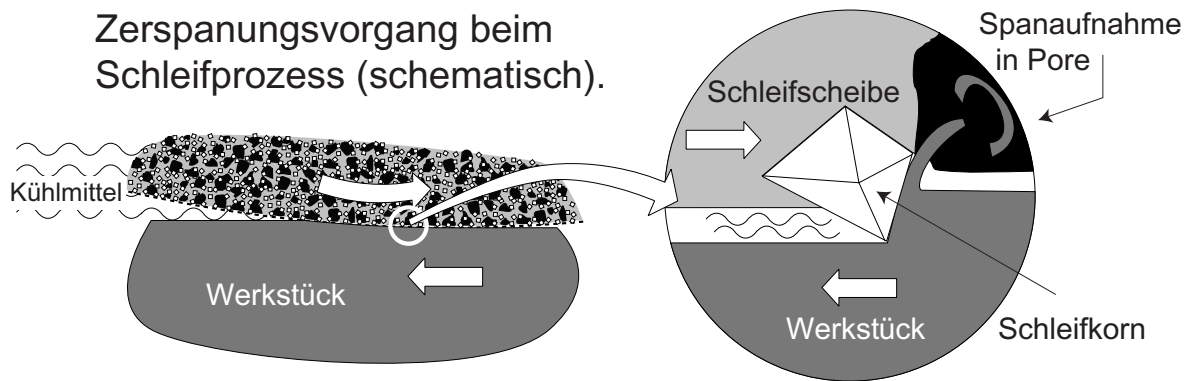


12.2.1.1.1 Schleifverfahren, maschinell und handgeführt.



In der Technik kommen unterschiedliche **Schleifverfahren** zur Anwendung. **Maschinelles Schleifen** auf Schleifmaschinen (Bild 12.2.1.1.1-2), **handgeführtes Schleifen**, Bandschleifen (Bild 12.2.,1.1.1-3), Vibrationsschleifen (Bild 12.2.1.1.1-4) und Trennschneiden. Viele Werkstoffe sind nur mit Schleifverfahren bearbeitbar. Dazu gehören gerade **Werkstoffe des modernen Leichtbaus**. In einigen Fällen müssen als Schleifscheibenkörnung Industriediamanten verwendet werden.

- Sehr **spröde metallische Werkstoffe** wie manche intermetallische Phasen,
- hoch **abrasive metallische Werkstoffe** wie Dispersionsgehärtete warmfeste Legierungen,
- **Beschichtungen** wie galvanische Schichten, z.B. Chromschichten.
Verschleißschichtschichten wie Wolframcarbid/Kobalt
Thermische Spritzschichten wie Wärmedämmschichten aus Zirconoxid,
- **Konstruktionskeramiken** wie Al-Oxid und Si-Karbid.
- **Faserverbunde** wie Siliziumcarbid- oder Borfaser verstärkte metallische Legierungen (z.B. Titanlegierungen oder Aluminiumlegierungen).

Üblicherweise beschränken sich Standardwerke der Maschinenelemente bei **Problemen** und **Schäden** des Schleifprozesses auf Überhitzungen (Schleifbrand, Bild 12.2.1.1.1-1 „F“) und Schleifrisse (Bild 12.2.1.1.1-3 „O“, Bild 12.2.1.1.1-4). Dies sind jedoch beim Weitem nicht die einzigen potenziellen Probleme (Bild 12.2.1.1.1-1, Bild 12.2.1.1.1-2 und Bild 12.2.1.1.1-3). In vielen Fällen treten später im Fertigungsprozess oder Betrieb Schäden auf die nur indirekt mit dem Schleifprozess zusammenhängen. Dazu gehören Schleifspritzer auf nicht geschliffenen Bauteilflächen (Bild 12.2.1.1.1-2 „I“).

Ein besonderes Augenmerk sollte auch dem, häufig eher als kosmetisch relevanten eingeschätzten **handgeführten Schleifen** gelten. Diese technisch untergeordnete Bedeutung ist jedoch unberechtigt. Das **Nacharbeiten/Runden/Entgraten von Kanten** dient bei sicherheitsrelevanten und ‘anspruchsvoll’ belasteten Bauteilen gewöhnlich der Gewährleistung einer ausreichend hohen **Schwingfestigkeit**. Selbst kleine Nachlässigkeiten können andernfalls zu katastrophalen Schäden führen (Bild 12.2.1.1.1-8.1 und Bild 12.2.1.1.1-8.2). Aus diesem Grund ist auf ausreichend ausgebildetes, handwerklich geschicktes, erfahrenes und nicht zuletzt motiviertes **Personal** zu achten.

Bild 12.2.1.1.1-1 (Fortsetzung Bild 12.1.1.1-1): Die in den Bildern 12.2.1.1.1-1 bis Bild 12.2.1.1.1-3 zusammengestellten Schäden und Probleme im Zusammenhang mit Schleifen sollen dem **Konstrukteur** die unterschiedlichen **Herausforderungen** bewusst machen. In vielen Fällen kann er bereits vor der Fertigung Risiken durch Gestaltung des Bauteils, Auswahl der Verfahren und Abläufe und Zeichnungsangaben **Risiken minimieren**. Das gilt sowohl für den Fertigungsprozess als auch den späteren Betrieb. Die Reihenfolge der Betrachtungen spiegelt nicht die Wichtigkeit und Sicherheitsrelevanz wieder.

„A“ **Schwingerermüdung** beim Schleifen (Band 1 Bild 5.4-7.1). Nur selten ist diese Gefahr bewusst. Schleifprozesse regen hochfrequente Schwingformen an. Betroffen sind insbesondere filigrane, dünnwandige Bauteilzonen (z.B. Schaufelblätter von Turbomaschinen). Besonders gefährdet sind 'Integrale Bauweisen' wie Blinks (Band 1 Bild 3-7). Hier fehlt eine dämpfende Reibung an Fügeflächen. Deshalb muss der Konstrukteur bei gefährdeten Werkstücken geeignete Dämpfungsmaßnahmen vorsehen und mit der der Fertigung vorbereiten. Treten bei einem Zerspanungsprozess, insbesondere dem Schleifen **hochfrequente, kreischende Geräusche** (Bild 12.2.1.1.1A, Lit. 12.2.1.1.1-12) auf ist zu prüfen ob die Gefahr einer Schädigung durch Schwingerermüdung besteht. Ein gefährlicher Abfall der Schwingfestigkeit ist auch ohne Makroriss nicht auszuschließen da zerstörungsfrei nicht nachweisbar! Bei Verdacht ist der Konstrukteur von der 'Fertigung' unverzüglich zu konsultieren.

„B“ **Peppering** (Bild 12.2.1.1.1-4): Der Begriff kommt aus dem Angelsächsischen und beschreibt den Vorgang bildhaft. Beim Gegenlaufschleifen können aus der Scheibe gebrochene Körner oder Partikel der Scheibenmatrix so heftig auf die Schleiffläche geschleudert werden, dass sie stecken bleiben. **Nachfolged**

