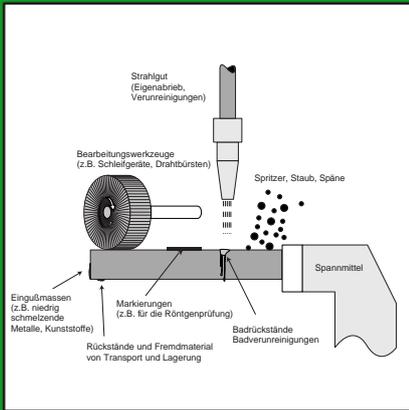
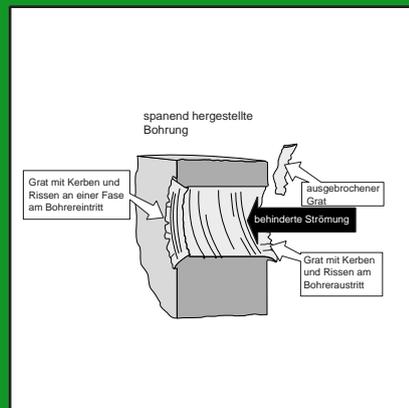
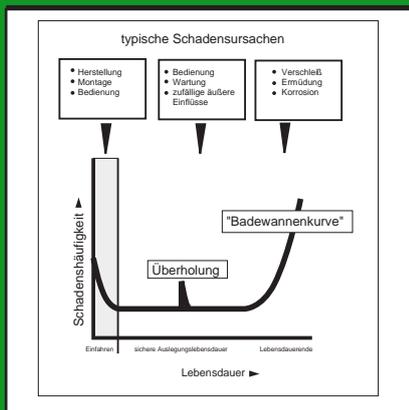


Unser Beitrag zur Qualitätssicherung



ein kleiner Ratgeber für Praktiker aus

- Einkauf
- Entwicklung
- Fertigung
- Konstruktion
- Montage
- Vertrieb



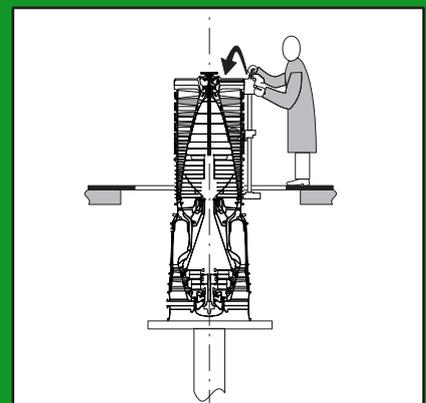
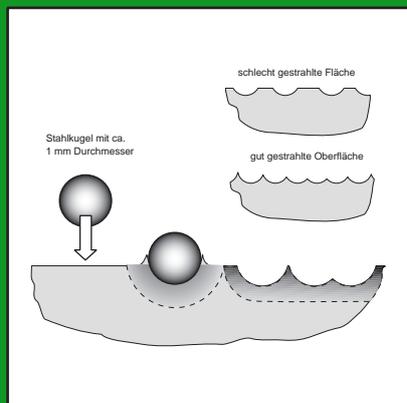
Axel Rossmann

Ein falsches Schmiermittel kann verheerende Folgen haben.

Vorsicht! Verwechslungsgefahr!

GRAFIT

MoS₂



Axel Rossmann

Axel Rossmann

Unser Beitrag zur Qualitätssicherung

Ein kleiner Ratgeber für Praktiker aus

- Einkauf
- Entwicklung
- Fertigung
- Konstruktion
- Montage
- Qualitätssicherung
- Vertrieb

Diese Broschüre entstand 2000 im Rahmen des RoMan-Projekts, einer Initiative der
US-Luftfahrtbehörde FAA.



Axel Rossmann

(Ausgabe 2.2)

Bei der Erstellung des Buches wurde mit großer Sorgfalt vorgegangen; trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag und Autor können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen. Für Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler sind Verlag und Autoren dankbar.

© 2000 by A.Rossmann, Turbo Consult

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung von Turbo Consult unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

ISBN 3-00-007241-1

Vorwort

Die Lebenserfahrung lehrt, dass der Mensch dann motiviert ist und Verantwortungsbewusstsein zeigt, wenn er den Sinn seines Tuns verstanden und eingesehen hat. Dies gilt auch und ganz besonders für qualitätsbewusstes Handeln. Warum sollen z.B. Transportkisten sauber sein, wenn erkennbare Schäden an den darin befindlichen Teilen nicht ins Auge fallen? Da kommt schnell bei einem Hinweis darauf der unterschwellige Verdacht der Schikane auf.

Dieser kleine Ratgeber soll Verständnis für die Gefahren ungenügenden Qualitätsbewusstseins wecken und vermitteln. Er ist aus langjähriger Erfahrung in der Analyse von Schäden entstanden. Einige Kapitel entsprechen weitgehend meinen Beiträgen in der Werkszeitschrift „MTU-Aktuell“. Die vorliegende Broschüre entstand im Rahmen des RoMan-Projekts, das auf eine Initiative der US Luftfahrtbehörde FAA zurückgeht.

Ich habe versucht typische Probleme aus dem anspruchsvollen Maschinenbau, insbesondere der Flugtriebwerkstechnik, den interessierten Lesern für ein qualitätsbewusstes Verhalten nahe zu bringen.

Um den Leser anzusprechen und Interesse zu wecken, wurden bevorzugt aktuelle Probleme aufgegriffen. Einer ermüdenden, technisch trockenen Darstellung soll durch einen lockeren Stil, insbesondere in den Überschriften, entgegengewirkt werden. Trotzdem habe ich mich bemüht unzulässige Vereinfachungen in der Beschreibung der durchaus komplexen technischen Zusammenhänge zu vermeiden.

Das Bildmaterial wurde nachträglich speziell für dieses Büchlein von mir entworfen und gezeichnet. Es lehnt sich an die vielen, uns geläufigen, modernen technischen Darstellungsweisen, wie sie z.B. für Überholhandbücher oder technische Anweisungen verwendet werden, an. Die Bilder sollen in erster Linie zur Beschäftigung mit dem Thema anregen und den Bezug zur praktischen Anwendung intensivieren.

Ich möchte hier meiner Frau, Dr. Daniela Rossmann danken, dass sie auf gemeinsame Freizeit verzichtet hat, um mir die Gelegenheit zu geben dieses Büchlein zu schreiben.

Axel Rossmann

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung.....	11
1. Das Mittelalter ist vorbei!..... (Richtiges Verhalten der Vorgesetzten ist eine Voraussetzung für gute Qualität)	13-14
2. Wenn Maschinen aus dem Ruder laufen..... (Probleme durch nicht stabile Fertigungsprozesse)	15-16
3. Ein kleines Loch ist groß genug, um hineinzufallen..... (Der Fertigungsprozess als wichtiger Beitrag zur Qualitätssicherung)	17-19
4. Auch Kontrolle hat ihre Grenzen..... (Grenzen und Verbesserung der Fehlererkennung)	20-21
5. Auf einen Schlag..... (Einfluss der Kennzeichnung auf die Bauteilfestigkeit)	22-23
6. Wenn der Funke überspringt und andere Kurzschlüsse..... (Schädigungen durch Funkeneinwirkung)	24-25
7. Das Michelangelo-Problem..... (Bauteilschädigung durch Werkzeugbruch)	26-27
8. In der Badewanne..... (Schadenshäufigkeit an Neuteilen)	28-29
9. Produktionsprobleme in den Griff bekommen..... (Ausbildung und Qualität)	30-31
10. Der Buchhalter und der Steuerprüfer- unsere Vorbilder..... (Dokumentation im Fertigungsprozess)	32-33
11. Es ist ja nur ein Kratzer!..... (Der Einfluss von Kerben auf die Bauteilfestigkeit)	34-35
12. Knollenblätterpilz oder Champignon?..... (Der Umgang mit Hilfsstoffen)	36-37

	Seite
13. Reingefallen (Fremdkörperschäden durch den Montagevorgang)	38-39
14. Auf schmalen Grat..... (Die Gefährlichkeit unzulässiger Gratbildung)	40-41
15. Was haben Waterloo und Sicherheitsgurte gemeinsam?..... (Auswirkungen nicht abgesicherter Änderungen)	42-43
16. Wenn der Vogel schlägt... (Betriebsbelastungen und Bauteileigenschaften)	44-45
17. Die Probleme der Mitbewerber können unsere Stärke sein..... (Auswirkung von niedrig schmelzenden Metallen auf Heißeile)	46-47
18. Housekeeping- die Hausfrau am Arbeitsplatz? (Bauteilschädigungen durch Fremdpartikel)	48-49
19. Wenn es Schaufeln zu warm wird..... (Probleme bei der Herstellung gekühlter Heißeile und deren Auswirkungen im Betrieb)	50-51
20. Was geht uns eine Zugkatastrophe an?..... (Einsatz geeigneter Prüfverfahren)	52-53
21. Fehler beim Kugelstrahlen - Triebwerke wurden im Flug abgeschaltet..... (Einfluss des Kugelstrahlens auf die Bauteilfestigkeit)	54-55
22. Es wird spannend (Entstehung und Auswirkung von Eigenspannungen im Fertigungsprozess)	56-57
23. "Babylon ist überall"..... (Richtige Interpretation und Umsetzung von Vorschriften, Handbuchangaben und Konstruktionsunterlagen).	58-59
24. Wer kauft die Designeruhr von einem Unbekannten an der Tankstelle?..... (Verhinderung der Verwendung nicht zugelassener Ersatzteile)	60-61

	Seite
25. Wer schreibt eine Bibel ohne Fehler?..... (Ausfallsicherheit im Triebwerksbau)	62-63
26. Kommunikation vermeidet Fehler..... (Der Einfluss moderner Arbeitsmethoden auf die Produktqualität)	64-65
27. „Das Maß aller Dinge“..... (Die Globalisierung erfordert eine höhere Aufmerksamkeit für die Maßsysteme)	66-67
28. „Sand im Getriebe“..... (Vermeidung von Fremdkörpern im Ölkreislauf)	68-69
29. Ein Weltraumteleskop sollte uns zu denken geben..... (Risiken zeit- und kostenminimierter Entwicklungsprojekte)	70-71
30. „Verpackungskünstler“..... (Die richtige Verpackung empfindlicher High-Tech-Teile)	72-73
31. Der Facharbeiter als Qualitätssicherer..... (Qualitätssicherung durch die fachkundige Beobachtung des Fertigungsprozesses)	74-75
32. Die Seuche..... (Die Beeinflussung der Fertigungs- bzw. Prüfqualität durch Hilfsstoffe und „Fremdmedien“)	76-77
33. Im Schweiß des Angesichts..... (Wasserstoffinduzierte Rissbildung beim Schweißen unter der Einwirkung von Feuchtigkeit)	78-79
34. „Wer den Pfennig nicht ehrt...“..... (Der Einfluss der Qualität von Massen-Zukaufteilen auf die Zuverlässigkeit komplexer Gesamtsysteme)	80-81
35. Klebeband auf staubiger Fläche- ein hoffnungsloser Fall..... (Die Auswirkung unzureichender Verfahrenserprobung am Beispiel des thermischen Spritzens)	82-83
36. Fingerabdrücke schätzt nur die Polizei..... (Die Schädigung von Bauteilen durch Handschweiß)	84-85

