist extrem dick (Bild 16.2.1.1-2) und als **Merkmaleiner gefährlichen Bearbeitungsschädigung** anzusehen. Zu-

sätzlich liegt eine **Wärmeeinflusszone** von ca. **0,3 mm** vor. Hier liegt die Härte von HRC ca. 40 deutlich unter der Mindesthärte von HRC 44. Auch **Kaltverformungen** (wahrscheinlich 'Faserkrümmung', Bild 16.2.1.1-3.2) von ca. 0,3 mm Tiefe und **Mikrorisse** unter 0,01 mm Tiefe wurden gefunden. Sie können als zusätzliche Indizien für abweichende Zerspanungsbedingungen gelten.

Offenbar wurde in einem weiteren Fall ein mit **Wirbelstromprüfung** ein Riss bei einer Routineüberholung gefunden. Die Untersuchung ergab, dass dieser von einer **Druckstelle in der Bohrungswand** ausging. Sie entstand beim **Bruch des Bohrers** während der Neuteilherstellung (Bild 16.2.1.1-9.1).

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung

Ein Glättungsvorgang führte zu umlaufenden Riefen in einem hochbeanspruchten Übergangsradius. Folge: LCF-Anrisse und Scheibenbruch.

In ca. 30 Meter Höhe über Grund nach dem Start trat ein lauter Knall auf und das mittlere Triebwerk fiel aus. Ein Feuer konnte mit der bordeigenen Löschanlage gelöscht werden. die anschließende Landung erfolgte sicher.

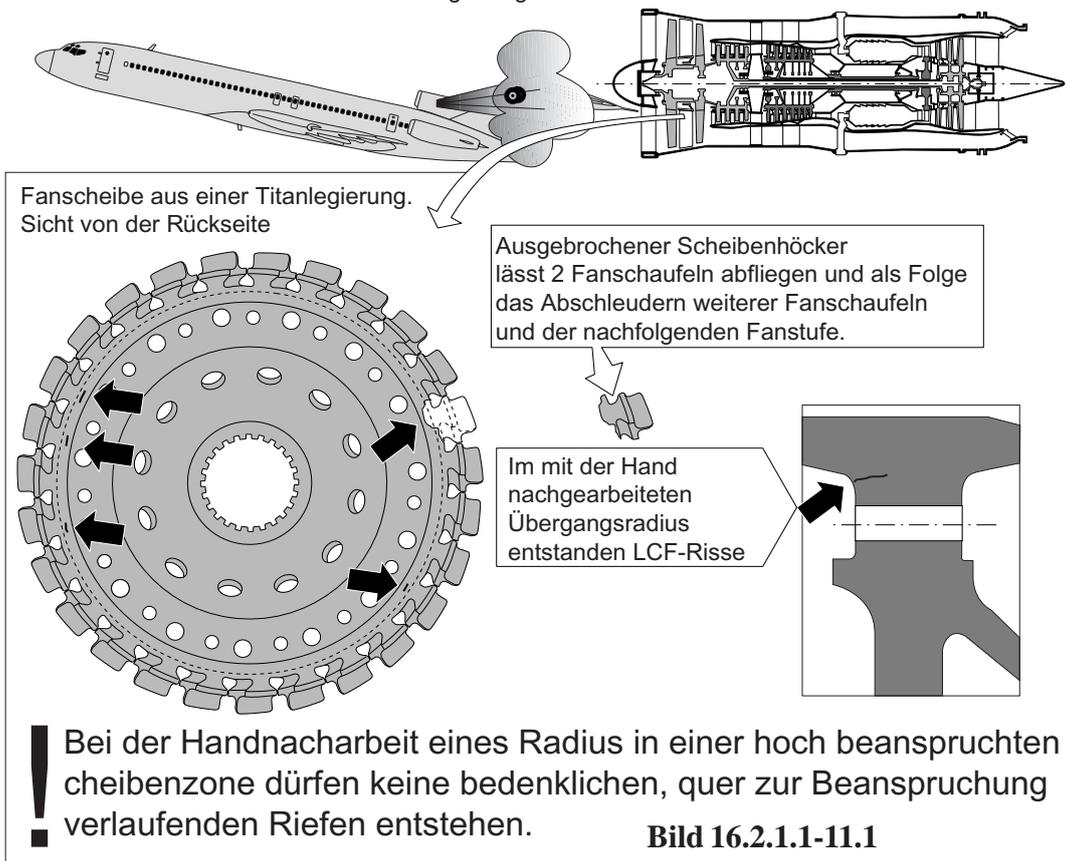


Bild 16.2.1.1-11.1 (Lit. 16.2.1.1-13 und Lit. 16.2.1.1-32): Im dargestellten Fall handelt es sich um die **Scheibe der ersten Fanstufe aus der hochfesten Titanlegierung Ti-6Al-4V** (Skizze oben, entsprechend Bild 16.2.1.1-9.1). Ein Scheibenhöcker war gebrochen und hatte 3 Fanschaufeln frei gegeben. Als Folgeschaden brachen weitere drei Höcker und weitere 4 Blätter flogen ab. Offenbar hatte die entstandene starke Unwucht dann zum Abschleudern der nächsten Fanstufe geführt. Das Flugzeug wurde daraufhin stark beschädigt. Der Bruch des ersten Höckers zeigte einen LCF-Riss auf der Scheibenvorderseite am Übergangsradius in den Kranz (Detail unten rechts). Der Riss benötigte ca. 800 Lastwechsel für das Wachstum bis zur kritischen Länge. Auch die als Folge-

schaden gebrochenen Höcker wiesen im entsprechenden Bereich bereits kleinere Anrisse auf. Weitere drei Risse wurden mit einer zerstörungsfreien Prüfung gefunden (Scheibenskizze). Eine eingehende Untersuchung der Anrisszonen ergab, dass die **LCF-Rissbildung im Zusammenhang mit einer Oberflächenschädigung** steht. Diese wurde beim Versuch erzeugt, den **Radius mit der Hand nachzupolieren**. Scharfe Kratzer durchfurchten die Oberfläche und rissen auf. Am Ende jedes Kratzers ist ein SiC-Partikel eingebettet. Von Ihnen gingen die Schwingermüdrisse aus. Der suspekte Bearbeitungsvorgang ließ sich der **Neuteilfertigung** zuordnen. Verblüffenderweise wurde die vorgeschriebene **arithmetische (mittlere) Rauigkeit** von 32 microinches

Schwingbruch eines Verdichteraustrittsgehäuses der von Bearbeitungsriefen ausging.