Pfeifgeräusche können Probleme ankündigen

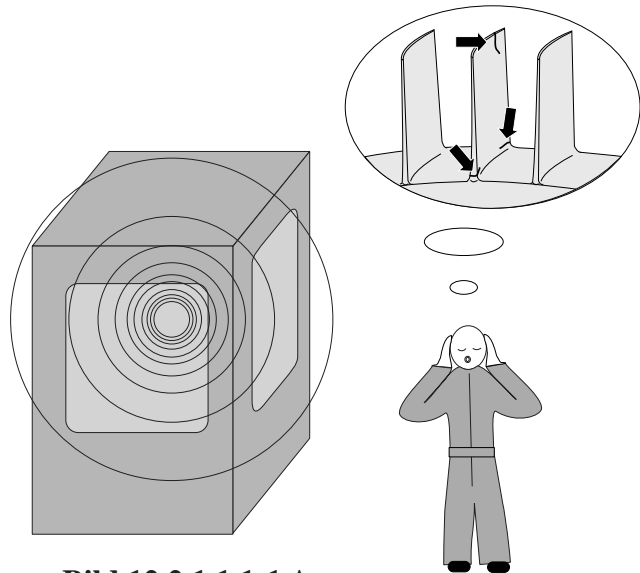


Bild 12.2.1.1.1-1 A

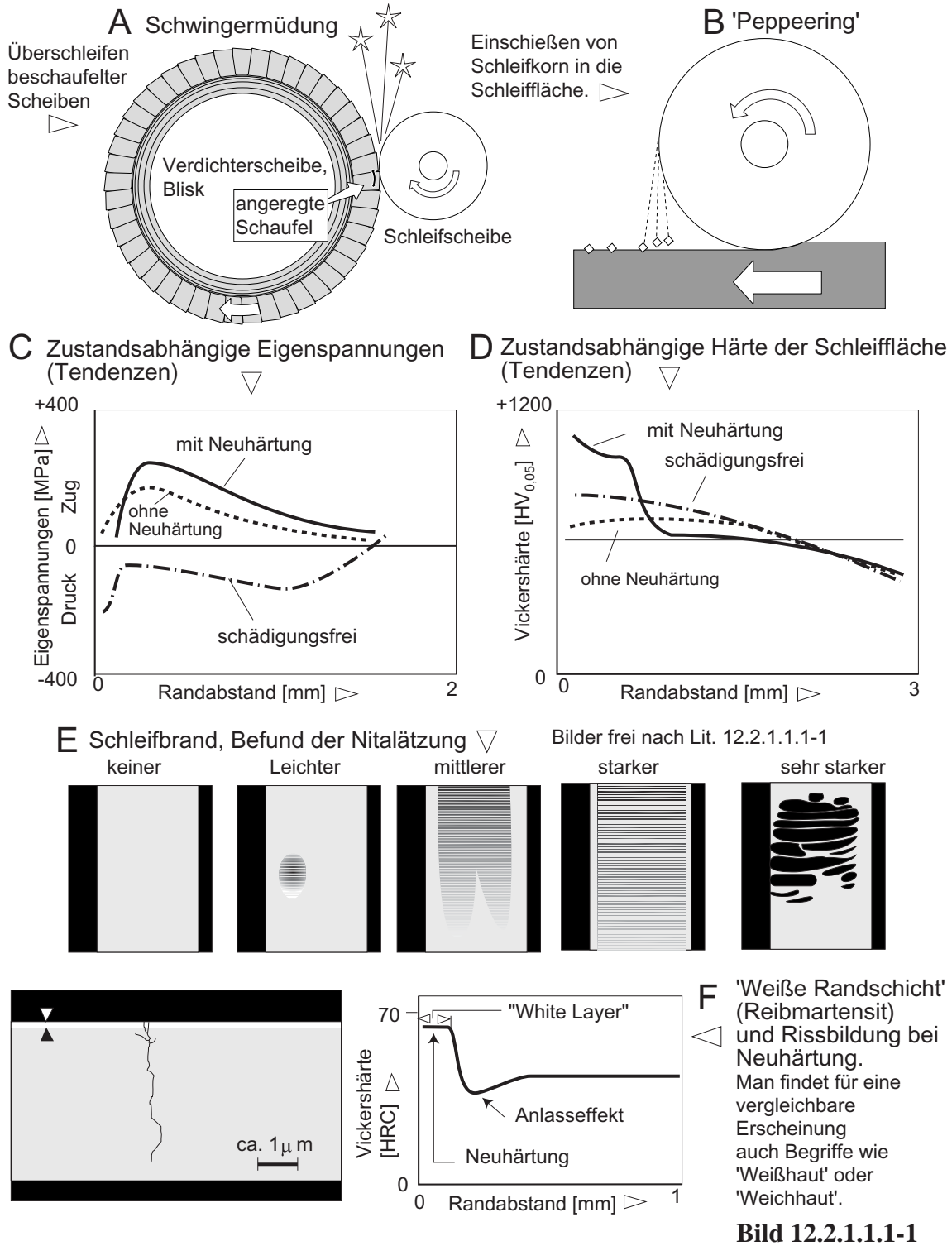
Fertigungsprozesse wie eine **galvanische Beschichtung** (Störungen einer Cr- oder Ni-Schicht) oder **Diffusionsschichten** können dadurch beeinträchtigt werden. Auch im **Betrieb** können **Rauigkeit** und **Verschleißverhalten**, insbesondere von Gleitflächen, unzulässig beeinflusst werden.

„C“ **Eigenspannungen**, vom Schleifvorgang induziert (Bild 12.2.1.1.1-4), können in den nachfolgenden Fertigungsprozessen und im Betrieb Schäden auslösen. Durch eine 'schockartige', ausreichend hohe örtliche Aufheizung kommt es bei metallischen Werkstoffen zu einem **Stauchprozess im plastischen Bereich** (Bild 12.2.1.1.1-4). Das führt beim Abkühlen zu **Zueigenspannungen**.(!) die im Gegensatz zu Druckeigenspannungen auf unterschiedliche Weise schädigend wirken:

- **Abfall der nutzbaren Schwingfestigkeit** durch Anheben der Mittelspannung im Betrieb (Band 1 Bild 5.4.3.2-4)..
- **Spannungsrisskorrosion** in nachfolgenden Fertigungsschritten (Ätzen, Bild 12.2.2.4-12 und Band 1 Bild 5.6.3.1.1-7) und im Betrieb. Bei **martensitischen Stählen** spielt zusätzlich die **Neuhärtung** als Folge des Überschreitens

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Schleifverfahren

Direkte und indirekte Probleme und Schäden durch Schleifbearbeitung beschränken sich bei Weitem nicht auf Rissbildung.



der Austenitisierungstemperatur eine besondere Rolle (Diagramm).

„D“ **Härteänderung** der Schleiffläche: Auch hier lässt sich zwischen zwei Mechanismen unterscheiden. Zum Einen führt die unvermeidli-

che plastische Verformung der Schleiffläche beim Schleifvorgang generell zu einem werkstoffspezifischen Härteanstieg. Dieser ist jedoch gewöhnlich unbedenklich. Es ist sogar möglich, dass die Konstruktion von dieser unbewußt (Schwingfestigkeit, Gleitverhalten) profitiert.

Eine deutlich tiefer gehende Härteänderung je nach Aufheizung beim Schleifprozess beobachtet man bei **martensitischen Stählen**. Kommt es zur **Neuhärtung** geht eine hohe Härte, gewöhnlich mit einem Afall der plastischen Verformbarkeit (Anstieg der Sprödigkeit) einher. Dies unterstützt die Bildung von Schleifrisen („D“).

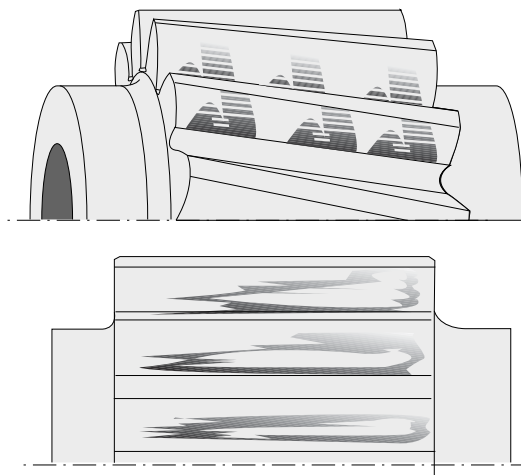
Nachteilig ist aber auch, wenn die Schleiftemperatur zwar nicht zur Neuhärtung reicht, jedoch als **Folge eines Anlassens ein Härteabfall (Weichhaut)**. Damit geht ein entsprechender Festigkeitsabfall, besonders der Schwingfestigkeit einher. Hier sind dann im Betrieb, typischerweise an Wälzflächen (Zahnflanken, Band 2 Bild 6.4.1-5; Wälzlagerlaufbahnen, Band 2 Bild Bild 6.3.1.1-4) **Ermüdungsausbrüche** (Ermüdungspittgings) zu erwarten.

„E“ **Schleifbrand** bezeichnet eine Überhitzung der Schleiffläche. In „C“ und „D“ wurden bereits damit in Zusammenhang stehende Effekte wie Schleif-Eigenstressungen und Härteänderungen behandelt. Grundsätzlich ist Schleifbrand unerwünscht. Die **Grenzen** sollten in Spezifikationen definiert sein. Dazu wird allgemein der Befund der **Nitalätzung** (Salpetersäure) genutzt. Hier zeigt sich eine Schädigung in der Intensität einer **Dunkelfärbung** betroffener Zonen.

„F“ **Weißer Randschicht** (Weißhaut Lit. 12.2.1.1.1-1; engl. white layer, Lit 12.2.1.1.1-13). Eine solche Erscheinung findet man auch bei Zerspanungsverfahren mit definierter Schneide. Die **schlechte Anätzbarkeit** bei der **metallografischen Untersuchung** (Band 1 bild 2.2.2.4-2) prägte die Begriffe.