	Seite
37. „Ätzend“..... (Die Gefahr einer Bauteilschädigung durch Ätzverfahren)	86-87
38. Wenn „Nacharbeit“ notwendig wird..... (Beseitigung von Fertigungsschäden durch Nacharbeit)	88-89
39. Eine „strahlende“ Zukunft..... (Mögliche Probleme bei unterschiedlichen Strahlverfahren)	90-91
40. Auf Werkzeugmaschinen sollte man nicht pfeifen (Schädigung von Bauteilen durch Schwingungen bei der mechanischen Bearbeitung).....	92-93
41. Gut aufgelegt, wenn nicht der Wurm drin sein soll. (Flanschbeschädigungen vermeiden!).....	94-95
42. Eine „Bananenschale der Technik“..... (Hochtemperatur-Schmiermittel als gefährliche Verunreinigungen).	96-97
43. Vor Gebrauch Schütteln!..... (Entmischte Stoffe können den Fertigungsprozess empfindlich stören).	98-99
44. Nacharbeit ist eine verantwortungsvolle Aufgabe..... (Ungeeignete Nacharbeit kann das Betriebsverhalten eines Bauteils unzulässig verändern)	100-101
45. „Erfahrung und Aufmerksamkeit sind auch ein Qualitäts- merkmal des Werkers.“..... (Ungewöhnliche Veränderungen an Werkzeugen sind nicht selten Hinweise auf Abweichungen bzw. Instabilitäten des Fertigungsprozesses).	102-103
46. „Und bist Du nicht willig so brauch ich Gewalt?“..... (Beschädigung von Bauteilen beim Spannen in der Fertigung).	104-105
47. „Nochmal hingebogen...“..... (Nie deformierte Bauteile eigenhändig richten).	106-107
48. „Bitte nicht hochstapeln!“..... (Transport und Versand von Bauteilen ist eine anspruchsvolle Aufgabe).	108-109

	Seite
49. „Spritzer auf weißer Weste“..... (Funken und Metallspritzer können beim Auftreffen eine Oberfläche gefährlich schädigen).	110-111
50. „Wenn Ihr’s nicht fühlt, Ihr werdet’s nicht erjagen...“..... (Mit Abtasten lassen sich Anzeichen für gefährliche Schädigungen finden).	112-113
51. „Auge sei wachsam!“..... (Die visuelle Prüfung kann uns zur die Beeinflussung einer Oberfläche wichtige Hinweise geben).	114-115
52. „Reinigen ist nicht alles, aber ohne Reinigen ist alles nichts.“..... (Reinigungsbäder sind nicht so harmlos wie sie erscheinen mögen).	116-117
53. „Alles abgedeckt?“..... (Abdecken erscheint „harmlos“, ist jedoch eine anspruchsvolle Aufgabe mit erheblichem Schadenspotential).	118-119
54. „Uneinsichtig“..... (Schlecht visuell kontrollierbare Bauteilzonen erhöhen das Risiko).	120-121
55. „Vertrauen ist gut, Kontrolle ist besser“..... (Wenn die Qualitätssicherung über eine Prozessüberwachung erfolgen muss ist der Werker besonders gefordert).	122-123
56. „Wetterfühlilig“..... (Klebstoffe und Beschichtungen können sehr empfindlich auf ihre Umgebung reagieren).	124-125
57. „Man muss sich nur zu helfen wissen....?“..... (In Fertigung und Montage nur zugelassene Vorrichtungen und Hilfsmittel verwenden).	126-127
58. „Ein Einzelfall?“..... (Von einem Einzelfall kann nur in den aller wenigsten Fällen ausgegangen werden).	128-129
59. „Unterm Erwartungshorizont“..... (Oft sind es gerade große gut erkennbare Fehlstillen die wir auf scheinbar unerklärliche Weise nicht registrieren).	130-131

60. „Wo gehobelt wird da fallen Späne“	132-133
(Späne können die Bauteilfestigkeit gefährlich absenken).	
61. „Verschleppung, ein heimtückisches Problem der Fertigung“	134-135
(Verunreinigungen können im Fertigungsprozess verschleppt werden und so das Problem erheblich vergrößern).	
62. „Unerwünschte Tatroo's.“	136-137
(Ungeeignete Farben und Stifte können Zusatzkosten erfordern und im Extremfall das Betriebsverhalten des Bauteils beeinträchtigen).	
63. „Umbau in der Wohnung, eine Horrorvorstellung der Hausfrau.“	138-139
(Bauarbeiten sind in einer Fertigung häufig notwendig. Sie können die Werkstücke schädigen).	
Sachregister	143-147

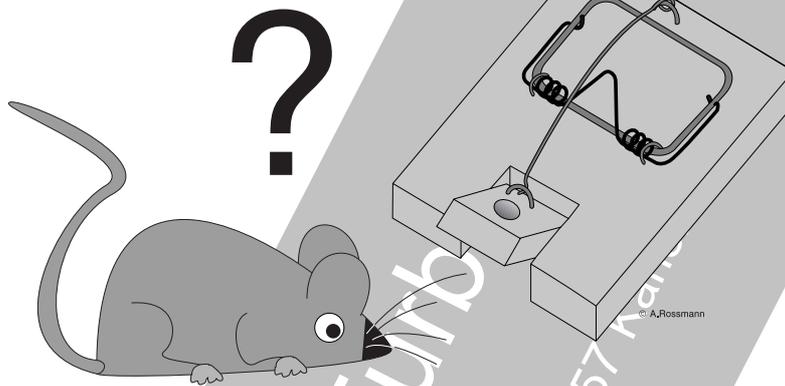
Axel Rossmann, Turboconsult
© 2009 by Axel Rossmann, turboconsult, 85757 Karkkela

Axel Rossmann, Turboconsult

© 2009 by Axel Rossmann, turboconsult, 85757 Karlsfeld

Einleitung

! Was man nicht ausreichend durchschaut, kann durch scheinbar nebensächliche Aktionen zu gravierenden Problemen führen.



Die Mausefalle soll daran erinnern, dass man trotz umfangreichen Wissens Zusammenhänge falsch einschätzen kann. Das bedeutet, dass es gefährlich ist, einsame Entscheidungen über die Zulässigkeit von Abweichungen und eventuellen Abhilfen zu treffen.

Richtig ist es deshalb, die Fachabteilungen rechtzeitig hinzuzuziehen. Dies erfordert jedoch ein Vertrauensverhältnis bei dem nicht der Überbringer schlechter Nachrichten auf mittelalterliche Weise bestraft wird.

Ähnliches gilt für die Betriebstauglichkeit unserer Bauteile. Diese werden durch eine Vielzahl scheinbarer Nebensächlichkeiten entscheidend beeinflusst. Solche „Nebensächlichkeiten“ **richtig einzuschätzen** und durch ein richtiges Verhalten zu beachten, ist ein entscheidender Schritt zur Qualitätssicherung. Eine Voraussetzung für ein qualitätsbewusstes Verhalten ist also die Kenntnis wichtiger Zusammenhänge und Einflüsse, die auf die Bauteile einwirken können. Auch die Kenntnis der Abläufe und der entscheidungsbefugten Fachleute ist für richtige Abhilfen und Bewertungen unverzichtbar.

Auf unsere Produkte können sehr unterschiedliche Einflüsse wirken. Diese kommen aus

- Fertigung
- Konstruktion
- Logistik
- Reparatur
- Wartung
- Erprobung und Versuch

In den folgenden Kapiteln werden diese Einflüsse an Hand von typischen Beispielen aus der Praxis dargestellt und erklärt.

Axel Rossmann, Turboconsult

© 2009 by Axel Rossmann, turboconsult, 85757 Karlsfeld

1. Das Mittelalter ist vorbei!

(Richtiges Verhalten der Vorgesetzten ist eine Voraussetzung für gute Qualität)

Es war einmal, vor vielen Jahren, da gab es einen mächtigen Manager der jeden Fehler und jeden Ausschuss in der Fertigung mit großer Härte bestrafte und die vermeintlich Schuldigen auf mittelalterliche Weise an den Pranger stellte. Trotzdem wurde die Qualität nicht besser und die Ausschusskosten blieben hoch.

Dieser Manager wurde eines Tages durch einen neuen ersetzt, der glaubhaft vermittelte, dass es ihm in erster Linie um die Lösung des technischen Problems und um geeignete Abhilfen, ging und nicht um exemplarische Bestrafung der Beteiligten. Auf die verwunderte Frage, warum der scheinbar Schuldige nicht bestraft worden war, sagte er nur: „Wer es war, der weiß es selbst und wird den Fehler nicht wieder machen, sonst bekommt er echte Probleme.“

Zu unserem großen Erstaunen führte dieses Verhalten dazu, dass sich die Qualität deutlich verbesserte und die Ausschusskosten drastisch zurückgingen.

Wie ich das Problem sehe:

Psychologen wissen: „positive Motivation“ ist erfolgreicher als „negative Motivation“.

„**Negative Motivation**“ bedeutet, ein Handeln unter Strafandrohung zu erzwingen, wobei Angst und Frustration eine wichtige Rolle spielen. Eine solche repressive Vorgehensweise verhindert die unverzichtbare kreative Mitarbeit des Betroffenen zur Lösung des Problems. Unter „**positiver Motivation**“ versteht man, Menschen durch Lob und Information zu einem Handeln anzuregen, dessen Sinn sie einsehen und das sie aktiv unterstützen. Dies sollte die moderne Vorgehensweise eines Vorgesetzten sein um Probleme zu lösen und zu vermeiden. Sie setzt auf Teamarbeit.

Qualität ist also ein Produkt, das nicht zuletzt auf Teamgeist und damit auf Vertrauen beruht. Um Schäden und Ausschuss zu vermeiden, sollte ähnlich wie bei der Heilung von Krankheiten vorgegangen werden: Je früher man das Problem erkennt und die richtige Diagnose stellt, um so größer sind die Genesungschancen und um so geringer ist der Aufwand für die Therapie bzw. die Abhilfen. Die zweifelsfrei unangenehme Situation des frühen „Arztbesuchs“ ist also besonders wichtig. Wenn es sich dann herausstellen sollte, dass doch kein Problem vorliegt, können wir uns beglückwünschen. Vorwürfe wegen zu großer Sensibilität wären vollkommen fehl am Platz.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Die Vorgesetzten sind sich bewusst, dass ein objektives **Verhalten und Vertrauen Voraussetzungen für die rechtzeitige Meldung von Qualitätsproblemen** sind. Er erklärt z.B. den Mitarbeitern die Wichtigkeit ihrer Arbeit für die Qualität und das Betriebsverhalten der Bauteile.
- Die technische Lösung der Probleme und die Abhilfen stehen bei unserem Handeln immer im Vordergrund. Die Beteiligung der Mitarbeiter an der Abhilfe kann eine wichtige Motivation sein.
- Wer **Fehler oder Abweichungen am Fertigungsprozess oder an Bauteilen meldet**, sollte dadurch keine Nachteile haben. Der Vorgesetzte motiviert positiv.

- Im Zweifelsfall lieber einmal mehr den Finger heben.
- Wir lernen aus unseren Fehlern und Problemen. Abhilfen und Maßnahmen sind in den geeigneten Vorschriften und Dokumenten zu berücksichtigen.