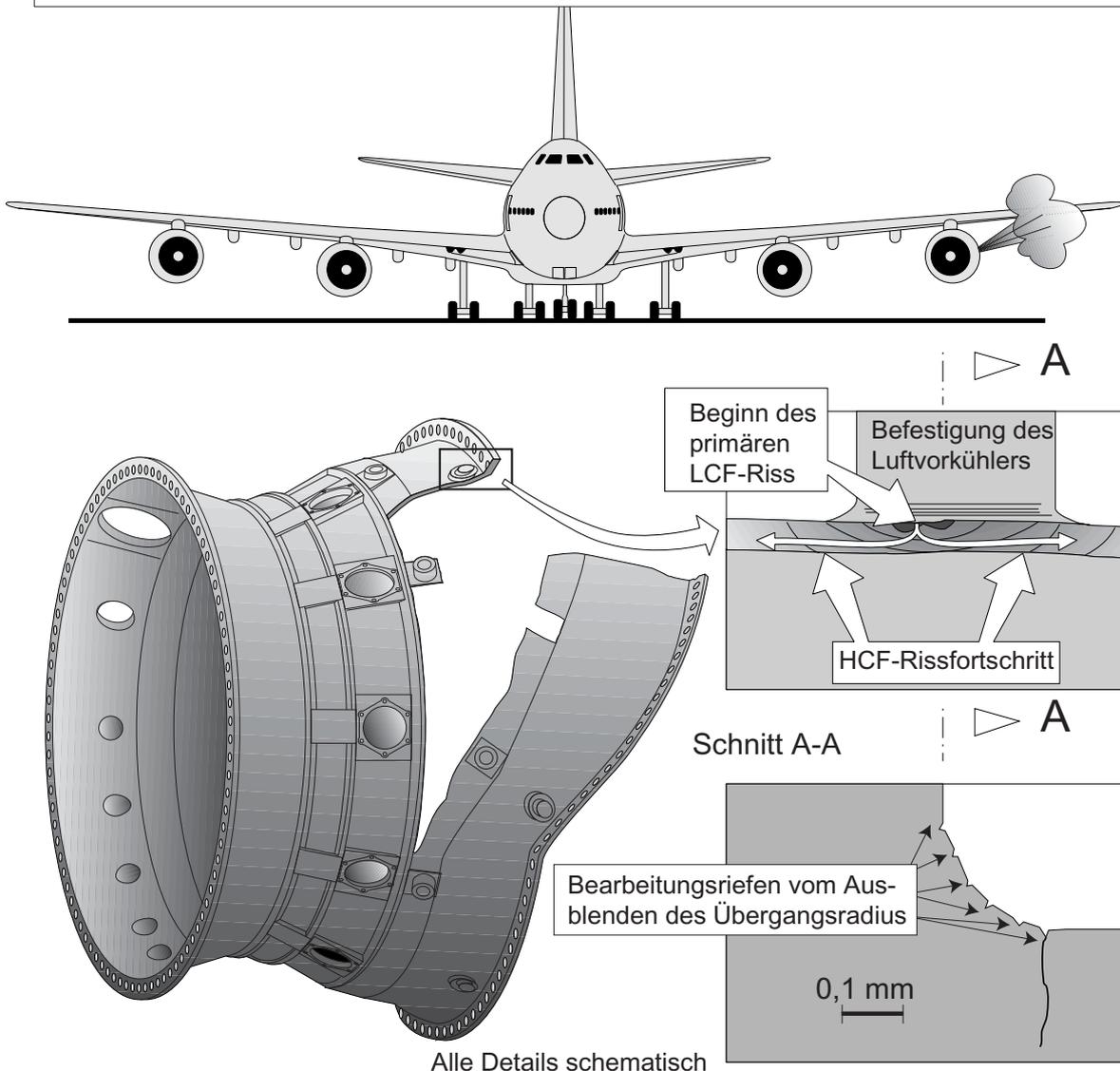


Bild 16.2.1.1-11.2

(0,0008 μm) mit 40 microinches (0,001 μm) nur leicht überschritten. Dies zeigt die **beschränkte Aussagefähigkeit einer Rauigkeitsmessung**, wenn es sich um die Beeinflussung der Schwingfestigkeit handelt (Bild 16.2.2.1-1). Bemerkenswert ist, dass zwei zumindest äußerlich ähnliche Schäden offenbar bereits bekannt waren. Deren Rissausgang wich jedoch vom dargestellten Fall ab. Trotzdem spricht das für eine unterschätzte, sehr hohe Belastung der fraglichen Bauteilzone.

Bild 16.2.1.1-11.2 (Lit. 16.2.1.1-33): Während des Starts trat beim Rollen ein Knall auf. An einem in äußeren Triebwerk (Skizze oben) waren auf beiden Seiten die Gondeltüren, ein Luftvorkühler (precooler, Wärmetauscher der Zapflust aus dem Hochdruckverdichter mit Fanluft kühlt) und andere **Teile abgeschleudert** worden. Das kombinierte **Verdichteraustrittsbrennkammergehäuse** (engine diffuser case, Skizze unten links) **aufgeplatzt**. An einem Befestigungsansatz wurde in der Gehäusewand

ein ca. 12,5 cm langer verfärbter Schwingriss mit ca. 90 000 Fortschrittslinien gefunden und als HCF-Riss bewertet (Band 3 Bild 12.6.1-6). Der Bruchausgang mit zwei dunkel verfärbte halbmondförmige Zonen lag am Übergang einer Kühlerbefestigung (Detailskizze oben rechts). Es handelte sich um Schwingrisse im LCF-Bereich die von 0,01-0,02 tiefen Bearbeitungsriefen ausgingen (Detailskizze unten rechts). Diese entstanden bei der Neuteilherstellung im Zuge einer mechanischen Nacharbeit des Übergangsradius (Bild 16.2.1.1-8.1 und -8.2). Der LCF-Riss ist auf Druck- und Temperaturänderungen im Gehäuse zurückzuführen. Der anschließende HCF-

Riss auf hochfrequente Schwingungen des Ölkühlers. Dafür spricht, dass bereits zwei vergleichbare Schäden an anderen Triebwerken aufgetreten waren. Am Schadenstriebwerk wurde 7 Starts vordem Schaden eine gebrochene Befestigungsklemme einer Zapfluftleitung und eine gebrochene Drucksonde gefunden. Sie wurden offenbar ersetzt ohne die Ursache zu ermitteln.

Die Bearbeitungsriefen, zusammen mit hohen Zugeigenspannungen wurden als Anrissursache identifiziert. Wie Laborversuche zeigten ist mit einer Verkürzung der Ermüdungslebensdauer um den Faktor 4 zu rechnen.

16.2.1.1.1 Der Einfluss von Kühlschmierstoffen (KSS)

Kuschmierstoffe (**KSS**) werden bei Zerspanungs- und Umformprozessen angewendet, um eine möglichst hohe Produktionsleistung bei günstigen Kosten und optimale Integrität der Bearbeitungsfläche zu gewährleisten. Im Folgenden liegt der Schwerpunkt auf **Kuschmierstoffe für die Zerspanung**. Für Umformprozesse gelten ähnliche Bedingungen, die jedoch in einigen Aspekten (z.B. Wärmeleitfähigkeit), abweichen.

Kuschmierstoffe lassen sich wie folgt einteilen (Lit 16.2.1.1-23, Lit 16.2.1.1-5):

- Mineralöhlhaltige mit mehr als 60% Mineralöl im Konzentrat,
- teilsynthetische mit 5-60% Mineralöl im Konzentrat,
- mineralölfreie, synthetische,
- Salzlösungen,
- Schleiföle.

Der Kuschmierstoff hat auf den Zerspanungsprozess und sein Umfeld entscheidende Auswirkungen (Bild 16.2.1.1-13). Nachfolgend werden besonders die positiven Eigenschaften dargestellt. Werden diese nicht genutzt, ist mit Problemen zu rechnen (Bild 16.2.1.1-10).

Schmierwirkung: Es gilt, die Reibung im Mischreibungsgebiet zwischen Werkzeug, Werkstück und Span zu minimieren. Damit wird der Schnittvorgang erleichtert und die Reibungsenergie bzw. die Aufheizung minimiert. Um einen niedrigen Reibbeiwert zu erzielen, werden den KSS-Konzentraten **Hochdruckzusätze (EP-Zusätze)** zulegiert. Diese reagieren unter Bedingungen der Mischreibung mit den metallischen Kontaktflächen. Hier wirken Einflüsse der zu frischen, hoch reaktiven, möglicherweise katalytisch wirkenden Oberflächen. Unterstützt werden solche chemischen Reaktionen von hohen Temperaturen und der Scherbelastung auf die Flüssigkeit. So bilden sich Reaktionsschichten mit Trockenschmierwirkung. Gebräuchliche EP-Zusätze sind **organische Schwefel-, Chlor- und Phosphorverbindungen** (Lit 16.2.1.1-22 und Lit. 16.2.1.1-28). Aus ihnen können Metallsulfide-, chloride oder -phosphate entstehen. Die Reaktion erfolgt mit den Spänen, auf Grund der kleinen Volumen mit großen reaktiven Oberflächen, besonders intensiv. Diese tragen so die EP-Zusätze aus dem KSS aus, wobei dort die Konzentration nachlässt.