Grundsätzlich ist bei **plastisch verformbaren, metallischen Werkstoffen** unter hoher Oberflächenbeanspruchung einer Zerspanung mit White layer zu rechnen. Bereits das stark verformte Gefüge lässt sich schlecht anätzen. Hinzu kommen Effekte bei **aushärtbaren Legierungen** (z.B. Ni-Basislegierungen) wenn die Aushärtungsphase in Lösung gegangen ist. **Martensitische Stähle** bilden zusätzlich bei einer Neuhärtung schlecht anätzbares **Härtegefüge**. Diese Martensitbildung wird von der starken Verformung mit Entstehung von **‘Reibmartensit’** unterstützt. Gewöhnlich ist die **‘Weiße Schicht’** versprödet was die Entstehung von **Schleifrisen** begünstigt.

Nitalätzungsbefund von Schleifbrand an einsatzgehärteten Zahnrädern.

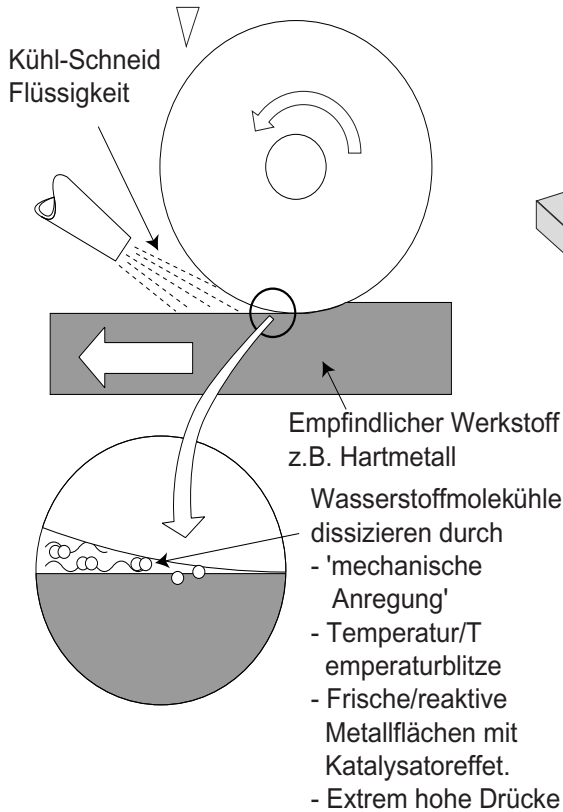


(Lit. Angaben nachempfunden)

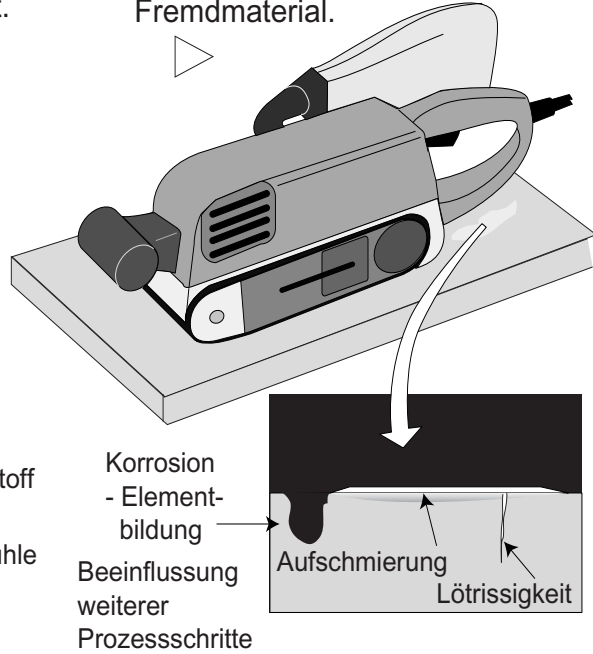
Bild 12.2.1.1.1-1 E

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Schleifverfahren

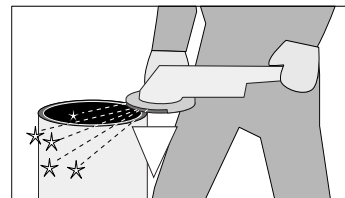
G Wasserstoffinduzierte Rissbildung durch Tribosorption im Schleifkontakt.



H Übertragen/Aufschmieren von Fremdmaterial.



| Funken, Späne, Schleifstaub



K Reaktives Schleifkorn:

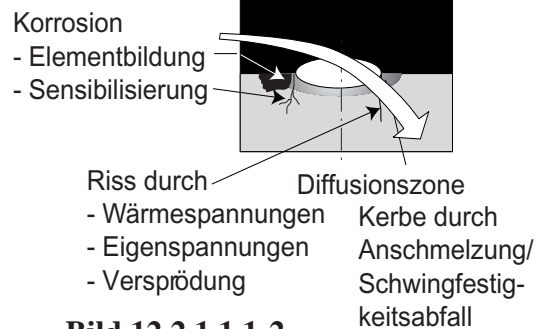
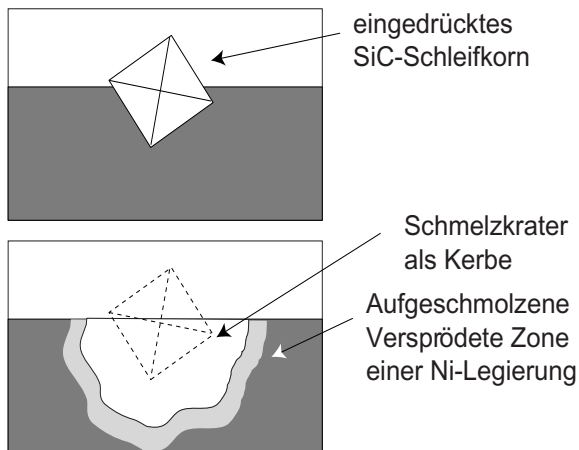


Bild 12.2.1.1.1-2

Bild 12.2.1.1.1-2 (Fortsetzung von Bild 12.2.1.1.1-1).

„G“ **Wasserstoffaufnahme und Rissbildung** (Lit. 12.2.1.1.1-8): Die extremen Bedingungen im Schleifkontakt sind in der Lage den Kühlschmierstoff (Wasser) zu dissoziieren (Band 1

Bild 5.7-9). Neben Temperatur und Druck im Medium wird als Haupteffekt in erster Linie die mechanische Einwirkung gesehen. Es entstehen reaktive, frische Metallflächen und plastische Verformungen. Man spricht von **Tribosorption**.

Durch Wasserstoffaufnahme nach dem Schleifen wurde z.B. eine transkristalline Rissbildung mit 'Minifischaugen' (siehe auch Bild 12.2.1.3.1-22) an einem **Spiralbohrer** aus **Schnellstahl** beobachtet. Dies ist ein belastbares Indiz einer Wasserstoffverprödung (Band 1 Bild 5.7.1-2).

Es ist nicht auszuschließen, dass Wasserstoff in viel mehr Schadensfällen an geschliffenen Bauteilen eine Rolle spielt als bisher bewusst. So sollte an Verzahnungen besonders der Anrissbereich (falls noch auswertbar) auf Merkmale einer Wasserstoffversprödung überprüft werden (REM, Band 1 Bild 2.2.2.4-3).

„**H**“ **Aufschmierungen** von Fremdmaterialien/-metallen: Diese Gefahr besteht besonders wenn das gleiche Werkzeug (Schleifscheibe, Schleifband) an verschiedenen Bauteilen unterschiedlicher Werkstoffe oder an einer Werkstoffkombination (z.B. Stahl/Lagerbronze) genutzt wird. Sowohl in den folgenden Fertigungsschritten wie auch im Betrieb können die Aufschmierungen gefährliche Schäden auslösen:

- **Oberflächenversprödung** durch **Diffusion** mit Mikrorissbildung (Band 1 Bild Bild 5.3-8) und Schwingfestigkeitsabfall.
- **Lötrissigkeit** (Band 1 Bild 5.3-6) bei Wärmebehandlung, Schweißen, hohen Betriebstemperaturen).
- **Korrosion** in Form von Lochfraß (Band 1 Bild 5.6.1.1-1) mit kritischer Absenkung der Schwingfestigkeit.

„**I**“ **Funken, Späne, Schleifstaub**: Heiße Funken und Späne können über die Wärmeabgabe, wenn sie auf eine bearbeitete Fläche treffen vielfältigen Schaden anrichten (Bd 3.2 Bild 12.2.2.6-2, Bild 12.2.2.6-3 und Bild 12.2.2.6-4).