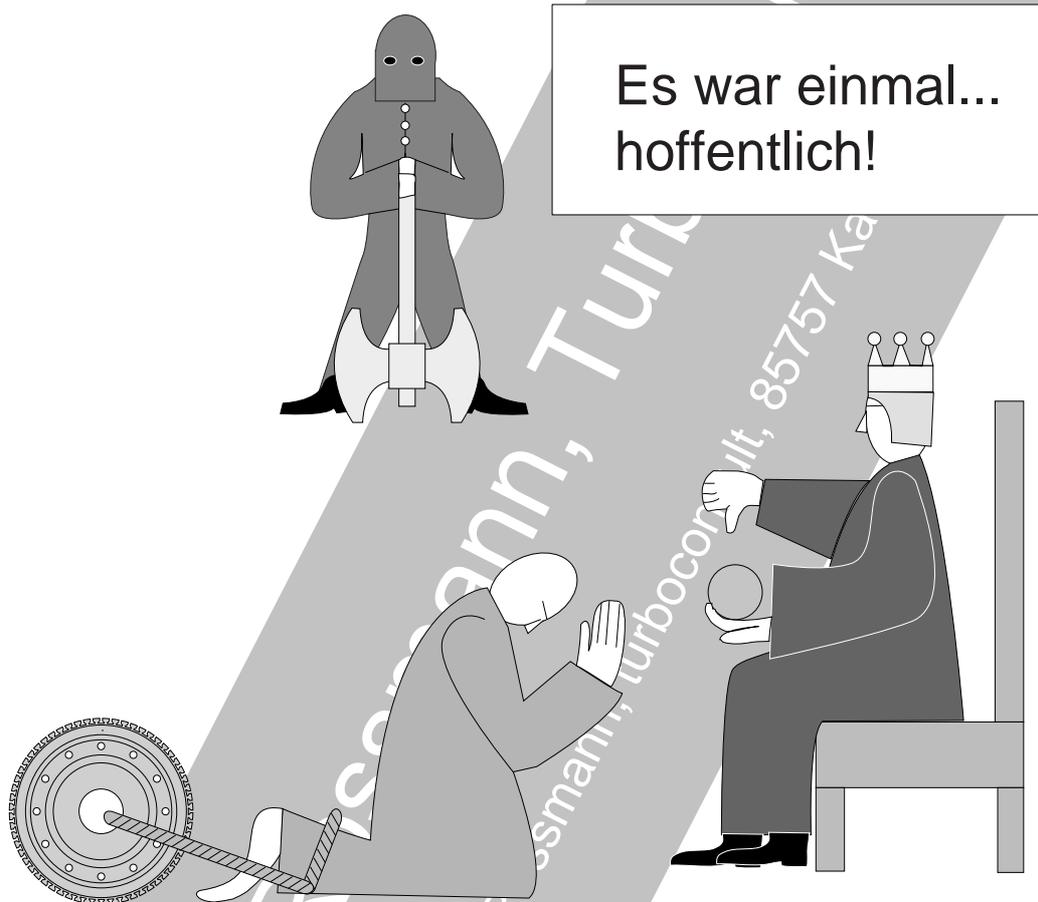


Bild 1

Qualität braucht Vertrauen. *Der Überbringer einer schlechten Nachricht sollte als (selbst-)kritischer Mitarbeiter unsere Anerkennung erfahren. Rechtzeitig erkannte Fehler können große Schäden verhindern und tragen zum Know-How bei. Wer aus Fehlern lernt, kann sogar durch diese Erfahrung zum besonders wertvollen Mitarbeiter werden.*

2. Wenn Maschinen aus dem Ruder laufen. (Probleme durch nicht stabile Fertigungsprozesse)

Im „The Wall Street Journal“ war zu lesen, dass ein Triebwerkshersteller 16 große Airlines wie folgt anweist: „Mehrere tausend ausgelieferte Turbinenschaufeln wurden ungeeignet behandelt, die betroffenen Triebwerke müssen deshalb sofort ausgebaut werden.“

Die Turbinenschaufeln wiesen Risse durch Schwingermüdung auf. Sie waren von einer falsch eingestellten Ultraschall-Reinigungsmaschine erzeugt worden.

Wie ich das Problem sehe:

Ein **scheinbar harmloser Fertigungsschritt** wurde unbemerkt an wichtigen Triebwerksteilen zu aggressiv durchgeführt.

Obwohl offenbar noch keine gefährlichen Schäden in den Triebwerken auftraten, schätzte der Hersteller die potentielle Gefährdung doch so ein, dass er Prestigeverlust und Kosten akzeptierte um die hohen Sicherheitsanforderungen zu gewährleisten. Der Ausbau eines Triebwerks und die Zeit, in der das Flugzeug nicht zur Verfügung steht sind sehr kostspielig. Diese enormen Kosten einer solchen Aktion können nicht nur kleinere Firmen in ihrer Existenz bedrohen.

Vorab sei betont: Keinem Bauteil sieht man unbedingt von vorne herein an, ob es ein **„wichtiges“ Bauteil** ist. Deshalb sind alle Bauteile wichtig und müssen entsprechend sorgfältig behandelt werden.

Jeder Fertigungsschritt bedarf vor der Einführung einer Erprobung. Das heißt, es müssen die zugehörigen Maschineneinstellungen und Vorrichtungen entwickelt und erprobt werden. Dabei werden Probeteile hergestellt und genauestens geprüft, ob das erwünschte Ergebnis erreicht wird. Dann hält man diese Daten in Vorschriften fest, auf die sich die Anweisungen in den Zeichnungen und in der Fertigung beziehen. Dieser erprobte Prozess muss „stabil gehalten“ werden. Das heißt, er muss zu jeder Zeit reproduzierbar die Qualität der zugelassenen Probeteile bei Serienteilen gewährleisten.

Es gibt aber auch Veränderungen, wie längere Unterbrechungen oder neues Bedienungspersonal, die von den technischen Vorschriften nicht abgedeckt werden. Gerade hier sollten wir sensibel sein. Ich rate in einem solchen Fall aus Erfahrung dringend dazu, nicht gleich ein großes **Teilelos** durchlaufen zu lassen, um bei einem nachträglichen Kontrollschritt festzustellen, dass viele Teile Schäden aufweisen. Besser ist es, zuerst einige wenige Teile zu behandeln und diese sofort durch die Kontrolle zu schleusen.

Es genügt jedoch nicht, dass unsere Aufmerksamkeit nur bei der Serieneinführung dem Prozess gelten muss. Wie das oben genannte Beispiel zeigt, können sich die **Einstellungen der Maschine** oder angewandte Betriebsstoffe unbemerkt ändern. Das muss rechtzeitig erkannt werden. Falls bereits Bauteile davon betroffen sein könnten - allein der Verdacht reicht aus -, sind diese von den Fachabteilungen genauestens auf unzulässige Veränderungen zu prüfen. Während dieser, hoffentlich nur kurzen, Verzögerung sollten möglichst keine weiteren Bauteile behandelt werden, auch wenn man glaubt, geeignete Maßnahmen ergriffen zu haben.

Man erkennt unschwer, wie wichtig in diesen Abläufen die Werkerselbstkontrolle ist. Sie ist ein

entscheidender Faktor für die Vermeidung unliebsamer Überraschungen und die Gewährleistung der hohen Qualität unserer Bauteile, die sich in den Triebwerken bewährt. Es kommt also auf den einzelnen vor Ort an.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Einem Bauteil sieht man nicht an, ob es „wichtig“, also sicherheitsrelevant und/oder „teuer“ ist oder nicht. Gehen Sie immer davon aus, dass es wichtig ist!
- **Scheinbar nebensächliche Änderung der Fertigungsprozesse** und des Umfelds erfordern eine intensive Absicherung, möglichst mit Probeteilen.
- Auch kleine Veränderungen gegenüber dem gewohnten Bild eines Bauteils sind ernst zu nehmen. Benachrichtigen Sie die zuständigen Fachabteilungen! Zögern Sie mit Ihrer Meldung nicht, auch wenn es sich wahrscheinlich um kein Problem handelt! Dies wäre nach der Überprüfung das beste Ergebnis.

Man sieht den Teilen nicht unbedingt an, wie wichtig sie sind. Gehen wir davon aus, dass alle wichtig sind und unserer ganzen Aufmerksamkeit bedürfen.

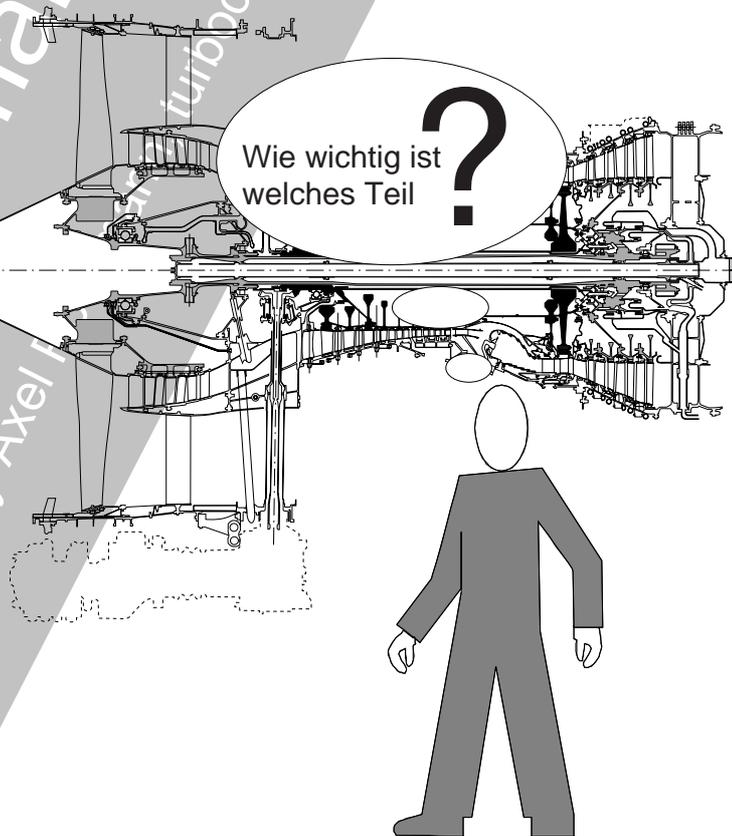


Bild 2

Jedes Teil in einem Triebwerk ist funktionsnotwendig und damit wichtig. Sonst würde man es aus Gewichtsgründen weglassen. Von besonderer Sicherheitsrelevanz sind sogenannte „Klasse A“-Bauteile. Hierzu gehören z.B. Rotorkomponenten. Aber auch „einfache“ Teile wie Schrauben können bei Versagen große Folgeschäden auslösen, wenn sie z.B. in das laufende Triebwerk fallen oder die Verbindung einer Kraftstoffleitung undicht wird.

3. Ein kleines Loch ist groß genug, um hineinzufallen. (Der Fertigungsprozess als wichtiger Beitrag zur Qualitätssicherung)

Bereits vor einiger Zeit ist Folgendes passiert: Beim Anrollen während des Starts trat ein Triebwerksschaden ein. Triebwerksteile aus dem vorderen Verdichter - dem Fan - durchschlugen den Flugzeugrumpf. Zwei Passagiere wurden getötet, zwei andere schwer verletzt. Das Flugzeug stoppte auf der Startbahn.

Die anschließenden Untersuchungen zeigten, dass in einer schlecht gefertigten Befestigungsbohrung der Fan-Scheibe ein Riss entstanden war, der zum Bersten der Scheibe führte.

Der Report beschreibt den Fehler in der Bohrung so: „Während des Bohrens trat eine Art **Werkzeugbruch** oder Versagen des Bohrers in Verbindung mit einem örtlichen **Kühlmittelmangel** und **Spänestau** auf. Dadurch entstand eine Mikrostruktur im Werkstoff, die den späteren Riss im Betrieb auslöste.“

Die vorschriftsmäßig angewandten Prüfverfahren wären ausreichend gewesen. Der Bewertungsmaßstab des Befundes gab jedoch keine Auskunft über die Gefährlichkeit.

Nach der alten Weisheit „wenn etwas schief geht, geht auch gleich alles schief“, (**Murphy's Gesetz** oder auch Gesetz der größten Mehrheit) wurde später bei der Überholung der offenbar bereits entstandene Riss mit der **Eindringprüfung** nicht gefunden.

Wie ich das Problem sehe:

Dieser Fall hat eine Vielzahl äußerst wichtiger Perspektiven, die in einem kurzen Beitrag nicht alle befriedigend dargestellt werden können. Deshalb möchte ich hier den ersten Teil der Geschichte beleuchten - die Einflüsse der zerspanenden Fertigungsverfahren auf das Betriebsverhalten der Bauteile. In der folgenden Ausgabe möchte ich dann das hoch interessante Thema der **Fehler-Auffindbarkeit** durch Prüfverfahren aufgreifen.

Bauteile werden bei uns immer noch in erster Linie durch **zerspanende Verfahren** hergestellt. Typisch dafür sind die Turbinen- und Verdichterscheiben. Dabei handelt es sich nicht um ein einzelnes Verfahren, sondern um durchaus verschiedene, wie Drehen, Fräsen, Räumen, Bohren und Schleifen. Diese Verfahren können sogar gegenüber der unbearbeiteten Fläche einen festigkeitssteigernden Effekt haben. Die mit diesen Verfahren erzeugten Bauteiloberflächen unterliegen hohen zyklischen Betriebsspannungen und müssen deshalb beste Festigkeit aufweisen. Diese Festigkeit wird entscheidend von der Bearbeitungsqualität bestimmt.