Andererseits führt ein Verdampfen der KSS zum gegenteiligen Effekt. Deshalb hat in geeigneten, von Zerspanungsprozess und Zerspanungsleistung abhängigen **Zeitabständen, eine Überprüfung der EP-Konzentration** zu erfolgen.

Weniger Reibung bedeutet für den Zerspanungsvorgang weniger Reibungskräfte und Reibungswärme mit mehrfachen Vorteilen:

- Geringere Aufheizung des Werkstücks und Werkzeugs
- Weniger Werkzeugverschleiß bzw. längere Standzeiten bei gleichbleibender Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität (Rauigkeit, Eigenspannungen, Verfestigung)
- Weniger Verformung durch Wärmedehnung und Schnittkräfte.
- Weniger Maschinenleistung.
- Weniger abzuführende Wärme

Kühlung bzw. Abführung der Zerspanungswärme: Die Kühlwirkung des KSS hängt von seiner Wärmekapazität, dem Wärmeleitvermögen und der Verdampfungswärme ab. Die relativ niedrige Verdampfungstemperatur des Wassers bei ca. 100°C wirkt sich auf die Kühlung zusätzlich positiv aus. Wegen dieser Eigenschaften **kühlt Wasser am intensivsten**. Mineralöle, Mineralölmischungen mit Zusätzen und Emulgatoren liegen aus dieser Sicht deutlich ungünstiger. Einen Vorteil kann bei Ölen /Schleiföl eine bessere Benetzung bringen. Gewöhnlich gilt: kleine Oberflächenspannung = gute Benetzbarkeit = gute Kühlung (Lit. 16.2.1.1-23). Bei wässrigen Emulsionen wirkt also das Wasser am intensivsten kühlend. Sein Anteil sollte deshalb im KSS unter dem Aspekt der Kühlung möglichst hoch sein. Wenn es jedoch gelingt, die Wärmeentstehung mit einer guten Schmierwirkung deutlich herabzusetzen, kann z.B. Schleifen mit Öl und EP-Zusätzen trotz ungünstigerer physikalischer Eigenschaften, Vorteile gegenüber wässrigen Emulsionen haben.

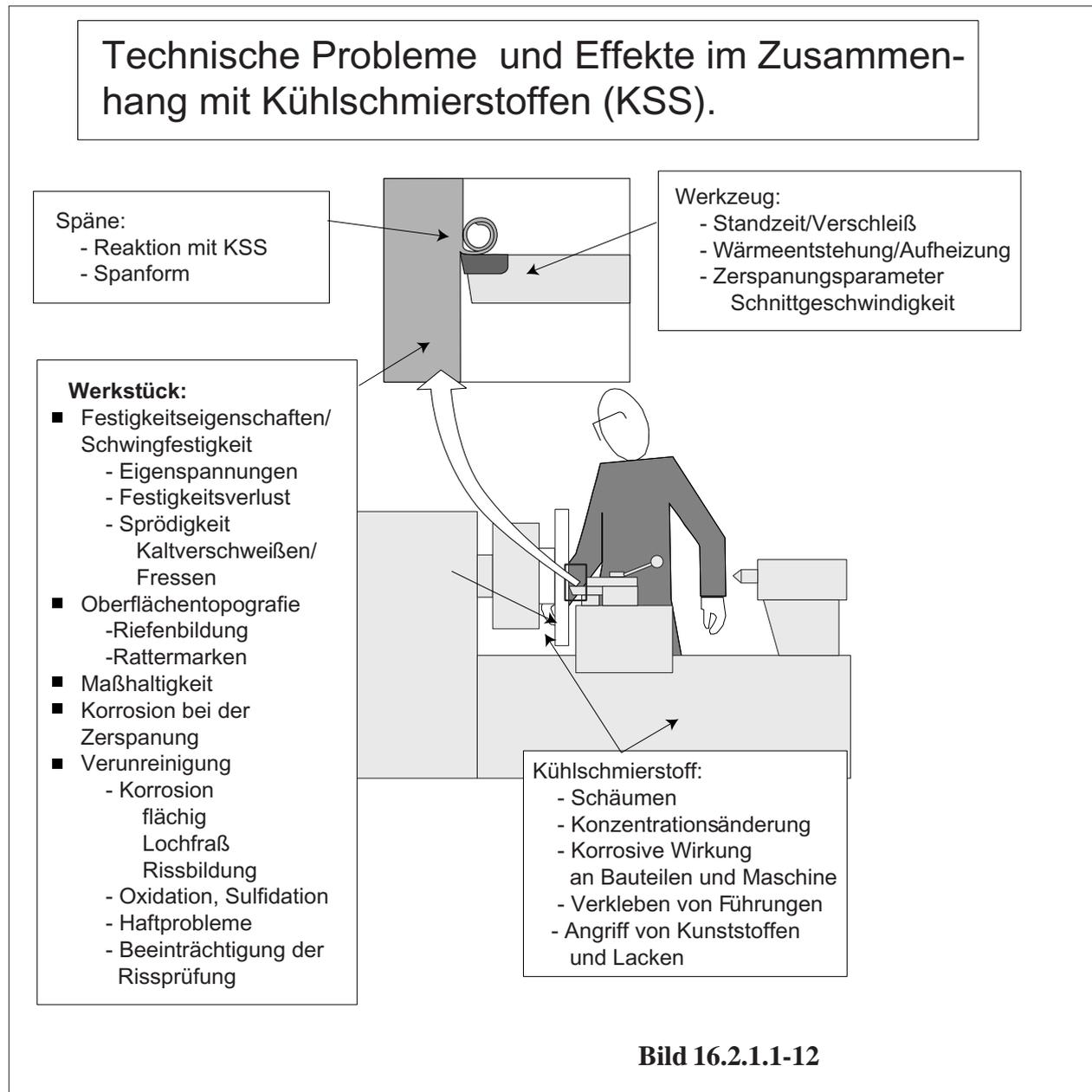
Verminderte Schaumbildung: Die Schaumbildung ist von der Wasserqualität stark beeinflusst. Weiches Wasser fördert die Schaumbildung. Ist die Schaumbildung zu stark, kommen in manchen Fällen **Entschäumer** („Schaumbremse“) auf Silikonbasis (**Silikonöl**) zum Einsatz. Der Einsatz solcher Entschäumer kann jedoch im Hinblick auf die Eindringprüfung äußerst problematisch sein (Bild 16.2.1.1-13, Bild 16.2.2.3-3 und Bild 17.3.1-8).

***Bild 16.2.1.1-12:** Der Fließtext auf Seite 16.2.1.1-28 beschreibt bereits wichtige positive **Eigenschaften des KSS**. Der nachfolgende Text konzentriert sich deshalb auf die problematischen Aspekte.*

*Im Vordergrund steht die Sicherheit des Bauteils. So gesehen sind es die Einflüsse auf die **Festigkeitseigenschaften, insbesondere die Schwingfestigkeit**. Temperaturen und plastische Verformungen beim Schnittvorgang hängen außer vom Werkstoff besonders von den Schmier- und Kühleigenschaften des KSS ab. Das hat u.a. Auswirkungen auf die Temperatur, die das Werkstück beim Schnittvorgang erreicht und den Verschleiß des Werkzeugs. Davon sind im Bauteil zurückbleibende unerwünschte Zugeigenspannungen, ein eventuel-*

*ler Festigkeitsverlust (z.B. Lösungsglühen bei Ni-Legierungen, Anlassen bei Vergütungsstählen) und eine **Versprödung** (z.B. durch **Sauerstoffaufnahme bei Titanlegierungen**), beeinflusst. Spanende Verfahren mit definierter Schneide können die Oberfläche überbeanspruchen und aufreißen lassen. Dies ist z.B. im Bereich von **Rattermarken** (Bild 16.2.2.5-2) und als **Kommarisse** (Bild 16.2.1.1-2) in Nickellegierungen zu beobachten. Insbesondere **Schleifprozesse** können bei ungenügender KSS-Wirkung mit unzulässiger Werkstück-erwärmung, Zugeigenspannungen und Rissbildung (Warmrisse, Bild 16.2.1.1-4) ablaufen. Die **Oberflächentopografie** des Werkstücks als Rauigkeit, insbesondere aber Riefenbildung und*