- Festigkeitsabfall durch Gefügeänderung (z.B. Anlassen).
- Versprödung (Diffusion, siehe „**K**“).
- Kerbwirkung.bv
- Rissbildung (Warmriss),

- Zugeigenspannungen,
- Elementbildung/Korrosion.

Auch **loser Staub** kann gefährlich werden wenn er beispielsweise vor einer Wärmebehandlung nicht entfernt wird und so festbackt.

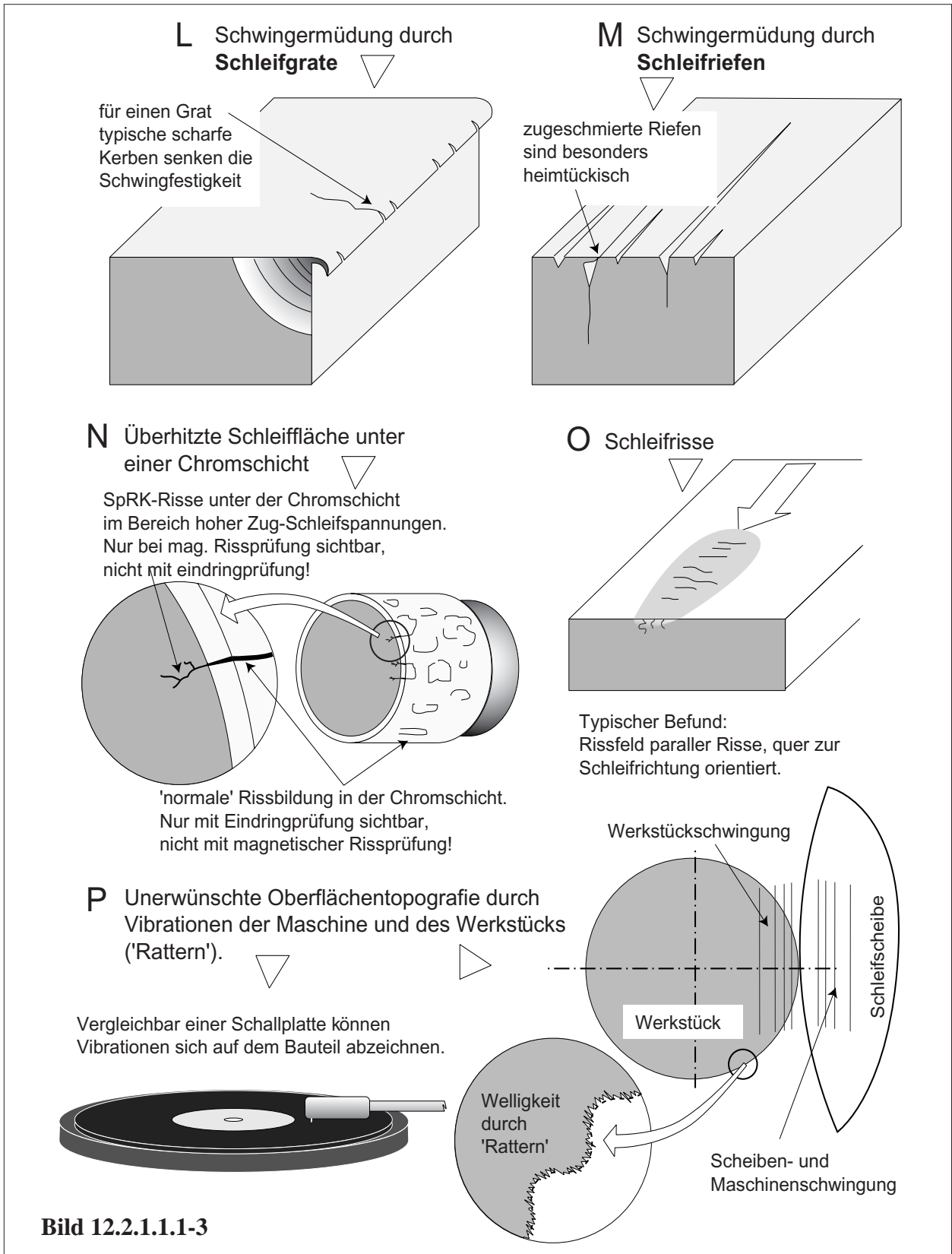
„**K**“ **Reaktives Schleifkorn**: Al-Oxid und CBN sind sehr reaktionsträge. Hier wurden keine Reaktionen von stecken gebliebenem Schleifkorn mit dem bearbeiteten Werkstoff bekannt. Anders verhält es sich mit **Siliziumcarbid** (SiC). Dies kann bei hohen Temperaturen (z.B. Wärmebehandlung oder Betriebstemperaturen) **mit Ni-Legierungen reagieren** und spröde Phasen bilden.

Aus diesem Grund ist darauf hinzuweisen, dass keine Schleifmittel (Schleifscheiben, Trennscheiben, Schleifpapier und -Bänder) mit SiC versehentlich verwendet werden. Selbst scheinbar harmlose Haushaltsmittel wie Polierwolle (Topfkratzer) aus **Kunststofffasern mit gebundenem SiC-Pulver** (erkennbar an der dunklen Farbe) sind tabu. Zulässig dagegen ist meist ein helles Produkt das Al-Oxid (Al_2O_3 = Korund) gebunden hat.

Bild 12.2.1.1.1-3 (Fortsetzung von Bild 12.2.1.1.1-2):

„**L**“ **Schleifgrate**: Mit Zerspanungsgraten ist auch beim Schleifprozess zu rechnen. Entgegen der landläufigen Ansicht, dass sie lediglich ein Verletzungsrisiko darstellen sind sie vom technischen Aspekt gefährlich (Bd 3.2 Bild 12.2.2.2-6). Betrachtet man einen Grat bei höherer Vergrößerung erkennt man gewöhnlich, dass er vielfach eingerissen ist. Diese scharfen Kerben an einer Kante die auch im Spannungsniveau exponiert ist bedeutet eine bedenkliche **Absenkung der Schwingfestigkeit**. Aus diesem Grund sind an dynamisch beanspruchten Bauteilen Grate mit einem **möglichst definierten Prozess** zu entfernen und die Kante zu runden. Natürlich beeinflussen Grate auch **nachfolgen-**

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Schleifverfahren



de **Fertigungsprozesse** wie galvanische Beschichtungen. An den Graten baut sich wegen der Feldkonzentration verstärkt Schichtmate-

rial zu einem **'galvanischen Grat'** auf. Wird dieser nicht entfernt können sich später **im Betrieb Partikel lösen** (z.B. Chrom- oder

Nickelperlen). Sie blockieren Komponenten (z.B. von Reglern und Ventilen) flüssigkeitsdurchströmter Systeme wie für Öl- oder Kraftstoff.

„M“ **Schleifriefen** sind gewöhnlich scharfkantig und können je nach Orientierung zur dynamischen Beanspruchung die **Schwingfestigkeit** eines Bauteile unzulässig beeinflussen (Bild 12.2.1.1.2-11.2). Bild 12.2.2.1-4 und Bild 12.2.2.1-5). Schleifriefen können folgende Fertigungsverfahren beeinflussen (Bild 12.2.1.1.1-6). Ein besonderes Problem ist die Neigung des Schleifvorgangs **Riefen zuzuschmieren** (Bild 12.2.1.1.1-5).

„N“ **Aufchromen** einer überhitzten Schleiffläche wird angewendet um Verschleißflächen wieder auf Maß zu bringen und/oder geeignete Gleitflächen herzustellen (z.B. für Wellendichtringe, Band 2 Kapitel 6.10.2.1). Dazu muss die zu beschichtende Fläche erst abgeschliffen werden. Es besteht die Gefahr, dass diese Fläche beim Schleifvorgang überhitzt und durch Gefügeänderung sowie Zugeigen- spannungen (Schleifspannungen) für Spannungsrissskorrosion (SpRK) 'sensibilisiert' wird. Durch die für Cr-Schichten typischen und akzeptierten/funktionsnotwendigen Risse erhalten Fertigungsmedien wie **Ätzmittel** oder **Kühlschmiermittel** (?) zur Schleiffläche Zutritt. So entstehen **Risse unter der Cr-Schicht**. Hier liegt eine Fehlinterpretation beim Nachweis nahe (Bild 12.2.1.8-3). Das ist der Fall wenn nicht bewusst ist, dass die **Cr-Schicht unmagnetisch** ist. Bei der magnetischen Prüfung werden also, im Gegensatz zur Eindringprüfung, die typischen Chromrisse nicht angezeigt. Sind trotzdem **Anzeigen** vorhanden, handelt es sich um **gravierende Risse im Grundwerkstoff** bzw. dessen Schleiffläche die sich sogar durch die Cr-Schicht abzeichnen.