Jede Änderung der Maschineneinstellung, der Werkzeuge oder Betriebsstoffe außerhalb der Vorschriften birgt die Gefahr, dass die vom Konstrukteur zu Grunde gelegte Festigkeit nicht mehr erreicht wird. Hier hat der verständliche Wunsch nach einer **Verkürzung der Fertigungszeiten** seine Grenzen. Eine besondere Verantwortung liegt bei unseren Werkern. Es ist nämlich äußerst schwierig, Fehler zu erkennen, über die nochmals ein Zerspanungsvorgang gelaufen ist. Wenn Sie

also zum Beispiel beobachten, dass eine Zerspanungsoberfläche bedenkliche Anzeichen, wie **Anlauffarben** oder starke **Gratbildung** aufweist, benachrichtigen Sie bitte die zuständigen Stellen. Falsch wäre es, die Fehlstelle ohne diese Beratung beim folgenden Zerspanungsprozess zu entfernen. Es ist durchaus möglich, dass lediglich die **Oberfläche gut aussieht**. Das darunter liegende Material kann aber unzulässig geschädigt sein. Dann hat wohl auch die beste zerstörungsfreie Prüfung wenig Chancen.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Die Funktion der Bauteile hängt entscheidend von der gleichbleibenden Qualität der Zerspanungsprozesse ab. Jede eigenmächtige, nicht durch Vorschriften abgesicherte Veränderung ist deshalb unzulässig.
- Wenn Sie während des **Zerspanungsprozesses irgendwelche Abweichungen** von dem üblichen Verhalten (zum Beispiel bei der Spanbildung, dem Werkzeugverschleiß oder den Anlauffarben) beobachten, benachrichtigen Sie bitte die zuständigen Stellen. Ein Weiterarbeiten oder Überarbeiten der Besonderheiten mindert die Chance, die Ursache zu ermitteln und zu bewerten.
- **Bohrungen** bilden in einem Bauteil sogenannte konstruktive Kerben, die das Leben des Bauteils besonders beeinflussen. Deshalb sind alle Auffälligkeiten in Bohrungen besonders sensibel zu behandeln. Weil man in Bohrungen schlecht hineinsehen kann, sind Beobachtungen, die Sie während des Bohrprozesses machen, besonders wichtig.

Axel Rossmann, Turbocoinsult
© 2009 by Axel Rossmann, turbocoinsult, 057574411

Bohrungen sind häufig besonders hoch belastet, beste Qualität muss hier selbstverständlich sein.

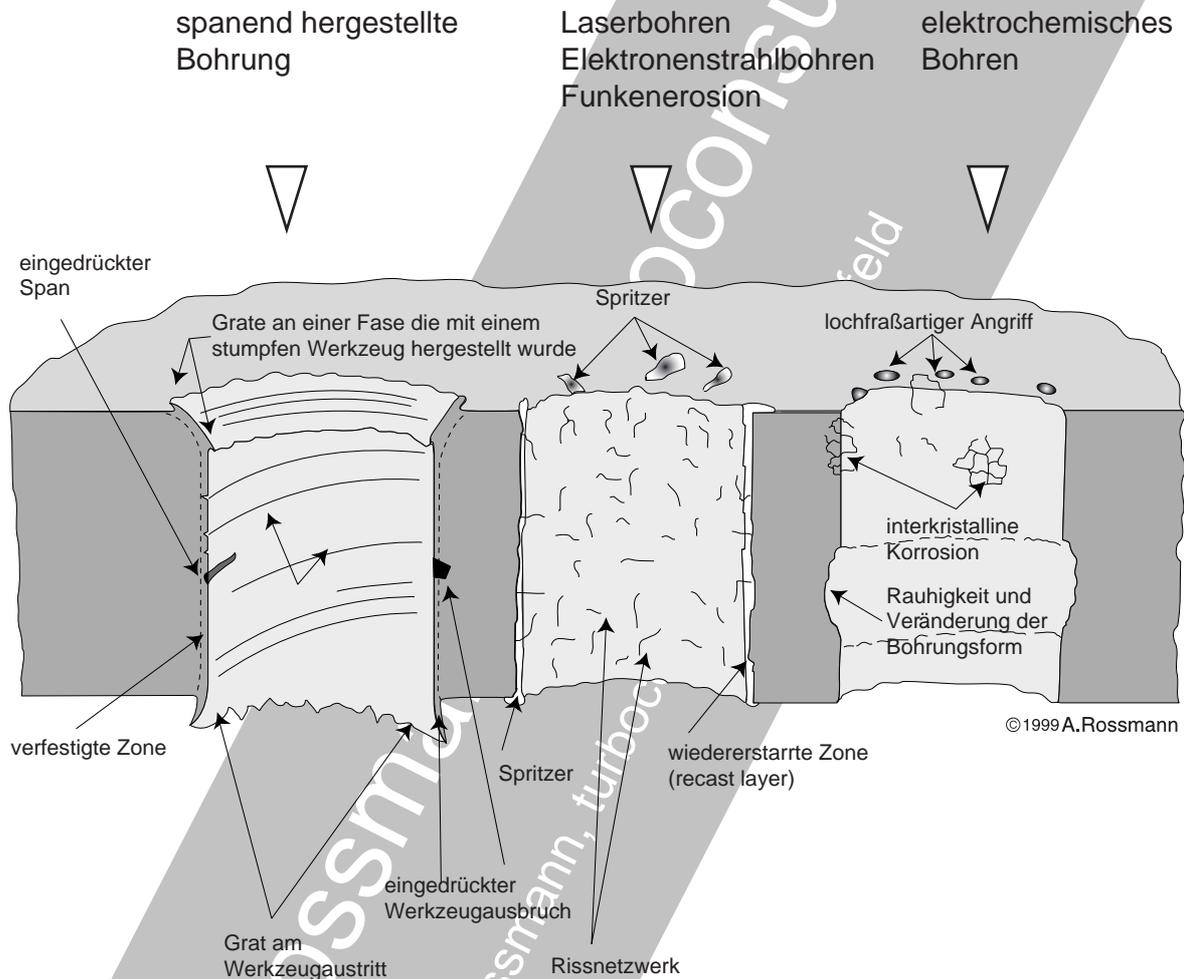


Bild 3

Bei der Herstellung von **Bohrungen** durch unterschiedliche Techniken kann die Bohrung verfahrenstypisch beeinflusst werden. Dies gilt natürlich auch für die spanende Bearbeitung (linke Skizze). Es können zum Beispiel unsichtbare innere Spannungen oder **Gefügeveränderungen** entstehen, aber auch **Riefen** und **eingedrücktes Material** von **Spänen** oder einem **Werkzeugbruch**. Wenn mit **stumpfen Werkzeug** gearbeitet wird oder die **Schnittdaten** unzulässig verändert wurden, besteht die Gefahr, dass der Werkstoff **überhitzt** und **verschmiert** wird. Dies kann die **Festigkeit** des Bauteils in der Bohrung gefährlich herabsetzen.

4. Auch Kontrolle hat ihre Grenzen. (Grenzen und Verbesserung der Fehlererkennung)

Über eine geplatze Fan-Scheibe wurde bereits früher berichtet. Die Untersuchungen zeigten, dass wichtige Glieder in der Ablaufkette des Schadens darin bestanden, dass durch die **Prüfverfahren am Neuteil und bei der Überholung** der Fehler nicht erkannt wurde.

Die vorschriftsmäßig angewandten Prüfverfahren wären ausreichend gewesen. Der **Bewertungsmaßstab** des Befundes gab jedoch keine Auskunft über die Gefährlichkeit.

Wie ich das Problem sehe:

Unter Fachleuten hat es sich inzwischen herumgesprochen: Es gibt keine hundertprozentige Sicherheit. Das gilt auch für die Prüfverfahren selbst. So ist es leicht verständlich, dass die **Oberflächenbeschaffenheit** das Ergebnis der zerstörungsfreien Prüfung negativ beeinflussen kann. Porosität durch plastische Verformung, vom Schleifen oder Strahlen zugeschmierte Flächen oder große Rauigkeit grob bearbeiteter Flächen sind typische Beispiele. Auch das beste Verfahren steht und fällt mit dem Können und der Erfahrung der Prüfer.

Natürlich wird ein sehr kleiner Fehler schwerer gefunden als ein großer. Jedes Verfahren hat hier seine Grenzen. Wenn man sich diesen nähert, steigt die Unsicherheit. Deshalb sind die Verfahren genau auf die zu findende Fehlerart und Fehlergröße abgestimmt: Je höher das Bauteil belastet ist, um so kleiner müssen die noch zulässigen Fehler sein. Es ist also von großer Wichtigkeit, dass auch die Prüfverfahren stabile Prozesse sind, die sich genau an Spezifikationen und Vorschriften halten.

Heute ist bekannt, mit welcher Wahrscheinlichkeit die verschiedenen Verfahren unter bestimmten Bedingungen Fehler finden können. Um die notwendige Sicherheit zu gewährleisten, müssen sich verschiedene unabhängige Verfahren ergänzen. Damit steigt die Chance einen Fehler zu finden enorm. Aus diesem Grund ist jede zusätzliche Form der Kontrolle, auch und gerade die **Werker-selbstkontrolle**, so wichtig, denn sie steigert die Sicherheit und damit die Qualität unserer Bauteile zusätzlich.

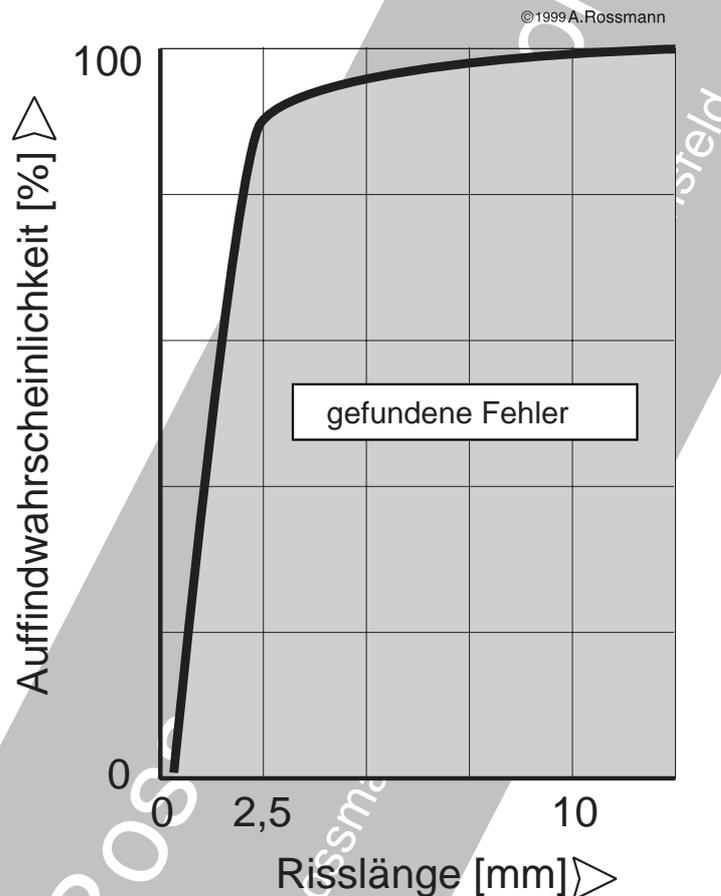
Natürlich muss das Prüfverfahren auf die zu suchenden Fehler abgestimmt sein. Mit Röntgen findet man zum Beispiel bestimmte Fehler besser als mit dem Eindringverfahren und umgekehrt. Voraussetzung ist also, dass man weiß, welche Fehlerart und -größe man sucht. Die **Fehlerart** ermitteln nicht zuletzt die Mitarbeiter im Labor. Bei der noch zulässigen Fehlergröße hat die Berechnungsabteilung das Sagen.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Prüfverfahren sind wichtige „Fertigungsschritte“. Sie müssen entsprechend stabil sein. Als Prüfer sind die Besten gerade gut genug.
- Der Oberflächenzustand eines zu prüfenden Bauteils ist mitentscheidend für den Prüferfolg. Im Hinblick auf die folgenden Prüfungen muss eine gleichbleibende Oberflächenqualität gewährleistet sein.

- **Zugeschmierte Stellen** können durch eine Eindringstoffprüfung ohne vorherige, vorgesehene und zugelassene Rissöffnungsverfahren nicht gefunden werden.