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung



Rattermarken (Bild 16.2.2.5-2) wirken sich auf die Schwingfestigkeit aus. Sie sind vom KSS deutlich beeinflusst. Bei einer Zerspanung mit undefinierter Schneide, in erster Linie Schleifen, wird Rautiefe und Riefenform (Bild 16.2.2.1-1 und Bild 16.2.2.1-7) und damit die **Schwingfestigkeit in der Hauptsache von der Schleifscheibenkörnung und der Werkstoffhärte** bestimmt. Auch die Reinheit des KSS bzw. die Abscheidung der Späne ist von Bedeutung. Verbliebene Schleifkörner im auftreffenden KSS-Strahl können kleine Marken einschlagen (**Kommabildung**, nicht zu verwechseln mit

Kommarissen; Lit. 16.2.1.1-23; engl: **Peppering**). Um dies zu vermeiden, ist der KSS beim Umlauf in der Maschine kontinuierlich geeignet zu reinigen. Dies ist um so effektiver, je dünnflüssiger der KSS ist. Unter diesem Gesichtspunkt hat ein relativ zähes Schleiföl eher Nachteile.

Werkzeugverschleiß beeinflusst die **Maßhaltigkeit** und nicht zuletzt über die Standzeit auch die **Zerspanungskosten** (siehe auch Bild 16.2.1.1-13).

Während des Bearbeitungsprozesses kann es bereits zu **korrosivem Angriff** am Werkstück

kommen (Lit. 16.2.1.1-23). Korrosion kann durch KSS auf unterschiedliche Weise ausgelöst oder begünstigt werden.

Zunächst besteht die Gefahr eines Angriffs des Bauteils, insbesondere wenn es über längere Zeit mit aggressiven KSS-Resten gelagert wird. Dabei kann es je nach Werkstoff bzw. Werkstoffzustand (z.B. Sensibilisierung), möglicher Elementbildung und Eigenspannungen vom flächigen Angriff über einen selektiven Angriff (Korngrenzen) bis zum Lochfraß und zur Spannungsrissskorrosion kommen (Band 1, Kapitel 5.4.2.1 und Kapitel 5.4.2.2).

Insbesondere synthetische und teilsynthetische KSS können gegebenenfalls **Lackierungen** auf unbearbeiteten Werkstückoberflächen schädigen. Eine **Konzentrationssteigerung als Folge des Ausdampfens** kann diesen Effekt verstärken.

Schädigungsgefahr besteht auch für Kunststoffe sowie Isolations- und Dichtungswerkstoffe der Bearbeitungsmaschine und/oder des Werkstücks. Für **Bauteile mit organischen Komponenten** (Einlaufschichten, Lacke, Dichtstoffe, Klebeverbindungen) dürfte im Rahmen von **Reparatur- bzw. Nacharbeitsprozessen** auf Grund der genannten Effekte ein erhöhtes Schadensrisiko bestehen. Wirkt KSS als **Elektrolyt, womit oberhalb einem pH-Wert von 8** unbedingt zu rechnen ist, kann sich **Elementbildung** korrosiv bemerkbar machen. Denkbar ist ein Angriff von Leichtmetallen mit (Gewinde-) Einsätzen aus Stahl (z.B. **Gehäuse aus Al- und Mg-Legierungen**). Korrosion im Bereich von **Messingteilen** an Bearbeitungsmaschinen gehört zu dieser Problematik.

Schäden können auch von **Verunreinigungen durch anhaftende Reste** des KSS sowie von **Reaktionsschichten** ausgehen.

Solche Verunreinigungen sind von großer, häufig unterschätzter, Bedeutung für das Werkstückverhalten im nachfolgenden Produktions- und Qualitätssicherungsprozess sowie im späteren Betrieb.

Folgt dem Zerspanungsvorgang eine Aufheizung, z.B. im Rahmen einer Wärmebehand-

lung oder Schweißung können KSS-Rückstände und/oder Reaktionsschichten insbesondere mit Schwefel und Chlor **interkristallinen Angriff und/oder Spannungsrissskorrosion** auslösen (Bild 16.2.2.3-16). **Bei Ni-Legierungen kann eine Schwefelanreicherung zu Sulfidation führen. Diese können weitere Verfahren (z.B. Beschichtungen) beeinträchtigen und/oder als Vorschädigung die Betriebslebensdauer verkürzen.**

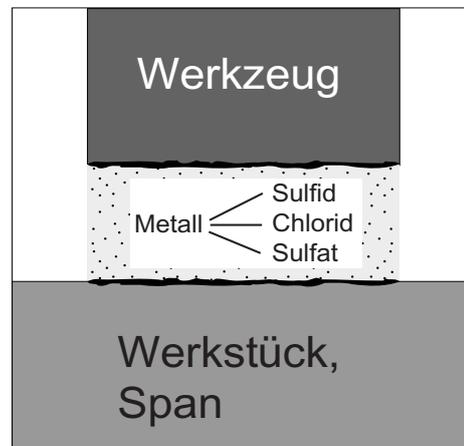
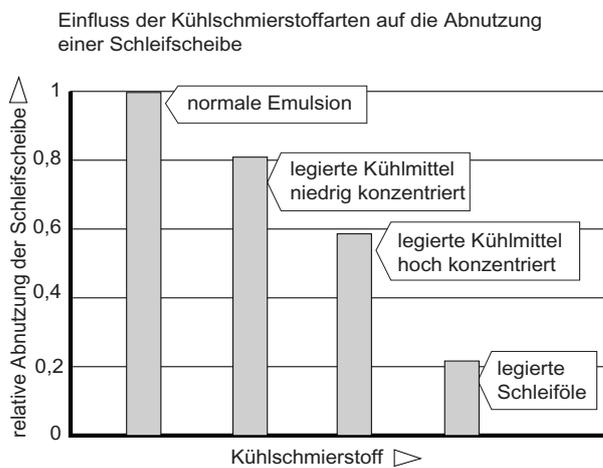
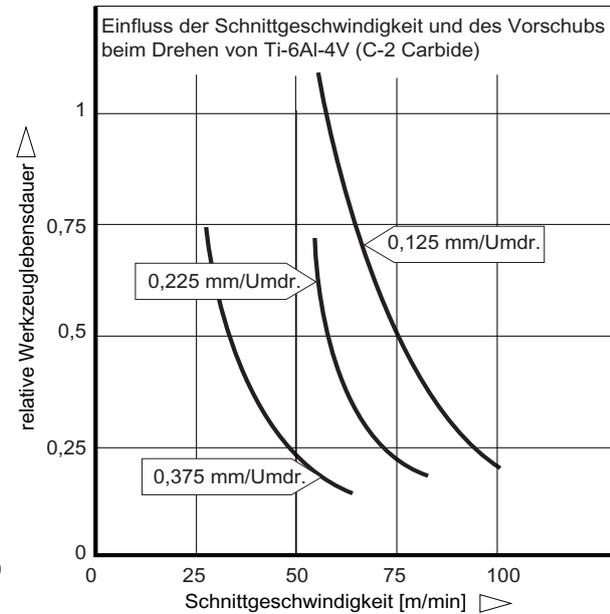
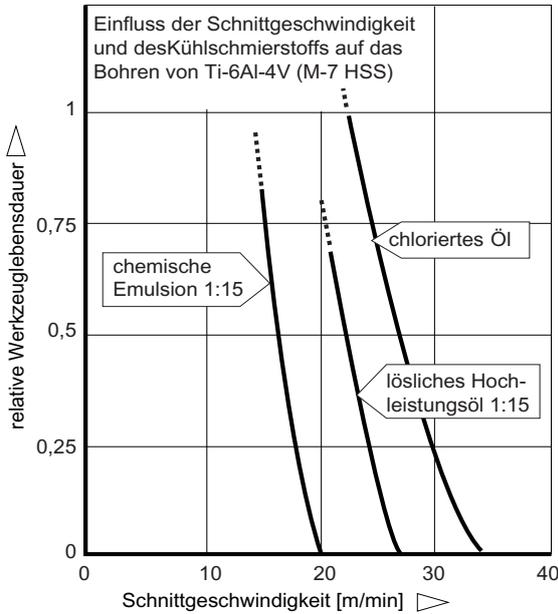
Besonders gefährlich sind Cl-haltige Rückstände auf Titanlegierungen. Bei Temperaturen oberhalb 450°C und ausreichend hohen Zugeigenspannungen, die man nicht immer ausschließen kann, ist mit Spannungsrissskorrosion zu rechnen (siehe auch Bild 16.2.2.3-16).