„O“ **Schleifrisse** gelten als der eigentliche Schleifschaden. Dies ist schon aus der Sicht der Bauteilsicherheit zumindest fraglich. Zwar

bedeuten Schleifrisse einen deutlichen Festigkeitsabfall, insbesondere der Schwingfestigkeit. Sie sind jedoch **mit sreiengeeigneten Zerstörungsfreien Prüfverfahren wie Magnetischer Rissprüfung oder Eindringprüfung gut zu finden**. Schleifrisse sind makroskopisch an der Orientierung quer Schleifrichtung identifizierbar. Gewöhnlich kommen sie in einem Rissfeld vor (Bild 12.2.1.1.1-4). Eine mikroskopische Untersuchung weist die meisten Schleifrisse deutlich als Warm-/Heißrisse aus. D.h. sie entstehen im teigigen Zustand der Korn- grenzen (Bkld 11.1-8, Bild 12.2.1.3.1-10 und Band 1 Bild 5.3-5).

Ein besonderes Problem von Schleifrisse ist, dass sie oft an der Oberfläche vom Schleifvorgang **unerkennbar verschmiert** sind. Das ist bei **unmagnetischen Werkstoffen** wie Leichtmetallen (Magnesium-, Aluminium- und Titanlegierungen) und austenitischen Stählen sowie Ni-Legierungen besonders problematisch. So ist das einzige praktikable Verfahren, die **Eindringprüfung inakzeptabel unsicher**. Hier hat sich ein **'Rissöffnungsglühen'** bewährt. Dabei wird das Werkstück einige Stunden bei der höchsten zulässigen Betriebstemperatur gehalten. Die liegt für die hochwarmfesten Ni-Legierungen gewöhnlich über 600°C. Dadurch öffnen sich die Risse und lassen eine befriedigend sichere **Eindringprüfung** zu. Den **Rissöffnungseffekt** kann man sich als **Relaxation** (Kriechen) **der feinen Grate** vorstellen. Diese stehen unter hohen Zug-Schleifspannungen und richten sich beim Spannungsabbau etwas auf.

„P“ **Oberflächentopografie** durch **'Rattern'** ist ein selbstverstärkender Effekt ähnlich dem 'Flattern' (Bild 12.2.2.5-2 und Band 1 Bild 3.9.2).

Der Vorgang erinnert an einen bekannten Versuch von Edison. Zur Demonstration der Schallaufzeichnung nutzte er eine Stahlnadel. Sie vibriert in der Frequenz des Schalls und ritzt eine Walze aus weichem Werkstoff. Umgekehrt konnte der Schall wieder erzeugt werden. Ganz ähnlich können **Schleifflächen durch Vibration** von Maschine/Scheibe und/

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Schleifverfahren

oder Werkstück eine störende **Mikrowelligkeit** erfahren (Lit. 12.2.1.1.1-10). Durch gezielte Veränderungen der **Steifigkeiten** und zusätzlicher **Dämpfung** lässt sich das Problem beherrschen.

Ein vielversprechende Entwicklung will die Schwingungen messen und in einer „Feed-Back-Schleife“ die **Drehzahlen so verändern**, dass die selbstverstärkende Anregung des Ratterns nicht mehr auftritt.

Bild 12.2.1.1.1-4: Schwer zerspanbare hochfeste Werkstoffe 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. 12.2.1.1-2 und Lit. 12.2.1.1-14) 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. 12.2.1.1-4, -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 12.2.1.1-3). 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 11.1-8).

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 12.2.2.1-7). 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 Einschlüge, 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 13.3.1-1) 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 Ge-

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

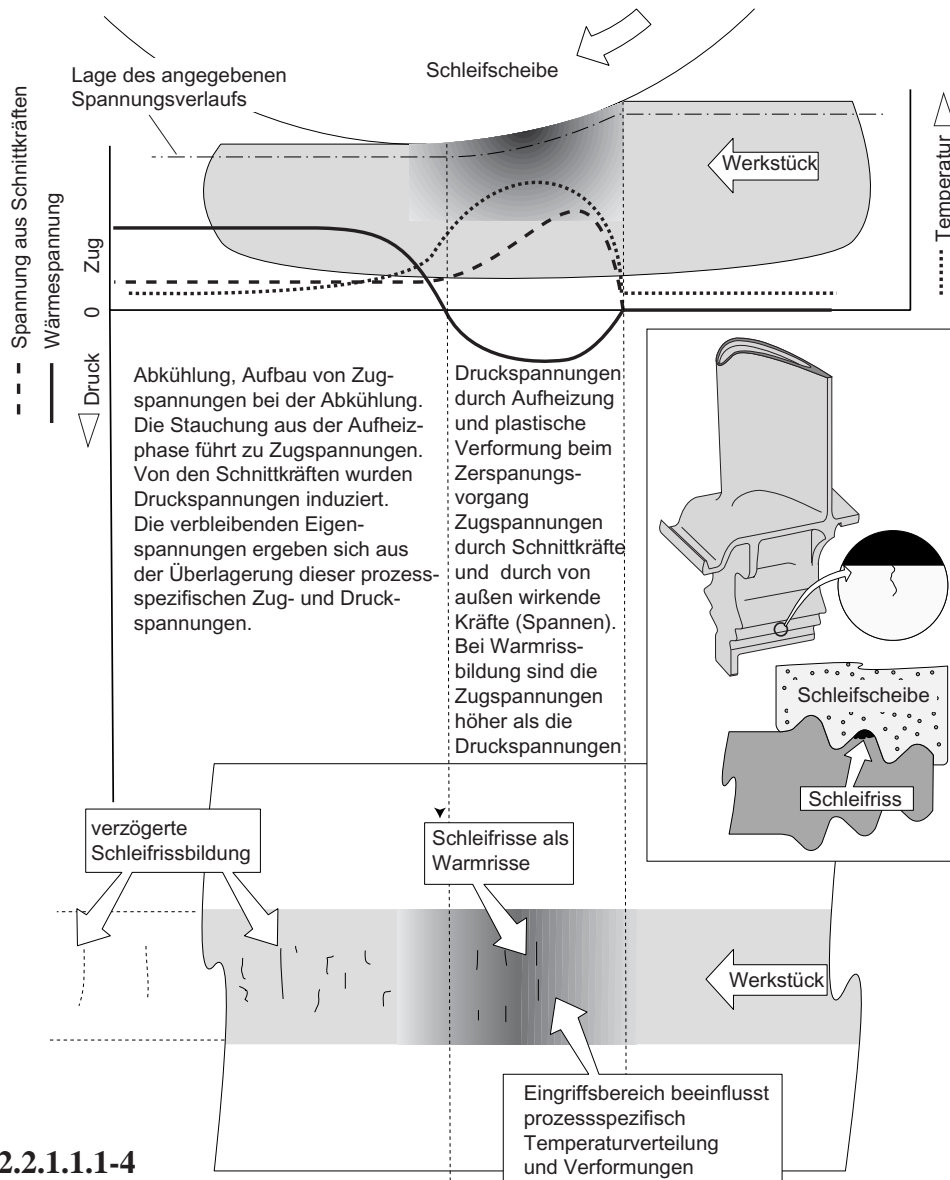


Bild 12.2.1.1.1-4

wicht haben und sich kombinieren. Risse (Schleiffrisse) können je nach Werkstoff und Schleifbedingungen während des Zerspannungsvorgangs und/oder danach (verzögert) auftreten (Skizze unten). Gewöhnlich werden mehrere senkrecht zur Zerspannungsrichtung orientierte Schleiffrisse beobachtet.

Dieser **Rissverlauf** erklärt sich aus Temperatur- und Verformungsverteilung (Lit 12.2.1.1-

4) in der Werkstückoberfläche. Er wird von **unfassten Schleifkonturen** wie Kanten oder Höcker bei Formscheiben (mittlere Skizze) beeinflusst. In solchen Fällen trägt der behinderte **Kühlmittelzutritt** sowie die große Zerspannungsfläche im Verhältnis zum Wärme ableitenden Volumen zu einer Überhitzung mit Rissbildung bei.

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Schleifverfahren

Schleifrisse sind ein typisches Problem der Fertigung von Turbinenschaufeln.