Eine einzelne zerstörungsfreie Prüfung ist keine Garantie für Fehlerfreiheit!



typisches Beispiel für ein zerstörungsfreies Prüfverfahren

Bild 4

Dieses Schaubild zeigt, was wir schon immer wussten: Je größer der Fehler, um so sicherer ist er zu finden. Man sieht aber auch, dass sich Fehler durch eine einzige zerstörungsfreie Prüfung nicht ganz ausschließen lassen. Das Argument: „Da kann kein Fehler bzw. Riss drin sein, weil das Teil rissgeprüft wurde“, gilt auch dann nicht, wenn die Prüfung absolut vorschriftsmäßig durchgeführt wurde. Nur von Teilen, bei denen eine Folge **mehrerer ver-**

schiedener Prüfungen durchgeführt wurde, kann eine weitgehende Fehlerfreiheit erwartet werden.

In diesem Zusammenhang ist die **Beobachtung des Fertigungsvorgangs** (z.B. der Zerspanung, siehe Kapitel 2 und 8) durch den Werker besonders wichtig, da dies als eine Art unabhängiger Prüffolge angesehen werden kann, welche zur Fehlerfreiheit der Teile merklich beiträgt.

5. Auf einen Schlag (Einfluss der Kennzeichnung auf die Bauteilfestigkeit)

Der Kriminalkommissar blickt scheinbar nicht mehr durch! Er ist überzeugt, dass das verdächtige Auto gestohlen wurde. Aber kann er das beweisen? Alle Schlagzahlen an Motor und Karosserie sind ausgeschliffen. Jeder passionierte Krimischauer weiß aus dem Fernsehen, dass nun das Labor zur Tat schreitet und durch geheimnisvolle Ätzverfahren die Nummern wieder sichtbar macht. Dies zeigt uns, wie tief solche Markierungsverfahren in den Werkstoff einwirken, ohne dass äußerlich noch etwas erkennbar sein muss.

Wie ich das Problem sehe:

Für die Qualität eines Bauteils ist die **Rückverfolgbarkeit** durch die **Kennzeichnung** sehr wichtig. Damit lässt sich z.B. die Bauteilversion eindeutig bestimmen, wenn Probleme in Fertigung oder Betrieb auftreten. An der Kennzeichnung kann man die „Geschichte“ der Teile zurückverfolgen und Ursachen wie Auswirkungen von Problemen eingrenzen. Die Dauerkennzeichen werden wie eine Tätowierung bleibend durch Schlagzahlen, Funkenerosion, Vibrograf und Ätzungen angebracht.

Bei zeitlich begrenzten Kennzeichnungen, wie Prüfstempeln oder Markierungen, werden z.B. Farben, Kreiden oder Stifte verwendet. Wo bei der ganzen Sache ein Pferdefuß sein kann, zeigt uns der Kommissar. Wenn Schlagzahlen den Werkstoff so erstaunlich tief verändern, dass sich dies beim Anätzen abzeichnet, darf davon ausgegangen werden, dass in diesem Markierungsbereich der Werkstoff neben einer eventuellen Kerbwirkung auch in seinen Festigkeitseigenschaften merklich beeinflusst sein kann. Es verwundert deshalb nicht, dass man, wenn auch selten, immer wieder von Schäden hört, die von solchen Markierungen ausgehen. Es ist also wichtig, dass diese nur in niedrig belasteten Bauteilzonen angebracht werden. Die verschiedenen Kennzeichnungsverfahren können sich in ihrem Einfluss auf das Bauteil deutlich unterscheiden. So ist z.B. bei funkenerosiven Markierungen mit zu intensiver Einstellung eine Schädigung der Schwingfestigkeit durch Aufschmelzungen im Mikrobereich nicht auszuschließen. Dabei spielen Dinge wie **Eigenspannungen, Verfestigung, Gefügeveränderungen oder sogar Mikrorissbildung** eine Rolle. So sind z.B. schon Schäden durch Risskorrosion in galvanischen Bädern auf Grund der Eigenspannungen im Bereich von Schlagzahlen bekannt geworden. Der Konstrukteur weiß aus Erfahrung und an Hand von Festigkeitsberechnungen, wo er seinem Bauteil eine bestimmte Kennzeichnung „zumuten“ kann. Auch das geeignete Kennzeichnungsverfahren muss festgelegt werden.

Wer glaubt, dass es unerheblich ist, mit welchen Farben oder Stiften nicht dauerhafte Kennzeichnungen gemacht werden können, weil ja keine Verformung der Oberfläche eintritt, der täuscht sich gewaltig. So sind für bestimmte Werkstoffe und mögliche Temperatureinflüsse in Fertigung und Betrieb nur ganz bestimmte Stifte oder Farben zugelassen, weil sonst die Gefahr besteht, dass schädigende Reaktionen mit der Bauteiloberfläche auftreten.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Der Konstrukteur achtet darauf, dass alle erforderlichen Angaben zur Teilekennzeichnung seinen Dokumenten einfach und sicher zu entnehmen sind. Dazu gehört der **Ort der Kennzeichnung** und das geeignete Kennzeichnungsverfahren. Dies setzt voraus, dass er sich im Zweifelsfall ausreichend fachkundig gemacht hat.
- Die Qualitätskontrolle stellt sicher, dass nur geeignete, d.h. **vorgeschriebene Kennzeichnungsmethoden** und **zulässige Farben oder Stifte** zur Anwendung kommen.
- Es ist nicht zulässig, Kennzeichnungsmittel unbekannter Herkunft nach dem Motto anzuwenden: „Gib mal schnell deinen Stift her, ich finde meinen gerade nicht!“
- Falls nachträgliche Kennzeichnungen, z.B. bei der Reparatur, durchgeführt werden, ist auch hier auf das geeignete Verfahren zu achten. Wenn nicht mehr genügend **Platz auf dem Bauteil** an vorgesehener Stelle zur Verfügung steht, sind die zuständigen Fachabteilungen, im Zweifelsfall die Qualitätskontrolle, zu benachrichtigen.

Ungeeignete Kennzeichnungsverfahren können zu Betriebsschäden führen.

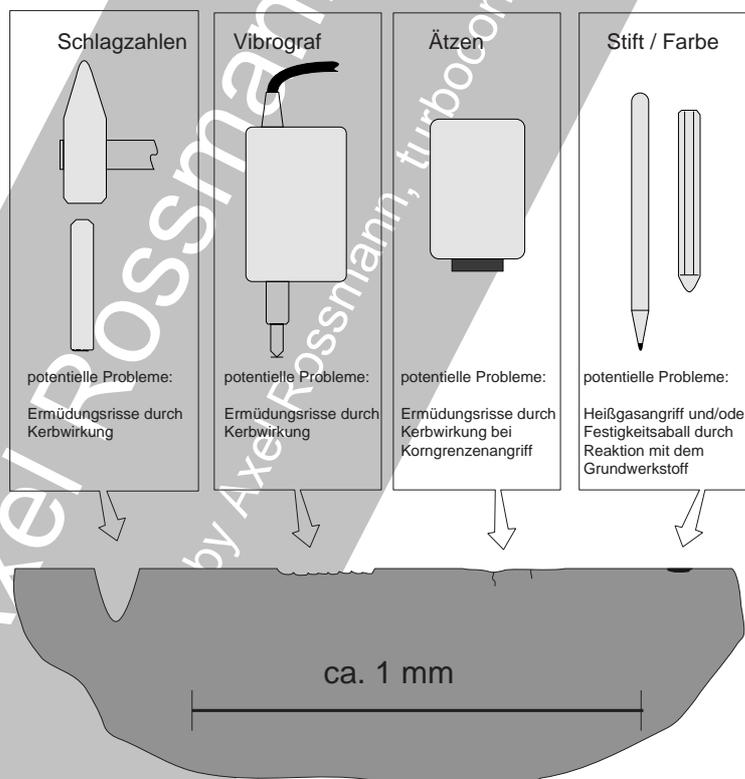


Bild 5

Die Kennzeichnung unserer Bauteile ist für die **Identifikation und Rückverfolgbarkeit** unerlässlich. Nur so können sich z.B. Serien mit Schwachstellen eingrenzen lassen und geziel-

te Abhilfen erarbeitet und angewandt werden. Wenn ein Kennzeichnungsverfahren jedoch falsch angewandt wird, kann es auch zur **Qualitätsminderung** des Bauteils führen.

6. Wenn der Funke überspringt und andere Kurzschlüsse (Schädigungen durch Funkeneinwirkung)

Falsch geraten, es handelt sich einmal nicht um zwischenmenschliche Neigungen, sondern um die Folgen von **elektrischen Funken** für unsere Bauteile. Die große Energiekonzentration in elektrischen Funken an nicht dafür vorgesehenen Bereichen kann unsere Bauteile in unzulässiger Weise beeinflussen. Um solche Probleme zu vermeiden, wollen wir uns einmal näher mit dieser Materie beschäftigen.

Wie ich das Problem sehe:

Wenn man unsere Fertigungs- und Prüfverfahren betrachtet, stellt man erstaunt fest, wie viele Gelegenheiten es für die Entstehung eines unerwünschten elektrischen Funkens geben kann. Typische Beispiele sind:

Funken durch **Kontaktprobleme** entstehen bei galvanischen Prozessen, elektrischen Schweißverfahren und Gravuren (z.B. mit Elektroschreiber), bei Beschichtungen und bei **Kurzschlüssen** in elektrochemischen Anlagen. Selbst Rissprüfverfahren mit Stromdurchgang (z.B. die magnetische Rissprüfung) sind nicht über jeden Verdacht erhaben. Wer nun erwartet, dass sich schadensrelevante Kontaktstellen als auffällig große Fehlstellen zeigen müssen, täuscht sich. Unser Interesse sollte sich auch auf Fehlstellen im Millimeterbereich richten.

Was ist nun eigentlich das Beunruhigende an einem außer Kontrolle geratenen elektrischen Funken? Betrachten wir die Oberflächen eines Bauteils unter Vergrößerung dort, wo der Funke eingewirkt hat. Wir erkennen, dass der Werkstoff örtlich aufgeschmolzen ist und dabei auffällige Schädigungen erfahren hat: Typisch sind angeschmolzene, durch **Schmelzkrater** und Schmelztropfen aufgeraute „Mondoberflächen“, die von spröden Rissen durchzogen sind. Was wir nicht sehen, sind Veränderungen des Gefüges durch den Wärmeeinfluss des Lichtbogens (Funken) und der Aufnahme von unerwünschten Bestandteilen (z.B. vom Gegenstück oder einem Umgebungsmedium) in die Schmelze. Mit hohen Zugspannungen beim Schrumpfen der Schmelze während der Erstarrung und Abkühlung ist zu rechnen. Solche Zugspannungen gehen zu Lasten der ertragbaren Beanspruchungen im Betrieb. Alle diese Einflüsse können die Festigkeit unseres Bauteils deutlich schwächen und so dessen Lebensdauer verkürzen. Auch die Abschätzung der Tiefe der Schädigungen zur eventuellen Festlegung einer Nacharbeit, oder um zu entscheiden, ob ein noch vorhandenes Aufmaß zur Beseitigung ausreicht, erfordert, dass sich die Fachabteilung mit der Anschmelzung etwas eingehender beschäftigt.

Dies bedeutet für unser Handeln:

- Funktionsnotwendige **Kontaktflächen für Stromdurchgänge** im Fertigungsbereich und der Kontrolle sind so zu gestalten und zu behandeln, dass keine Funkenbildung auftritt. Ein „Brutzeln“ oder der „Geruch von Ampere“ sind Anzeichen dafür, dass an einer Kontaktstelle nicht alles nach Wunsch läuft.
- Elektrische Kontaktflächen an Vorrichtungen sind so zu gestalten und zu warten, dass keine Funkenbildung auftritt. Verschlossene oder geschädigte Kontaktflächen an Vorrichtungen sind rechtzeitig auszutauschen.