Schwefelhaltige KSS lassen auf Buntmetallen und Bronzen (z.B. Gleitlagerwerkstoffe) sowie auf Silber dunkle Beläge entstehen. In engen Spielen kann das bis zum Klemmen führen (Lit. 16.2.1.1-23). **Silbersulfid hat, anders als metallisches Silber keine Schmierwirkung.** Damit wird das Anzugsmoment von Verschraubungen und das Verhalten von Gleitflächen im Betrieb verschlechtert. Ungenügend Vorspannung von Schrauben, Fressen und katastrophales Versagen von Bewegungsflächen (z.B. in Kraftstoffpumpen nach dem Axialkolbenprinzip) ist die Folge.

Ein Sonderproblem entsteht in der Anwendung von **Silikon** als **Schaumbremse**. Verbleiben Rückstände auf den Werkstücken, kann erfahrungsgemäß die **Benetzbarkeit merklich verschlechtert** werden. Das macht die **Eindringprüfung** zumindest fragwürdig. Derartige Rückstände können von Reinigungsbädern, auf denen sie als Film schwimmen, auf andere Bauteile übertragen werden (Bild 16.2.2.3-3 und Bild 17.3.1-8). Das kann große Auswirkungen auf Zusatzkosten einer intensiven Reinigung und den Produktionsablauf haben.

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden - Spanende Bearbeitung

Kühlschmierstoffe können die Werkzeuglebensdauer deutlich verlängern. Das ist aber kein Argument für Risiken.



Wirkmechanismus von Kühlschmierstoffen: chemische Reaktionen; Reaktionsschicht

Bild 16.2.1.1-13

Bild 16.2.1.1-13: Die *Werkzeuglebensdauer* ist von der Verschleißwirkung durch Werkstück und Späne auf die metallische Werkzeugschneide bestimmt. Nickellegierungen und insbesondere Titanlegierungen neigen zum Kaltverschweißen (Fressen, Lit. 16.2.1.1-24)

und sind damit sehr verschleißintensiv. Der Verschleiß ist u.a. abhängig von der Schnittgeschwindigkeit und dem Vorschub (Diagramm oben rechts, Lit. 16.2.1.1-2). Dabei scheint ein optimaler Zwischenwert für die Zustellung zu existieren. Um eine möglichst hohe Schnittge-

schwindigkeit mit entsprechend hoher Zerspanungsleistung bei akzeptabler Werkzeuglebensdauer zu erreichen, liest man immer wieder in der Fachliteratur von der Anwendung eines **KSS mit chlorhaltigen Zusätzen** (Diagramm oben links, Lit.16.2.1.1-2 und Lit 16.2.1.1-24). Solche Zusätze bilden unter Schnittbedingungen, wie bereits beschrieben, Reaktionsschichten (Skizze unten rechts, Lit. 16.2.1.1-21, Bild 16.2.1.1.1-10) die als Trockenschmierstoff wirken und den Verschleiß mindern. Wegen der **Spannungsrissskorrosionsgefahr** bei nachfolgender Wärmeeinwirkung (Lit 16.2.1.1-25, Bild 16.2.2.3-16 und Bild 16.2.1.7-8) und/oder im Betrieb ist von solchen KSS jedoch **für die Bearbeitung von Titanlegierungen unbedingt abzusehen**. Im Gegenteil ist auf eine sehr niedrige Grenzkonzen-

tration zu achten (Lit. 16.2.1.1-1, siehe Merksatz). Vorsicht ist auch **bei schwefelhaltigen KSS** geboten. Es steht zu befürchten, dass schwefelhaltige Reaktionsschichten z.B. bei Nickellegierungen, möglicherweise im Zusammenhang mit nachfolgenden Wärmebehandlungen, im späteren Betrieb Sulfidation auslösen. Mit einer Verkürzung der Inkubationszeit nimmt die Betriebslebensdauer entsprechend ab.

Beim **Schleifen** lässt sich mit legierten KSS, insbesondere **Schleifölen**, die Abnutzung der Schleifscheibe entscheidend vermindern (Schaubild unten links, Lit. 16.2.1.1-23). Auch hier gilt die Vermeidung von Cl, S und anderen reaktiven Zusätzen die das Betriebsverhalten des Bauteils beeinträchtigen können.

Merksatz:

Nur zugelassene Kühlschmierstoffe verwenden. Produktwechsel muss die zuständige Fachabteilung zulassen.

Besondere Vorsicht bei

- chlorhaltigem Anteil: der Cl-Gehalt muss unter 0,01 % liegen,
- schwefelhaltigem Anteil,
- Silikonzusätzen (Entschäumungsmittel)

Bild 16.2.1.1-14: Im Triebwerksbau werden brand- und explosionsgefährliche Werkstoffe wie Titan- oder Magnesiumlegierungen spanend bearbeitet. Sie sind in Form von Spänen an Luft entzündlich und als Staub explosiv. Ansammlungen trockenr Magnesiumspäne (**Spänenester**, Zündtemperatur ab 480°C) können sich bei Zerspanungstemperatur entzünden. Mit **CO₂** oder **Stickstoff kann Titan- oder Magnesiumstaub** in einer stark exothermen Reaktion explosionsartig Karbide oder Nitride

bilden (Lit. 16.2.1.1-27). Damit sind auch diese Gase als etwaige Schutzgase in Werkzeugmaschinen problematisch. Auch **Feuchtigkeit** verhindert Brände nicht. **Löschversuche mit Wasser sind gefährlich**. Es bildet sich **Wasserstoff** und mit Luft ein äußerst explosives **Knallgasgemisch**.

Eine weitere Möglichkeit für Brände und Verpuffungen ist die **Zündung des KSS**. Das gilt besonders für **KSS-Nebel** (Schneidöl). Es kommt zu **Verpuffungen** mit Druckanstieg. Die

Soweit darf es nicht kommen. Austretendes Feuer nach der Entzündung des KSS-Ölnebels beim Schleifen eines Werkstücks aus einer Titanlegierung.