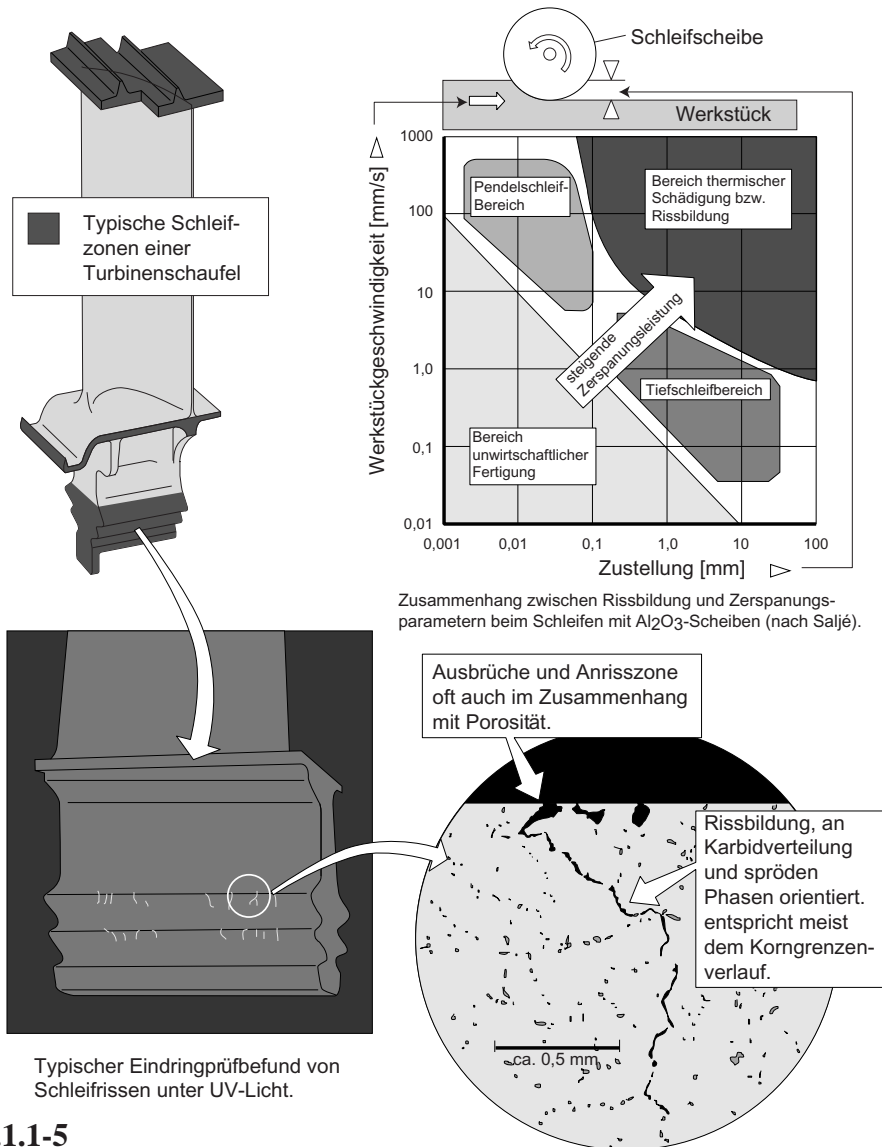


Bild 12.2.1.1.1-5

Bild 12.2.1.1.1-5: Schleifrisse sind ein typisches Problem (Lit.12.2.1.1-1 und Lit. 12.2.1.1-26) der Bearbeitung hochpräziser Anlageflächen an Deckband und Fuß von Turbinenschaufeln (Skizze oben links). Das typische Erscheinungsbild sind, bevorzugt auf konvexen Konturen, quer zur Schnittrichtung orientierte Rissfelder (Skizze unten links). Die Risse verlaufen bevorzugt entlang spröder Phasen wie Karbiden.

Je 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 Eindringprüfbefund so beeinflussen, dass **Rissbildung und Porosität verwechselt** werden. Andererseits besteht die Gefahr eines Verschmierens der Schleifrisse. Deshalb wird gewöhnlich nach dem Schleifprozess, vor der

*Eindringprüfung ein Warmbehandlungszyklus zur Rissöffnung eingesetzt (Bild 13.3.1-7). Das Diagramm oben rechts zeigt beispielhaft die **Einschränkungen der Schleifparameter um unter ökonomisch sinnvollen Bedingungen Schädigungen zu vermeiden**. Einesteils versucht man in einem wirtschaftlichen Bereich oberhalb einer Mindestzerspanungsleistung zu arbeiten. Auf der anderen Seite begrenzt die thermische Schädigung (Bild 12.2.1.1-2) die Zerspanungsleistung.*

Bild 12.2.1.1-6: 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 12.2.2.3-11 und Bild 12.2.2.3-13). 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 12.2.2.3-1, Bild 12.2.2.3-2, Bild 12.2.2.3-11, Lit 12.2.1.1-18). **Stahlbürsten** aus Kohlenstoffstahl hinterlassen z.B. auf **Titanscheiben** Rückstände die im Betrieb **Korrosion** auslösen (Lit. 12.2.1.1-20). 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 12.2.2.3-11).

Für Titanlegierungen besteht die erhöhte Gefahr unzulässiger Veränderungen (Festigkeit, Zähigkeit) durch **Wasserstoffaufnahme in Ätz- und Reinigungsbädern** (Bild 12.2.2.3-13).

Beobachtet wurde, dass Fe-Verunreinigungen der Oberfläche, beim **Schweißen von Ti-Legierungen**, mit der Bildung spröder Phasen, Risse begünstigen können (Bild 12.2.1.3-19). 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**. Es bilden sich spröde Phasen und Ansmelzungen mit gefährlichem Festigkeitsabfall. Deshalb ist darauf zu achten, dass **nur Schleifmaterial mit unbe-**

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Schleifverfahren

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

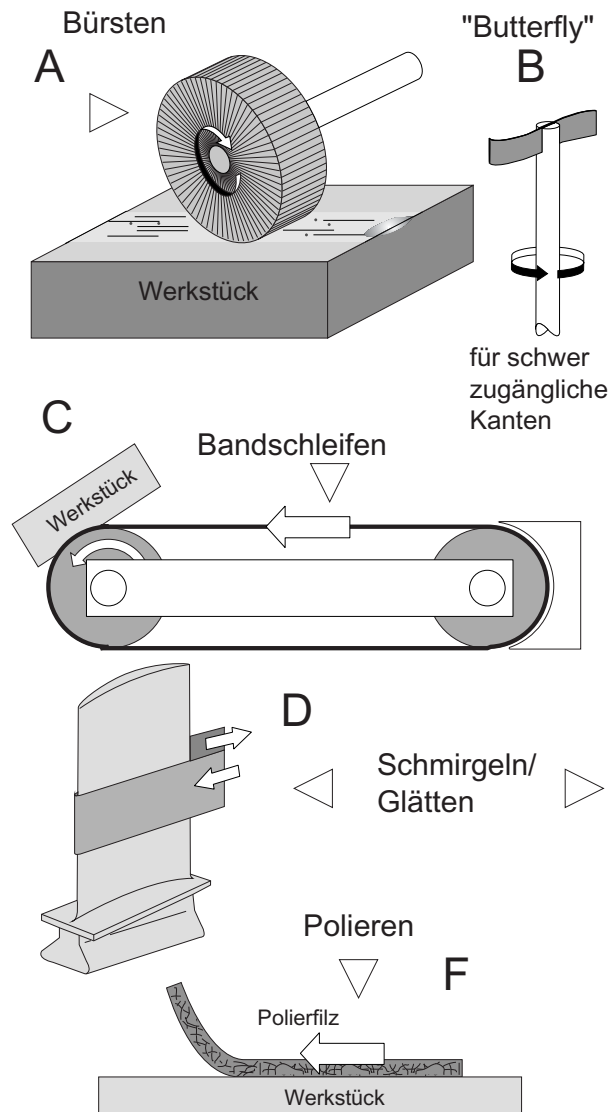
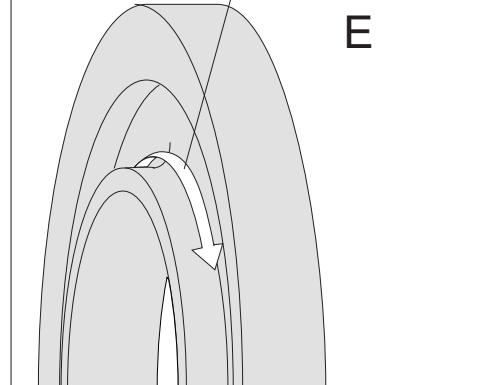


Bild 12.2.1.1.1-6

- 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

Beim Glätten bietet sich eine Bearbeitung in Umfangsrichtung an. Riefen können die zyklische Bauteillebensdauer verkürzen.



denklichen 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 12.2.2.3-1).