- Bauteilseitige elektrische Kontaktflächen sind besonders kritisch auf Anzeichen für eine schädigende Funkenbildung zu betrachten. Merkmale sind z.B. Aufrauungen und Anlauffarben.
- Die **Nacharbeitsfähigkeit von Schädigungen** durch örtliche Aufheizung und Funkenbildung kann nur die zuständige Kontrollstelle in Zusammenarbeit mit den Fachabteilungen (z.B. Festigkeit und Labor) klären.

Typische Schädigungen im Bereich einer Funkenbildung.

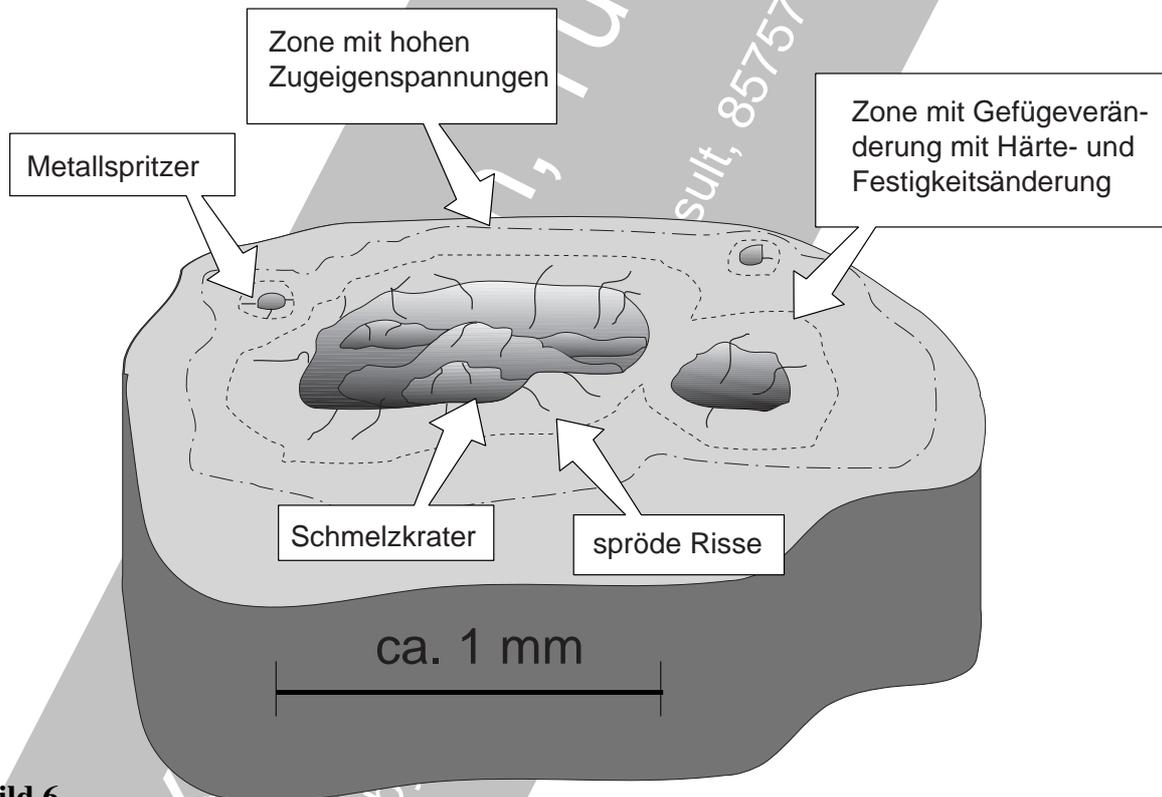


Bild 6

Funkenbildung an Kontaktflächen kann zu einer Vielzahl von Schädigungen führen, die gelegentlich vergleichsweise tief in den Grundwerkstoff hineinwirken. Ein oberflächliches Abarbeiten genügt deshalb häufig nicht. Die Unbedenklichkeit sollte danach durch eine zerstörungsfreie metallografische Überprüfung nachgewiesen werden.

7. Das Michelangelo-Problem (Bauteilschädigung durch Werkzeugbruch)

Versetzen wir uns einmal einige hundert Jahre zurück. Wir beobachten, wie der große Meister eine seiner Statuen bearbeitet. Plötzlich - „Ping“ der Meißel ist gebrochen. Hoffen wir, dass das Meisterwerk dabei nicht irreparabel beschädigt wurde. Doch das Problem des „Meißelbruchs“ hat auch in unserer Zeit nicht an Aktualität verloren.

Wie ich das Problem sehe:

Es geht ganz allgemein um **Werkzeugschäden** und ihre Auswirkung auf unsere Bauteile. Ausbrechende Drehstähle, abgebrochene Bohrer, beschädigte Fräuserschneiden, abgenutzte Räumnadeln sind nicht nur ein Ärgernis, weil der Fertigungsprozess verzögert wird, teure Werkzeuge unerwartet früh ersetzt werden müssen oder zusätzliche Rüstzeiten anfallen. Viel bedenklicher ist, dass an den Bauteilen Beschädigungen durch Kerben und eingepresste kleine Schneidenbruchstücke entstehen, welche zum Ausschuss führen können, wobei sich schnell ein Schaden im Wert eines schönen Autos aufsummiert. Selbst wenn nach reiflicher Prüfung durch eine Fachabteilung eine Nacharbeit festgelegt wird und erfolgreich durchgeführt werden kann, ist doch mit hohen Zusatzkosten für den Unbedenklichkeitsnachweis zu rechnen.

Kritisch wird es, wenn der Werkzeugbruch zunächst unbemerkt auftrat und damit die Schnittparameter von Bauteilbereichen undefiniert verändert wurden.

Die Lebensdauer unserer rotierenden Teile, insbesondere von Scheiben, wird auch durch einen gleichbleibenden, optimalen Oberflächenzustand gewährleistet. Wenn aber z.B. undefinierbare Verfestigungen auftraten oder die Eigenspannungen sich ungünstig veränderten, ist dies nicht einfach festzustellen. Eine Beurteilung oder Nacharbeit ist dann problematisch. Beschränkt sich die Beschädigung auf einen örtlichen Eindruck, wäre es, auch wenn noch genügend Aufmaß vorhanden ist, falsch, einfach mit dem nächsten Bearbeitungsschritt die **Beschädigung zu entfernen**. Wir können nicht sicher sein, allein durch Augenschein die Wirkung der Beschädigung über die einfache Kerbe hinaus ausreichend sicher abzuschätzen. Wichtig ist aber auch, dass man sich das beschädigte Werkzeug genau ansieht und die **Versagensursache** ermittelt. Erst dann sind gezielte Abhilfemaßnahmen möglich. Stellen wir uns vor, das Werkzeug hat versagt, weil die Schneidplatte aus ungeeignetem Material bestand oder die Befestigung fehlerhaft war. Dann ist es durchaus möglich, dass noch andere Werkzeuge bzw. Maschinen betroffen sind, und sich das kostspielige Problem wiederholt. Es ist also notwendig, dass neben dem beschädigten Bauteil auch das betroffene Werkzeug zur Begutachtung vorgelegt wird. Im Zweifelsfall ist die zuständige Kontrolle unsere Ansprechstelle.

Merken wir uns, bei Michelangelo ging es im schlimmsten Fall um den eigenen Geldbeutel, wenn der Kunde sein Kunstwerk verschmätzt hätte. Bei uns geht es auch und gerade um die Sicherheit derer, die sich vertrauensvoll unserem Produkt anvertrauen. Deshalb können wir bei „Meißelbruch“ nicht einfach zur Tagesordnung übergehen.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Durch **Veränderungen der Zerspanungsbedingungen** können die wichtigen Festigkeitseigenschaften der Bauteiloberfläche betroffen sein. Deshalb ist bei Werkzeugversagen bis zum Nachweis des Gegenteils immer auch von einer Beeinträchtigung des Bauteils auszugehen.

- Bei **Werkzeugversagen** ist die zuständige Kontrolleinheit anzusprechen. Nach Möglichkeit ist das ursächlich betroffene Werkzeug zur Untersuchung der Versagensursache aufzubewahren bzw. vorzulegen.
- Die Bauteile sind unverändert (keine vorherigen; nicht abgesprochenen Nacharbeitsversuche) der zuständigen Kontrolle vorzustellen. Die Chancen, dass das Bauteil durch geeignete Maßnahmen zur rechten Zeit in seiner Verwendbarkeit nicht eingeschränkt wird; stehen gut.
- Das **Verhalten unserer Werkzeuge**, aber auch das **Maschinenverhalten** und die erzeugten Bauteiloberflächen, behalten wir dauernd im Auge. Bei Abweichungen und Veränderungen ergreifen wir zielführende Maßnahmen. Hier ist die Werkereigenkontrolle von herausragender Bedeutung.

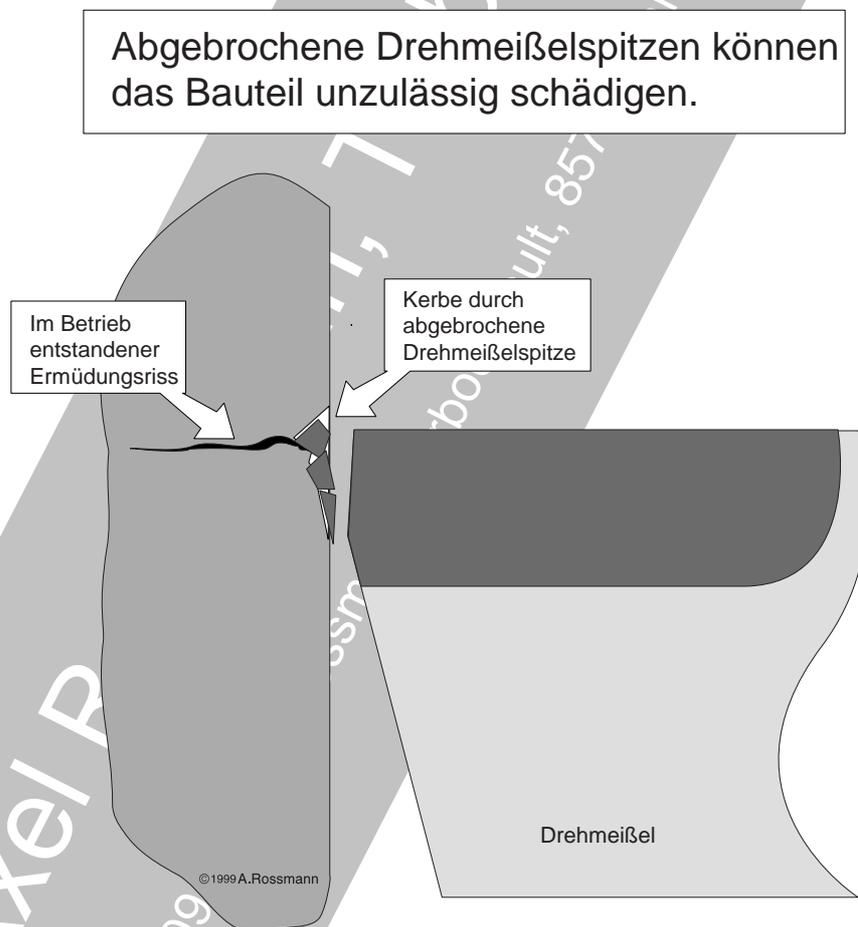


Bild 7

*Ausbrechende Werkzeuge können teure Teile ruinieren. Ein eingedrückter **Werkzeugausbruch** wirkt als scharfe Kerbe, von der später **im Betrieb ein Ermüdungsrisss** ausgehen kann. Nicht selten lassen enge Maßtoleranzen die erforderliche Nacharbeit nicht mehr zu.*

*Deshalb muss ein **Schneidenbruch** auch durch eine möglichst gute Werkzeugqualität vermieden werden. Dies kann zwar für sich allein betrachtet etwas teurer sein, trotzdem dürfte das Geld gut angelegt sein, wenn damit der Fertigungsausschuss entsprechend zurückgeht.*

8. In der Badewanne (Schadenshäufigkeit an Neuteilen)

Die Gewinnspannen werden klein, die Preiskämpfe groß und die Innovationen kommen in immer kürzeren Abständen. Eine Folge ist, dass viele Gebrauchsgegenstände beim ersten Einschalten oder nicht lange danach versagen. Typische Beispiele sind Computer und Fernsehapparate aber auch Autos,...kurzum alle „Gebilde aus Menschenhand“. Natürlich ist diese Erscheinung der erhöhten Schadensanfälligkeit von Neuteilen auch bei Maschinen und Anlagen zu beobachten.