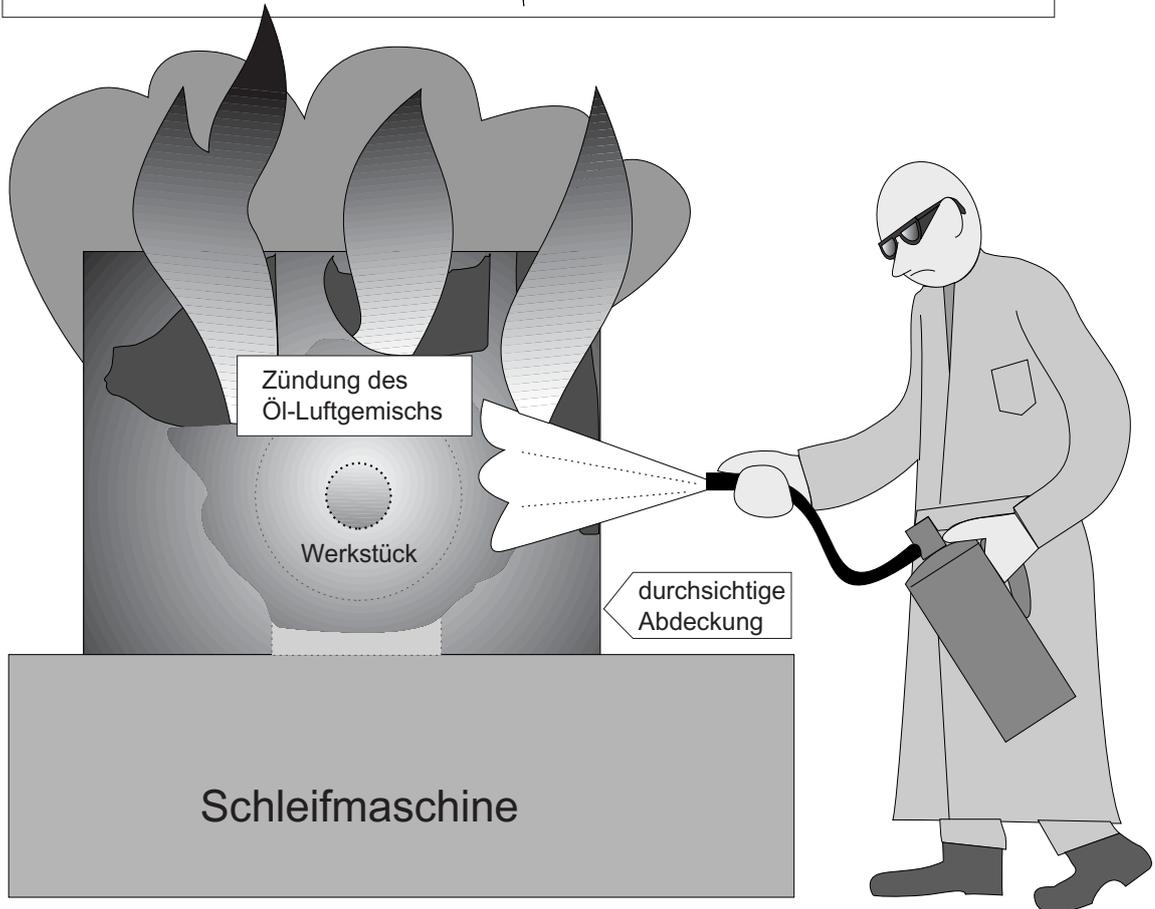


Bild 16.2.1.1-14

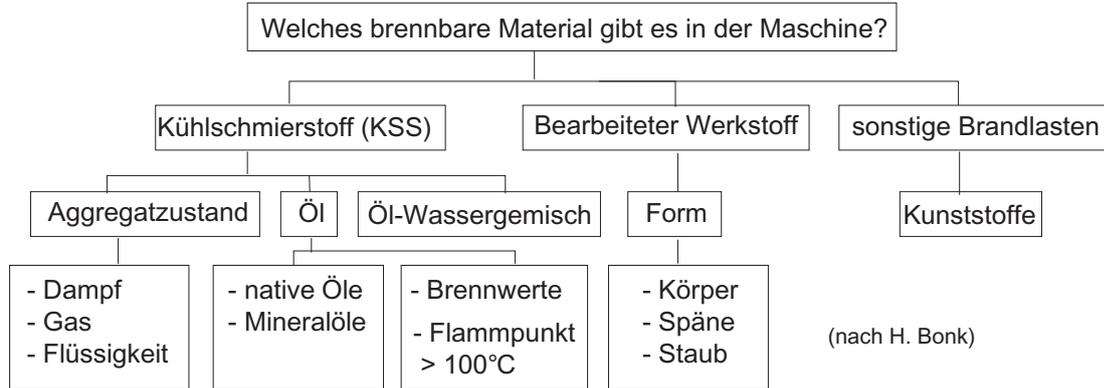
Brandgefahr beruht auf der **Verteilung des Ölnebels** und auf der **Zündtemperatur**. Sie ist vom zerspannten Werkstoff unabhängig. Es darf jedoch angenommen werden, dass speziell Titanfunken wegen ihrer großen Hitzeentwicklung im Flug, ein hohes Zündrisiko darstellen.

Je niedriger der **Flammpunkt des KSS** (häufig unter 150°C) um so leichter ist es zu zünden. Flammpunkte unter 100°C gelten für brennbare Flüssigkeiten mit besonderen Sicherheitsauflagen. Der Flammpunkt kann von einem **Alterungsprozess** bei der Zerspaltung weiter abgesenkt werden. Ist eine Entzündung erfolgt brennen auch KSS mit deutlich höheren Flammpunkten ($>200^{\circ}\text{C}$).

Wasser-KSS-Gemische sind erst ab zweistelligen Zumischraten des KSS ein Brandrisiko. Die häufigsten **Zündquellen** sind **Werkzeugbruch, Ausfall der KSS-Zufuhr oder Programmierfehler der Werkzeugmaschine**. Gegen Explosionen und Brände in Werkzeugmaschinen gibt es erfolgreiche Strategien (Bild 16.2.1.1-14, Lit. 16.2.1.1-27).

Die Brandgefahr bei der Zerspaltung lässt sich minimieren.

Bewertung von Gefährdungspotenzial



Gefährdung bei Bearbeitungsverfahren

Zerspaltung	Gefährdungspotenzial
mit Öl	Ölbrand, Verpuffung, Metallbrand
mit Emulsion	Knallgasbildung, Metallbrand
trocken	Metallbrand Staubexplosion

Ermittlung der Gefährdungspotenziale

- Risiko brennbares Material: Schleifmaschinen, Drehmaschinen, Fräsmaschinen, Tiefbohrmaschinen
- Risiko Zündquellen: Funkenerosionsmaschinen (EDM), HSC-Maschinen
- Risiko Brennstoffverteilung: Schleifmaschinen, Absauganlagen, Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, Magnesiumbearbeitung und Titanbearbeitung

Bild 16.2.1.1-14

Bild 16.2.1.1-14 (Lit. 16.2.1.1-27): Das **Gefährdungspotenzial** eines Zerspaltungsvorgangs durch Brand und/oder Explosion ist von mehreren Einflüssen abhängig (Rahmen oben). Neben Risiken des **zerspalteten Werkstoffs** (Bild 16.2.1.1-13), der **Zündquelle** und der **Brennstoffverteilung** (Rahmen unten rechts) spielt das **Bearbeitungsverfahren** (Rahmen unten links) eine Rolle. Am gefährlichsten sind **brennbare Kühlschmierstoffe** wie Mineralöl oder native Öle.

Das **CE-Zeichen** auf der Maschine sagt aus: „Die Maschine muss so konzipiert sein, dass jegliche von der Maschine selbst oder durch

Gase, Flüssigkeiten, Dämpfe, Stäube oder anderen von der Maschine freigesetzten oder verwendeten Substanzen verursachte Brand-Überhitzungs- oder Explosionsgefahr vermindert wird.“

Die Einhaltung dieser Richtlinie garantiert nur die Mindestsicherheitsstandards, ein Restrisiko wird toleriert.

Das Risiko von **Explosionen** wird mit **vorbeugenden Maßnahmen** begrenzt. Darüber hinaus sind **konstruktive Maßnahmen** möglich.

Gegen Brände werden in die Werkzeugmaschinen **kleine Löschsyste** integriert. Sie reagieren so schnell (Millisekunden bis Sekunden),

Industrielle Züchtung von Mikroorganismen der unerwünschten Art. Deren Herkunft ist vielfältig.