Gratbildung: Grate können die Schwingfestigkeit deutlich herabsetzen (Kapitel 12.2.2.2). 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 12.2.2.1-7 und Bild 12.2.2.1-8). Leider „proviziert“ oft die **Bauteilform mit ihrer Zugänglichkeit eine Bearbeitungsrichtung quer zur Hauptbetriebsspannung**. Typisches Beispiel ist die Kantenverrundung an Schau-felblättern („D“) und die Glättung von Über-gangsradien an Scheiben („E“, Bild 12.2.2.2-8).

Überhitzung: Eine Gefügeveränderung bis hin zur Rissbildung, kann die Bauteilfestigkeit un-zulässig absenken. Die **Gefahr unbemerkter Überhitzungen** durch den Bearbeitungsvor-gang ist nicht zu unterschätzen (Bild 12.2.1.1-8.2). **Warnende Verfärbungen (Anlauffarben)** sind das einzige äußere Anzeichen für eine mögliche Schädigung (Bild 12.2.2.6-11) kön-nen im selben Bearbeitungsvorgang wieder entfernt werden. Damit gewinnt die fachkun-dige **Beobachtung des Prozesses durch den erfahrenen Werker** besondere Bedeutung (Bild 13-5).

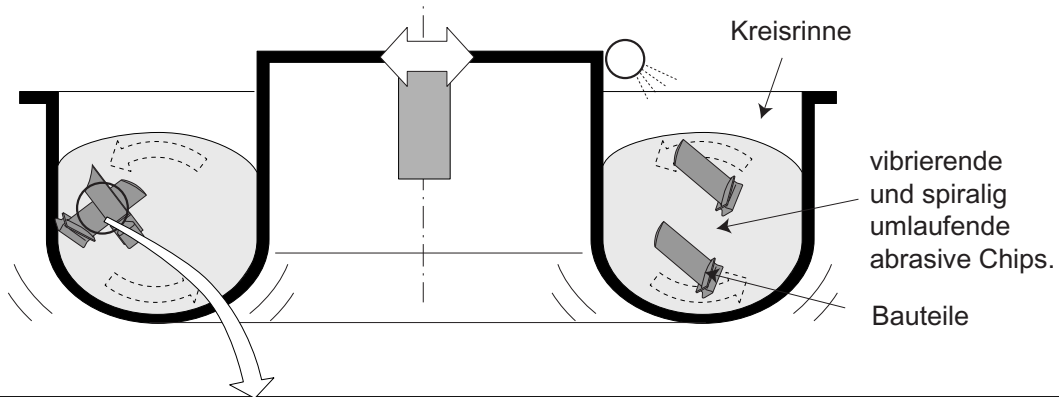
Eine weitere gefährliche Überhitzungsmöglich-keit ist durch das Auftreffen von Funken bei einem intensiven Glättungsprozess, z.B. am Schleifband („C“) gegeben (Bild 12.2.2.6-4).

Bild 12.2.1.1.1-7: Obwohl der Abtragungsvor-gang beim **Vibrationsschleifen** (Lit. 12.2.1.1-1 und Lit. 12.2.1.1-3, Skizze oben) äußerst scho-nend ist, kann es doch zur Beschädigung von Werkstücken kommen. Möglichkeiten sind **ver-stärkter örtlicher Abtrag** an exponierten Baut-eilzonen (Skizze unten rechts) und längeres ört-liches Einwirken einzelner Bearbeitungschips möglich werden. Intensiver dürften sich jedoch Beschädigungen während einer ungünstigen **Berührung der Bauteile** beim Bearbeitungs-prozess auswirken (mittlere Skizze). Problema-tisch kann auch fehlender Abtrag sein. Die ört-liche Bauteilform kann den Kontakt mit den (engl. „Chip“) verhindern (Skizze unten links). So besteht die Möglichkeit, dass unerwünsch-te Grate und Riefen nicht entfernt werden.

Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Schleifverfahren

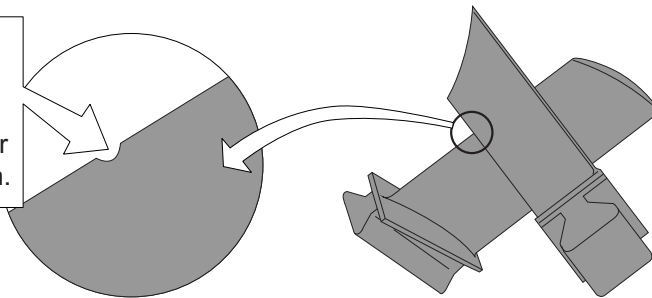
Probleme beim Vibrationsschleifen

Schematische Darstellung einer Anlage zum Vibrationsschleifen

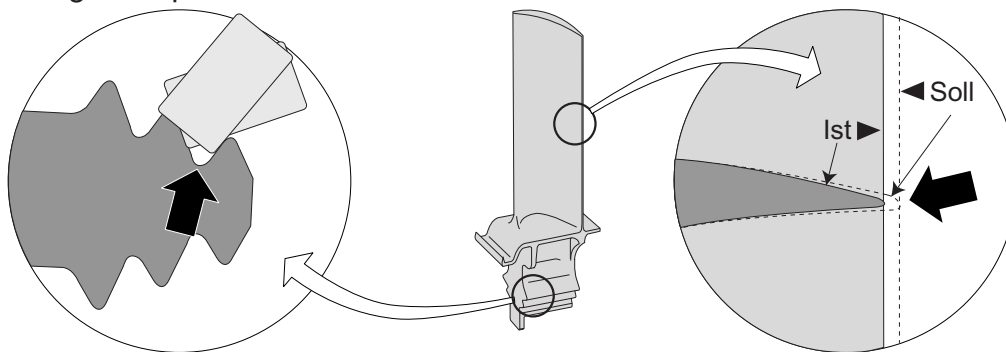


Vibrationsschleifen kann auch Beschädigungen erzeugen.

Kerbe durch aufeinanderhämmern empfindlicher Bauteilzonen.



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 Spannungsrisskorrosion!