Wie ich das Problem sehe:

Dass **Neuteile eine erhöhte Schadensanfälligkeit** aufweisen, kann als ein Naturgesetz der Technik angesehen werden. Eigentlich ist dieses Verhalten auf den ersten Blick unverständlich, denn ein Neuteil hat ja noch keine Schädigung, wie z.B. Verschleiß durch den Betrieb, erfahren. Es ist richtig, dass bei lang gelaufenen Geräten die Schadenshäufigkeit zum Lebensende hin, wie bei allen Dingen auch in der Natur, ansteigt. Dazwischen liegt jedoch ein langer Zeitabschnitt mit relativ wenig Schäden. Betrachtet man die Schadenshäufigkeit über die Laufzeit hinweg, so fällt die Kurve von einem anfangs hohen auf einen konstant niedrigen Wert ab, um dann zum Lebensende hin wieder anzusteigen. So entsteht die sogenannte „Badewannenkurve“.

Was führt nun aber zu der anfangs hohen Schadenshäufigkeit bei Neuteilen oder bei frisch überholten bzw. gewarteten Anlagen? Ein Grund dafür sind Fremdkörper in Form von Fertigungsrückständen (z.B. Späne, Strahlgut), zurückgelassenes Werkzeug, Hilfsstoffe (z.B. Putzlappen) oder ausgetauschte Schrauben und Muttern. Wurde bei Neuteilen die Qualitätsprüfung auf den Konsumenten verlagert, diesen Eindruck kann man bei den oben erwähnten Haushaltsgeräten bekommen, so ist „die Badewanne“ besonders ausgeprägt.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Wir als Triebwerksbauer werden alles tun, um dem Trend zur ausgeprägten „**Badewanne**“ entgegenzuwirken. Ein „Ausruhen in der Badewanne“ kommt für uns nicht in Frage. Dies erreichen wir, indem wir unsere Qualitätssicherung kontinuierlich verbessern und Gelerntes umsetzen.
- Bei **Prüf- und Abnahmeläufen** achten wir auf Anzeichen frühzeitiger Besonderheiten. Dies gilt z.B. für die Kontrolle von Öl- und **Kraftstofffiltern** und den Magnet-**Chipdetektoren**. Falls ungewöhnliche Ablagerungen oder Späne auftauchen, werden diese auf ihren Ursprung hin bei den zuständigen Fachabteilungen analysiert und untersucht. Je nach Ergebnis werden sofort Abhilfemaßnahmen eingeleitet.
- Abschließende **Boroskopinspektionen** an auszuliefernden Komponenten, Baugruppen und Triebwerken werden besonders intensiv durchgeführt. Ersten Anzeichen für ein außergewöhnliches Verhalten wird nachgegangen bis sich die Unbedenklichkeit gezeigt hat.
- Wer mit **Montagearbeiten** betraut ist, hat eine wichtige qualitätssichernde Funktion, auch wenn er nicht organisatorisch zur Qualitätssicherung gehört. Er sieht als Letzter die „Innereien“ unseres Produkts. Deshalb achtet er z.B. auf **Bauteile, die vom üblichen Erscheinungsbild**

abweichen, aber ebenso auf potentielle Fremdkörperquellen und auffällige Besonderheiten. Hierzu gehören **Fremdpartikel** (z.B. Strahlgut), die aus Bohrungen rieseln oder **Grate** an Ecken von Rohrleitungen, welche in den Ölkreislauf und damit in die Lager gelangen können.

Die "Badewannenkurve" wird nicht zuletzt durch Fertigung, Reparatur und Montage geformt.

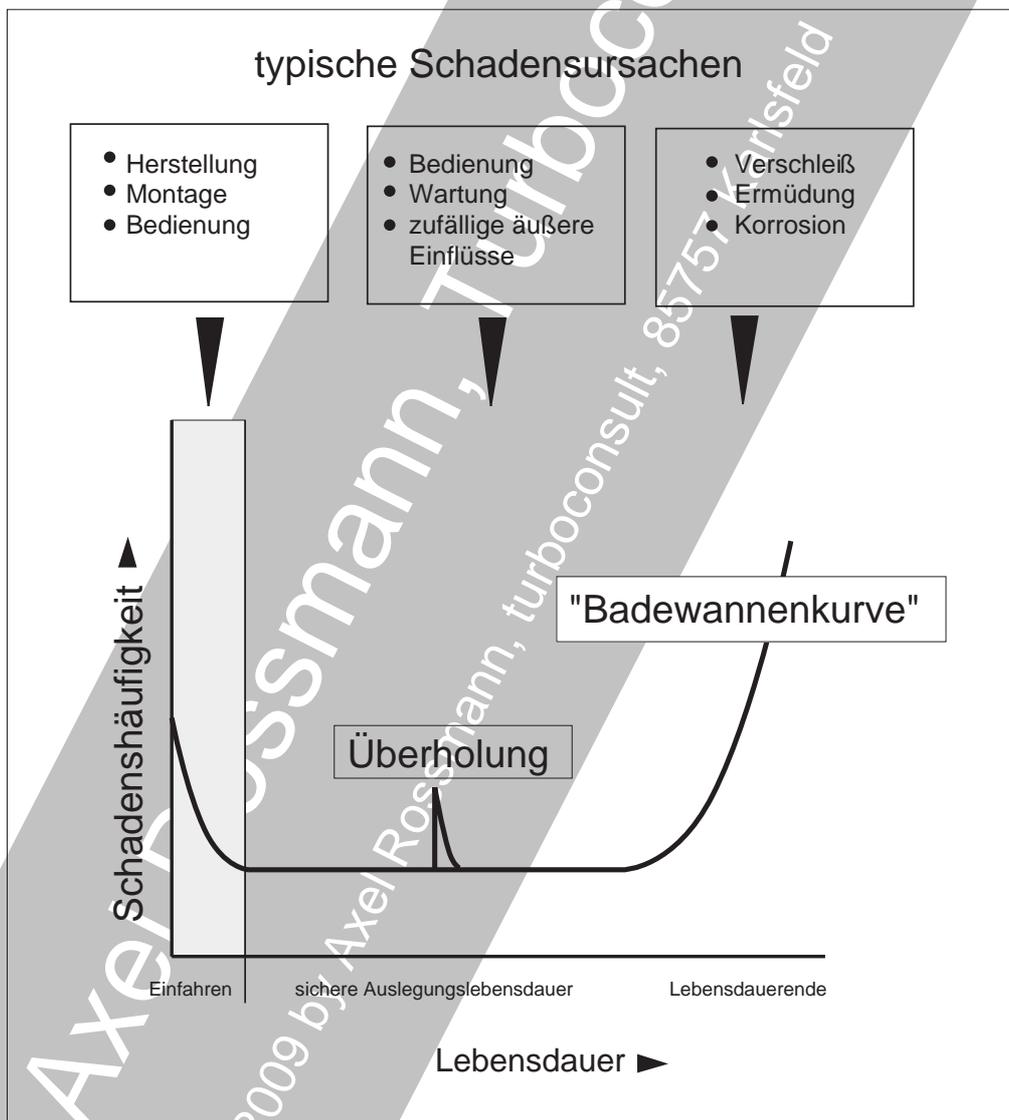


Bild 8

Die Schadenshäufigkeit eines technischen Gerätes ist beim Neuteil oder nach einer Überholung relativ hoch. Der ursprüngliche Fehler mag zwar behoben, dafür können aber neue Ursachen für Schäden entstanden sein. Eine gute Schlusskontrolle, möglichst noch mit ei-

ner Abnahmeläufe, ist deshalb besonders wichtig. Abnahmeläufe vor einer Triebwerksauslieferung sind also ein wichtiger Beitrag zur Qualitätssicherung.

9. Produktionsprobleme in den Griff bekommen (Ausbildung und Qualität)

Unter dem Motto: „...Produktionsprobleme und kein Ende“ schreibt die Zeitschrift „Flug Revue“ über einen großen Flugzeughersteller, der trotz hervorragender Auftragslage erhebliche finanzielle Verluste erlitt. Nicht zuletzt werden „chaotische Fertigungsverhältnisse“ und „selbstverschuldete Ersatzteilknappheit“ in diesem Zusammenhang genannt.

Wie ich das Problem sehe:

Jahrelang zwang die schlechte Auftragslage Firmen, nicht zuletzt auch Triebwerksfirmen, zu einschneidendem **Personalabbau**. Gerade in einer derartig ausgeprägten High-Tech-Branche ging dabei bedauerlicherweise auch viel Know-How verloren. So ist zum Beispiel die Diffusionsbeschichtung von Turbinenschaufeln mit viel praktischer Erfahrung und handwerklichem Geschick verbunden. Selbst kleine Abweichungen bei der Beschichtung, die nur das geübte Auge rechtzeitig erkennen kann, führen nach der folgenden Wärmebehandlung zu kostspieligen Nacharbeiten oder gar zum Ausschuß.

Springt die Konjunktur wieder an, ist es verständlich, dass Probleme der Qualität und Liefertreue sich besonders gravierend bemerkbar machen, wenn mangelhafte berufliche Ausbildung der Mitarbeiter mit fehlender beruflicher Erfahrung zusammenfällt. Dies ist bei der Ausbildungspolitik vieler Länder der Fall. Es kann offenbar eine unerträglich lange Zeit dauern, bis in einem solchen Fall eine merkliche Besserung eintritt. Besonders schmerzlich wird das Problem bei Tätigkeiten, wie zum Beispiel der Arbeitsvorbereitung oder bei Werkern mit selbstkontrollierenden Aufgaben. Sieht man sich die Probleme im genannten Fall im Einzelnen an, so erkennt man, dass offenbar nicht ein akademischer Grad, sondern die praktische Berufsausbildung und damit im Zusammenhang das Selbstverständnis desjenigen, der Qualität produziert, für die Vermeidung der Qualitätseinbrüche entscheidend ist. Es bedarf z.B. schon einiger Fachkenntnis und dem Verständnis der technischen Zusammenhänge bei einem Fertigungsprozess, um einen optimalen Arbeitsplan zu erstellen oder Unzulänglichkeiten in einem Ablauf vor Ort rechtzeitig zu erkennen. Die allgemeine gute berufliche **Ausbildung** gibt uns die Möglichkeit, auf vielseitige, praktisch orientierte und motivierte Mitarbeiter zurückzugreifen. Dies ist die Voraussetzung dafür, Probleme, die auch unsere Mitbewerber haben, schneller und besser zu lösen. Machen wir aus der Not eine Tugend: Nutzen wir unsere Chance die Aus- und Weiterbildung unserer Mitarbeiter in eine besonders gute Qualität unserer Produkte umzusetzen.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Unsere selbstkontrollierenden Werker und die Arbeitsvorbereiter sind das Rückgrat der Qualität unserer Produkte. Ihnen sollte deshalb aufbauend auf dem hohen Ausbildungsgrad, Wertschätzung in Form intensiver fachlicher **Weiterbildung** und **Motivation** geboten werden.
- Die Lehrlingsausbildung in der Triebwerkstechnik ist für die Qualität unserer Produkte von besonderer Bedeutung.
- Die Einarbeitung neuer Mitarbeiter erfordert die Übertragung von Know-How und ist besonders vorzubereiten. Hierzu ist ein **Einarbeitungsplan** und ausreichend Zeit notwendig.