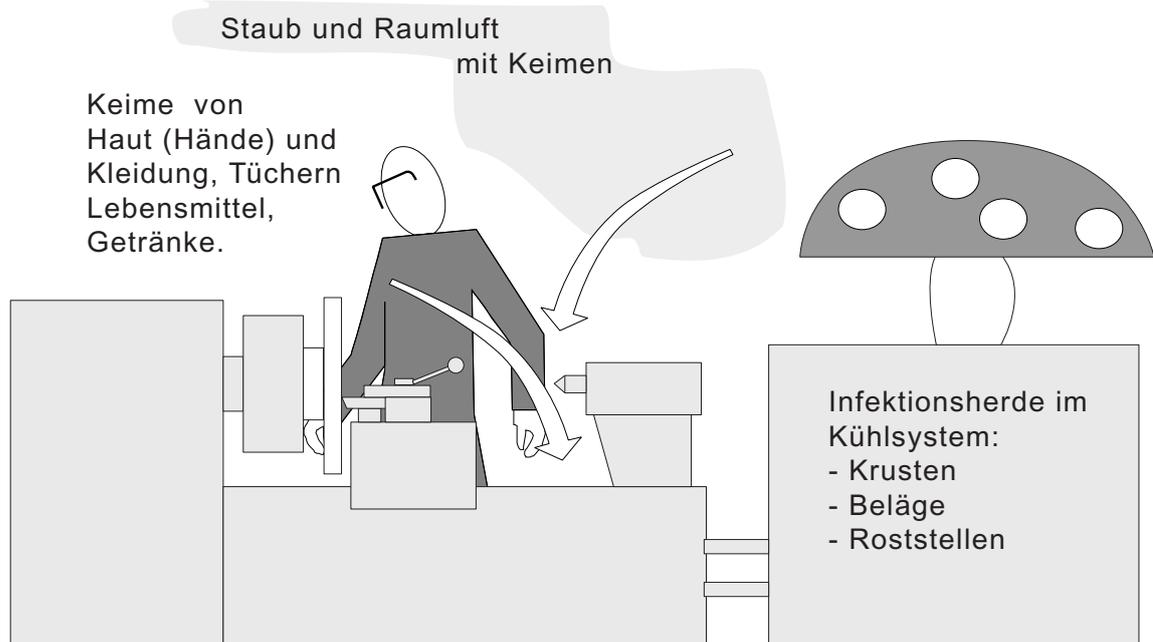


Bild 16.2.1.1-15

dass Schäden minimiert werden. Flutzeiten von **Gaslöschanlagen**, um Rückzündungen zu vermeiden, liegen bei 30 Sekunden.

Für kürzeste Reaktions- bzw. Löschzeiten ist ein im Löschsystem **integriertes automatisches Detektionssystem** wichtig.

Die Erfahrung zeigt, dass **Modellbetrachtungen im Labormaßstab nicht ausreichend realistisch** sind.

Bild 16.2.1.1-15 (Lit. 16.2.1.1-31): Für die spanende Bearbeitung spielen **Öl-Wasser-Emulsionen** als KSS (Bild 16.2.1-12) eine bedeutende Rolle. Sie sind jedoch mehr als reine Öle für die Bildung von Mikroorganismen empfindlich. Sie zersetzen den KSS chemisch. So beeinträchtigen sie entscheidend die erwünschten Eigenschaften, insbesondere die **Schmierwirkung**. Äußerlich macht sich dies durch eine ausgeprägte Trübung und ungewöhnlich unangenehmen Geruch bemerkbar.

Man spricht von einem **'Zusammenbruch'** der Emulsion. Dabei wachsen die Öltröpfchen und es kommt zur **Entmischung des Öls vom Wasser**. Sinkt der **PH-Wert** vom leicht basischen in den sauren Bereich entsteht **Korrosionsgefahr**. Es kommt zum **Rosten** der Bearbeitungsma-



Beispiel 16.2.1.1-1: In einer spanenden Herstellung von Triebwerksteilen kam es trotz modernster Werkzeugmaschinen und Anlagen wiederholt zu extremer Bildung von Mikroorganismen im KSS. Weil die Zerspanungsmaschinen an einer großen **Zentralversorgung** des KSS angeschlossen waren war von dem Ausfall ein großer Teil der Maschinen betroffen. Dabei veränderte sich der KSS mit Geruchsbelästigung trat auf. Örtlich traten im

System massive **gallertige Ablagerungen** auf. Das ging bis zur **Verstopfung**..

Die Probleme entstand in den **Sommermonaten bei großer Hitze**. Eine Recherche ergab, dass das Phänomen offenbar im Zusammenhang mit der nicht bekannten Angewohnheit mancher Werker bestand, sich die **Füße in dem KSS zu waschen**. Damit lag die Vermutung nahe, dass **Fußpilz** in die Anlage geriet und sich dort vermehrte (Bild 16.2.1.1-15).

schinen und Werkstücke sowie erhöhtem **Ver-schleiß** wegen der ungenügenden Schmierwirkung.

Eine Verunreinigung des KSS mit schädigen- den Keimen kann auf vielfältige Weise geschehen (Beispiel 16.2.1.1-1). Dabei bedeutet Trinkwasserqualität bei der Anmischung jedoch kein Risiko. Besonders übel sind nach einem Wechsel im System verbliebene Reste infizier- ten KSS. Das kann in wenigen Wochen als Fol- ge eines sofort eintretenden exponentiellen Wachstums wieder zur Unbrauchbarkeit füh- ren. Schon die KSS-Kosten verbieten aber ei- nen häufigen Wechsel. Dieser Effekt wird von einem **Nachfüllen** der verbrauchten KSS noch unterstützt.

Im Betrieb werden bei Sauerstoffzufuhr (Schaumbildung) andere, weniger problemati- sche Mikroorganismen (aerobe) unterstützt als im **Stillstand** (anaerobe). Diese wirken sich

sehr negativ auf die Eigenschaften des KSS aus. Sie bilden Schwefelwasserstoff mit dem ty- pischen unangenehmen **Geruch fauler Eier**.

Typische Keime in KSS sind:

Am häufigsten sind Keime die beim Herstellen der Emulsion während des **Mischens des Öls mit Wasser** eingebracht werden.

Sog. **Sporenbilder** sind besonders widerstands- fähig und können deshalb **mit der Luft** zuge- führt werden.

Mit der Luft werden auch **Hefen und Schim- melpilze direkt oder an Staub** haftend trans- portiert.

Selbst das Auftreten von **Salmonellen** wird nicht ausgeschlossen.

Solange Sauerstoff im KSS vorhanden ist ent- steht durch die Aeroben Mikroorganismen lediglich eine braune Verfärbung und ein Öl- film an der Oberfläche. Der Zusammenbruch

des KSS mit Bildung von **Schwefelwasserstoff** (Geruch), **Versäuerung und Schwarzfärbung** (Eisensulfid) erfolgt erst durch Schwefelbakterien unter Sauerstoffmangel. Sie werden erst aktiv nachdem der Sauerstoff von den anderen Mikroorganismen verbraucht wurde.

Die **Überwachung des KSS** erfolgt deshalb bereits in der Aeroben Phase durch ständige Kontrollen. Dabei ist die Zahl der Keime wegen ihrer exponentiellen Vermehrung das Kriterium.

Weil die Keime im KSS auch für die Mitarbeiter **gesundheitsbedenklich** sind, muss dieses auch auf solche **'Problemkeime'** untersucht werden.

Untersuchungen zeigten, dass das größte **Infektionsrisiko** (eiternde Entzündungen) bei Hautverletzungen, insbesondere Schnitte an den Händen, von kontaminierten Bohrölemulsionen ausgeht.

Bei unzureichender Hygiene können über die Hände oder Kleidung Hefen und Pilze aufgenommen werden. Auch von Hautallergien können gesundheitsschädliche Keime, z.B. in das Essen gelangen.

Werden Keime aus stark infizierten **KSS-Nebeln eingeatmet** sind allergische Reaktionen und Fieber möglich.

Der Nachweis von problematischen Keimen in Ölemulsionen erfolgt wie bei Lebensmitteln. Dabei bringt man einen geeigneten Nährboden, vorzugsweise ein sog. Universalnährboden, mit der Emulsion in Kontakt. Dies kann verfahrensabhängig auf unterschiedliche Weise geschehen. Für eine grobe Schätzung genügt das „dip slide“-Verfahren bei dem ein Nährboden-tragender Objektträger in das KSS getaucht wird. Die Auswertung erfolgt nach einiger Zeit in einen Brutschrank. Hefe- und Schimmelpilzbefall weisen auf die Möglichkeit einer Hautbeeinflussung hin.