Bild 12.2.1.1.1-7

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

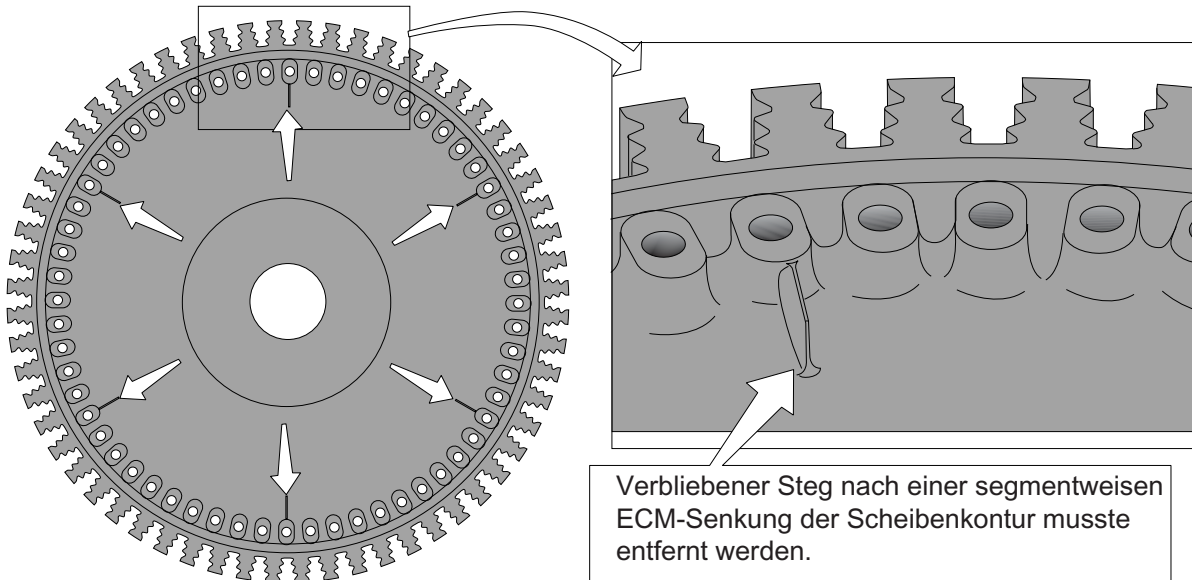


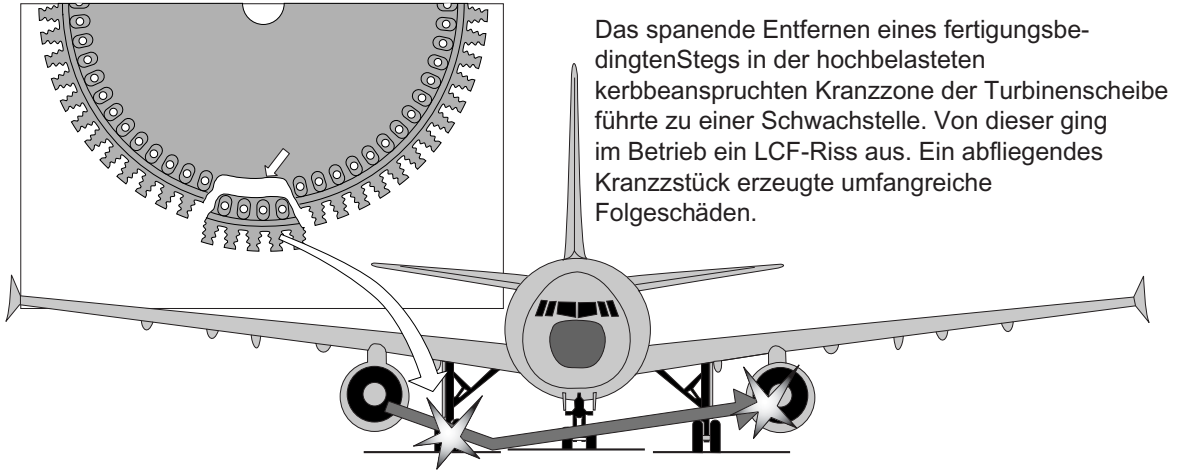
Bild 12.2.1.1.1-8.1

Bild 12.2.1.1.1-8.1 (Lit.12.2.1.1-9, -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 12.2.1.1-8.2). Dabei wurde die hochbeanspruchte Radiuskontur in einzelnen Fällen unbemerkt **überhitzt**. Ein leichter Abfall der LCF-Festigkeit genügte für gravierende Folgen (Bild 12.2.1.1-8.2).

Bild 12.2.1.1.1-8.2 (Lit.12.2.1.1-9, -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 12.2.1.1-8.1). Offenbar war die Scheibe dieser Zone geschädigt worden (Rahmen unten). Schädigungsmodi werden in Bild 12.2.1.1-2 und Bild 12.2.1.1-4 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: Schleifverfahren

Die manuelle mechanische Nacharbeit ist eine anspruchsvolle und verantwortungsvolle Aufgabe.



Potentielle Mängel bei örtlicher mechanischer Nacharbeit

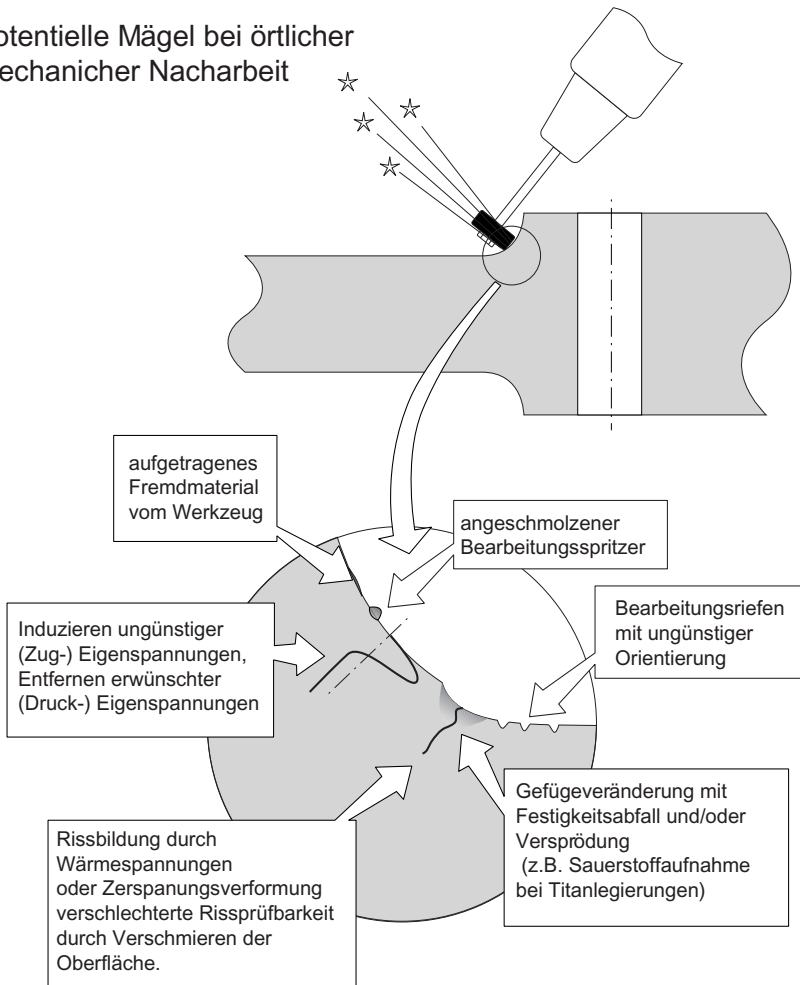


Bild 12.2.1.1.1-8.2

Literatur zu Kapitel 12.2.1.1.1

- 12.2.1.1.1-1** S.Grinko, „Thermo-mechanisches Schädigungsmodell für das (Zahnflanken-) profilschleifen“, Dissertation 03.04.2006, diglib.uni-magdeburg.de/Dissertationen/2006/Sergrinko.pdf, Seite 1-40.
- 12.2.1.1.1-2** P. Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“, Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 55-62.
- 12.2.1.1.1-3** Metals Handbook Ninth Edition, „Volume 11 Failure Analysis and Prevention“, ASM, 1986, ISBN 0-87170-007-7, Seite 472-474, 564-569-410.
- 12.2.1.1.1-4** „Schleifen“, Firmenveröffentlichung, www.metalform.de/Schleifen/CBN/cbn/html, Seite 53 - 57.
- 12.2.1.1.1-5** A.Könsgen, B.Kuttkat, „Schleifen von Großverzahnungen mit keramisch gebundenen Scheiben“, 21.2.2007, Zeitschrift „Maschinenmarkt“ (MM), <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/index.cfm?pid=5112&pk=58257&print=true&printtype=article>, Seite 1-3.
- 12.2.1.1.1-6** J.Grosch, „Schadenskunde im Maschinenbau“, expert Verlag, Band 308, 2. Auflage 1995, ISBN 3-8169-1202-8, Seite 27.
- 12.2.1.1.1-7** B.-R.Höhn, M.Kröning, „Ermittlung und Charakterisierung von Randzonen-Kennwerten und -Eigenschaften und deren Einfluss auf die Flankentragfähigkeit ein-satzgehärteter, geschliffener Zahnräder“, Forschungsarbeit A 200 S 24/10058/2003, www.avif.eu/index.php?id=1038no_cache=18tx, Seite 1-3.
- 12.2.1.1.1-8** M.Möser, „Rissbildung durch Wasserstoffeintrag bei der spanabhebenden Bearbeitung“, April 2008, www.martin-moeser.de/Veroeffentlichungen/Spanen_Wasserstoff.pdf, Seite 1-8.
- 12.2.1.1.1-10** E.Hellström, „Schleifsteuerung durch Körperschall“, Stand 2012, <http://evolution.skf.com/de/schleifsteuerung-mit-krperschall/>, Seite 1-5.
- 12.2.1.1.1-11** „Superfinish-Technologie“, Stand 2012, Firmenveröffentlichung 2006 Loeser GmbH, www.loeser.com, Seite 1 und 2.
- 12.2.1.1.1-12** A.Rossmann, „Unser Beitrag zur Qualitätssicherung“, 2000, ISBN 3-00-007241-1, www.turboconsult.de, Seite 93.
- 12.2.1.1.1-13** Metals Handbook Ninth Edition, „Volume 16 Machining“, ASM, 1989, ISBN 0-87170-007-7, Seite 30 und 31.