Mikrobielle Verunreinigungen sind in Kühlschmierstoffen **nicht vollkommen vermeidbar**. Ihr Konzentration ist jedoch möglichst gering

zu halten. Dafür nutzt man geeignete **Desinfektionsmittel** (Biozide). Ihre Konzentration im KSS ist auf den jeweiligen Fall abzustimmen. Bei einer Unterdosierung besteht die Gefahr resistenter Keime aber auch eine Überdosierung ist zu vermeiden.

Für die gründliche **Reinigung und Neufüllung** eines betroffenen KSS-Systems (Leitungen und Behälter) verwendet man mechanische Verfahren. Alle **Schmutzkrusten und Beläge** sind als Keimnester sicher zu entfernen. Danach ist ausgiebig zu **spülen**, bevor eine Desinfektion vor der frisch angesetzte Neubefüllung erfolgt. Bei einer Anmischung auf **Vorrat besteht die Gefahr**, dass sich bereits zu viele Keime während der Lagerung gebildet haben.

Bei **Stillstand der Maschinen** muss im System ausreichend Sauerstoff vorhanden sein (**Belüftung**) um die besonders schädlichen Schwefelorganismen zu verhindern.

Literatur zu Kapitel 16.2.1.1

- 16.2.1.1-1** P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“, Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 61, 63, 104, 240.
- 16.2.1.1-2** „Machining Titanium & Its Alloys“, ASM international, www.supraalloys.com/Machining_titanium.htm, 1.04.2004.
- 16.2.1.1-3** ASM Handbook Vol.5 „Surface Engineering“, ASM International, ISBN 0-871170-377-7, 1999, Seite 120, 144.
- 16.2.1.1-4** H.Kloos, „Eigenspannungen, Definition und Entstehungsursachen“, Zeitschrift „Werkstofftechnik“, 10.Jahrgang, September 1979, Heft 9, Seite 293-332.
- 16.2.1.1-5** ASM Handbook Vol.16 „Machining“, ASM International, ISBN 0-871170-007-7, 1999, Seite 29-32, „Cutting Fluids“, Seite 40, 159, 327.
- 16.2.1.1-6** E.Schreiber, „Die Eigenspannungsbildung beim Schleifen gehärteten Stahls“, Zeitschrift „Härtereitechnische Mitteilungen“, 28 (1973), Heft 3.
- 16.2.1.1-7** E.Schreiber, „Härterisse und Schleifrisse - Ursachen und Auswirkungen von Eigenspannungen (Teil1)“, Zeitschrift „ZwF“ 71 10 (1976), Seite 460-465.
- 16.2.1.1-8** E.Schreiber, „Härterisse und Schleifrisse - Ursachen und Auswirkungen von Eigenspannungen (Teil2)“, Zeitschrift „ZwF“ 71 12 (1976), Seite 565-570.
- 16.2.1.1-9** „GE Inspecting CF6-50 Disk Fragments“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, April 5, 1982, Seite 33. “ .
- 16.2.1.1-10** „A300 Damaged by Engine Fire“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, March 29, 1982, Seite 33. “ .
- 16.2.1.1-11** „Cracked disc caused CF6 turbine failure“, Zeitschrift „Flight International“, 17 April, 1982, Seite 1005. “ .
- 16.2.1.1-12** S.Radhakrishnan, A.C.Raghuram, R.V.Krishnan, V. Ramachandran, „Fatigue Failure of Titanium Alloy Compressor Blades“, ASM „Handbook of Case Histories in Failure Analysis, Volume 2“, Kapitel „Rotating Equipment Failures“, Seite 299 und 300.
- 16.2.1.1-13** Investigation Report B/921/1032, „Boeing 727-277 VH-ANA...“, 4. July 1992, Seite 1-20.

- 16.2.1.1-14** M. Field, J.F. Kahles, „Übersicht über die Oberflächenbeschaffenheit bearbeiteter Werkstücke, ‘Surface Integrity’“, Zeitschrift „Fertigung“, Ausgabe 5/72, Seite 145-156.
- 16.2.1.1-15** „JT8D Inspection Ordered by FAA“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, July 21, 1980, Seite 23. “. .
- 16.2.1.1-16** Airworthiness Directive AD/JT8D/17, „Eighth Stage Rear Compressor Front Hub“, 9/80, Civil Aviation Authority, Australia, 1998 .
- 16.2.1.1-17** Metals Handbook Ninth Edition „Vol.9 Metallography and Microstructures“, ASM International, ISBN 0-871170-007-7, 1988, Seite 19.
- 16.2.1.1-18** „Titanium Design and Fabrication Handbook for Industrial Applications“, „Titanium Surface Treatments, Cleaning & Maintenance“, Titanium Metals Corporation (Timet), www.timet.com/fab-p34.htm, Seite 1.
- 16.2.1.1-19** Airworthioness Directive AD/CFM56/9, „HPTR Fan Disk Inspection“, 2/98, Civil Aviation Authority, Australia, 1998 .
- 16.2.1.1-20** „Titanium Design and Fabrication Handbook for Industrial Applications“ Titanium Metals Corporation (TIMET), www.timet.com/fab-p34.htm.
- 16.2.1.1-21** W.Klose, „Kühlschmiermittel auf Metalloberflächen“, Zeitschrift „Oberflächentechnik“, 86 (1995) Nr. 6, Seite 1876-1882.
- 16.2.1.1-22** W.Lehmann, „Wassermischbare Flüssigkeiten für das Bearbeiten von Metallen“, Zeitschrift „Technische Rundschau“ Nr. 23, 1. Juni 1976, Seite 112.
- 16.2.1.1-23** R. Völler, „Einflüsse des Kühlschmierstoffs beim Normal- und Hochgeschwindigkeitsschleifen“, Zeitschrift „Schmiertechnik und Tribologie“ 21. Jahrgang Nr4, 1974, Seite 75-79.
- 16.2.1.1-24** J.Maranchik,Jr, „Machining Data for Titanium Alloys“,
- 16.2.1.1-25** ASM Handbook Vol. 4 „Heat Treatment“, ASM International, ISBN 0-871170-379-3, 2001, Seite 919, 920.
- 16.2.1.1-26** K.Schjold, S.Schmid, „Fabrikation und Qualitätssicherung bei Schaufeln axialer Turbomaschinen“, Zeitschrift „Technische Rundschau Sulzer“, 2/1977, Seite 61-68.
- 16.2.1.1-27** H.Bonk, „Brand- und Explosionsschutzkonzepte bei der Magnesiumbearbeitung“, www-isf.maschinenbau.uni-dortmund.de, 28. Juli 2005. Seite 1-9.
- 16.2.1.1-28** T.Giglio, „Titan in der Orthesentechnik“, Zeitschrift „Orthopädie-Technik“ 5/96, Seite 372-375.

16.2.1.1-29 W.D.Feist, F.Nillasson, K.M.Fox „The Influence of Manufacturing Anomalies on Fatigue Performance of Critical Rotating Parts in Aero-engine“, MANHIRP-Project, EC-Contract G4RD-CT2000-00400 5 GROWTH, 2002.

16.2.1.1-30 H.Schlicht, „Über die Entstehung von White Etching Areas (WEA) in Wälzelementen“, Zeitschrift „HTM (Härtereitechnische Mitteilungen)“ Nr. 29 (1973) Heft 2, Seite 112-123.

16.2.1.1-31 E.Just, „Mikrobielle Gefährdung von Kühlschmierstoffen“, Zeitschrift „Tribologie + Schmierungstechnik“, 30. Jahrgang, Heft 4/1983, Seite 202-204.

16.2.1.1-32 National Transportation Safety Board (NTSB), Report number MIA99FA252 „Uncontained engine failure, Boeing 737-300, September 12, 1999“, Seite 1-6.

16.2.1.1-33 J. Hall, National Transportation Safety Board (NTSB), Safety Recommendation February 25, 1998, „Reply refer to: A-98-25 and -26“, Seite 1-4.