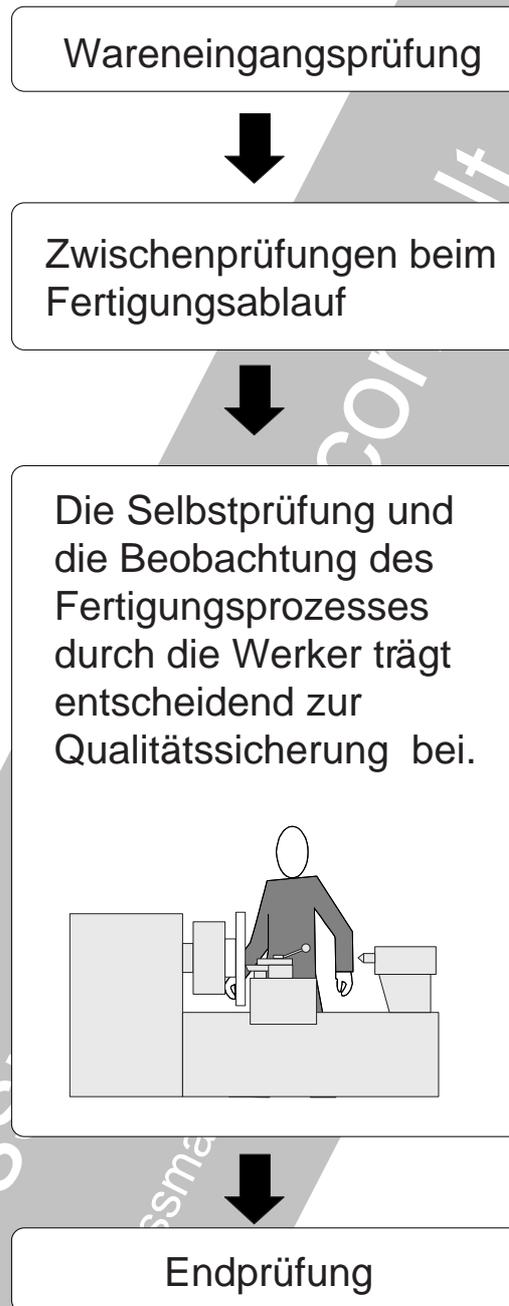


Bild 9

Facharbeiter leisten einen nicht zu unterschätzenden Beitrag zur Sicherung der Qualität unserer Produkte. Sie sehen während des Fertigungsprozesses das Verhalten des Bauteils, des Prozessablaufs und der Werkzeuge. Dabei können Abweichungen, die auf Probleme hinweisen, auffallen. Beispiele dafür sind ein besonderes Spanaussehen oder ungewöhnlich intensive Anlauffarben. Solche Besonderheiten können auf ernste Fehler hinweisen, die mit den folgenden Prüfverfahren nicht mehr sicher auffindbar sind. Motivation und Weiterbildung sind deshalb gerade in der Fertigung eine gut angelegte Investition.

*Zur Motivation gehört eine geeignete **Arbeitsplatzgestaltung** und eine auf die anspruchsvolle Aufgabe abgestimmte **Weiterbildung**. Diese Weiterbildung sollte besonders das Verständnis für die technischen Zusammenhänge entwickeln. Jeder Fertigungsschritt ist in den Ablauf eingebunden, hat also eine Vor- und eine Nachgeschichte. Es ist also wichtig, dass Kenntnisse darüber vorhanden sind, wie die eigene Arbeit von der vorhergehenden beeinflusst sein kann, und wie sich die eigene Arbeit auf die folgenden Schritte, insbesondere auf die Betriebseigenschaften des Bauteils, auswirkt.*

10. Der Buchhalter und der Steuerprüfer - unsere Vorbilder (Dokumentation im Fertigungsprozess)

Buchhalter und Steuerprüfer wissen worauf es ankommt. Sie überprüfen große Summen und komplexe Vorgänge. Dabei legen sie besonderen Wert darauf, dass die Stellen hinter dem Komma stimmen, auch wenn es sich nur um Pfennigbeträge handelt. Jede Unstimmigkeit in solchen scheinbaren Nebensächlichkeiten ist für sie ein Indiz, dass vielleicht auch im Großen etwas nicht stimmt. Wir alle haben schon in der Zeitung oder in Kriminalromanen gelesen, wie eine Kleinigkeit letztendlich zur Entdeckung eines Verbrechens führte.

Wie ich das Problem sehe:

Warum soll man aus einer Mücke einen Elefanten machen? Ist es nicht ein Zeichen von Kleinkariertheit, wenn scheinbar nebensächliche Merkmale und Abweichungen an unseren Bauteilen große „Aufstände“ hervorrufen?

Ich bin der Meinung, die Aufstände können gar nicht groß genug sein. Wenn z.B. beim Kunden auffällt, dass die **Seriennummer am Bauteil** nicht dort angebracht ist, wo sie hingehört oder gar in ihrer Ziffernfolge nicht plausibel ist, dann ist dies für den Kunden ein Alarmzeichen. Es ist für ihn ein Hinweis dafür, dass möglicherweise das gesamte Qualitätssicherungssystem im Argen liegt. Folgende Fragen tun sich dann auf:

Sind die notwendigen Vorschriften nicht bekannt? Ist die Schlusskontrolle mangelhaft? Wurde vielleicht etwas unbewusst oder gar bewusst vertauscht?

Da der Kunde meist die Projektverantwortung trägt, wird vielleicht schon morgen eine umfangreiche Überprüfung des gesamten Systems im wahrsten Sinne des Wortes „vor der Tür stehen“. Selbst wenn es sich zeigt, dass es sich tatsächlich nur um eine Nebensächlichkeit handelt, bedeutet eine solche Aktion Kosten, Zeit- und Prestigeverlust. Besser ist es also, wir selbst verhalten uns im wohlverstandenen Sinn wie Buchhalter und lassen keine Unzulänglichkeiten zu. Denn wohlgemerkt, es gibt für uns keine nebensächlichen Merkmale, solange diese nicht von den zuständigen Fachstellen entsprechend eingestuft wurden.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Auch kleine **Abweichungen** sind den zuständigen Fachabteilungen zur Bewertung vorzulegen.
- Es gibt keine von vorneherein nebensächlichen Abweichungen
- **Kennzeichnungen auf den Bauteilen** sind von größter Wichtigkeit und müssen absolut stimmig sein und den Vorschriften entsprechen.

Unleserliche Kennzeichnung gefährdet die Rückverfolgbarkeit und so Qualitätssicherung.

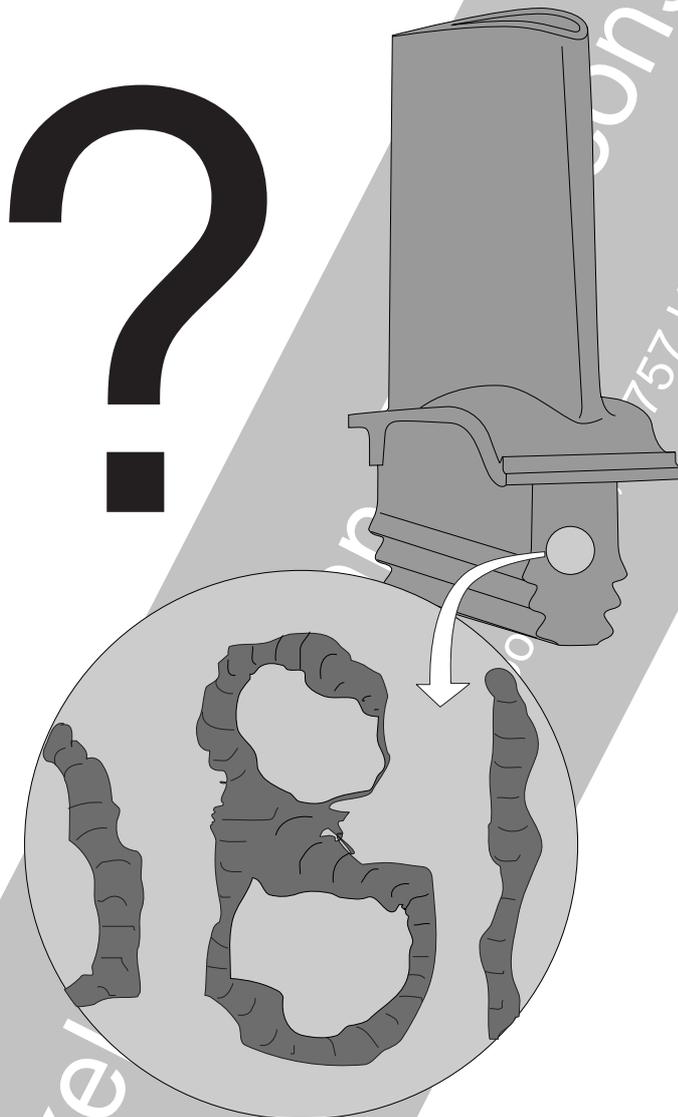


Bild 10

Kennzeichnungen sind dazu da, eine unmissverständliche Auskunft zum Bauteil zu geben. Diese Unmissverständlichkeit beginnt bei einer guten Lesbarkeit und eindeutiger Zuordenbarkeit der zugehörigen Dokumente.

11. Es ist ja nur ein Kratzer! (Der Einfluss von Kerben auf die Bauteilfestigkeit)

Jeder von uns dürfte die folgende Situation schon erlebt haben: Ein Kind tut sich weh und läuft mit großem Geschrei zur Mutter. Mit den Worten: „Warum gibst du denn nicht acht!“ wird die „Schadensstelle inspiziert. Dann folgt die beruhigende Feststellung: „Halb so schlimm! Deswegen brauchst du nicht so zu brüllen, es ist doch nur ein Kratzer“.

Wie ich das Problem sehe:

Gerade weil ein Kratzer vielleicht anfangs nicht so weh tut, und jedermann nicht viel Verständnis für das große Geschrei hat, ist die Sache doch nicht so leicht zu nehmen. Stellen wir uns einmal vor, es kommt zu einer Infektion, dann kann der Kratzer schnell zu einer gefährlichen, wenn nicht gar lebensbedrohlichen Situation führen. Zumindest eine Versorgung, z.B. durch Desinfektion, vielleicht sogar eine Tetanuspritze wären also doch angeraten.

Eine ganz ähnliche Situation kann vorliegen, wenn unsere hochbelasteten Bauteile einen Kratzer bekommen. Natürlich führt auch hier nicht jeder Kratzer zu einer gefährlichen Situation. Wenn der Kratzer aber an einer hochbeanspruchten Stelle des Bauteils liegt, z.B. im **Nabenbereich einer Turbinenscheibe**, dann kann dies die Lebensdauer des Bauteils entscheidend verkürzen. Vergleichbar mit der Infektion einer Wunde kann sich bereits sehr früh im Betrieb an dem Kratzer ein sogenannter **Ermüdungsanriss** bilden, der langsam wächst und im Extremfall zum Versagen führt.

Wir sollten uns deshalb durchaus das Alarmgeschrei der Kinder auch bei scheinbar kleineren Wehwechen zum Vorbild nehmen, wenn wir Beschädigungen, wie Kratzer oder Eindrücke an unseren Bauteilen feststellen. Auch hier sollten wir den Fachmann zu Rate ziehen, selbst wenn der scheinbar erfahrenere Kollege meint: „Die Sache sieht nicht so schlimm aus.“ Der Fachmann, hier von der zuständigen Qualitätssicherung repräsentiert, gibt die Gewähr, dass die richtigen Schritte eingeleitet werden. Vielleicht ist eine vorschriftsmäßige Nacharbeit, die wir mit der Desinfektion einer Wunde vergleichen können, möglich oder eine Rücksprache mit anderen Fachabteilungen, die dem Facharzt entsprechen, notwendig.

Auch eine Parallele mit der Tetanuspritze ist in der Technik vorhanden. Um die Empfindlichkeit der Bauteile gegen kleine (zulässige) Kratzer zu verringern, werden diese häufig kugelgestrahlt. Dadurch wird die Wirkung der Kratzer entschärft. Dies heißt natürlich noch lange nicht, dass bei solchen Teilen beliebig Kratzer zugelassen sind, auch hier ist das „Geschrei“ bei einer Beschädigung durchaus angebracht.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Am besten ist es natürlich, wir vermeiden das Entstehen von Kratzern und **Oberflächenbeschädigungen**. Dies gilt besonders für alle diejenigen, die mit Bauteilen hantieren müssen, besonders für die Fertigung, die Qualitätskontrolle und die Montage. So sind z.B. verschmutzte **Aufnahmen in Bearbeitungsmaschinen**, ein **Montagewerkzeug** mit einem **Grat** oder eine schmutzige Auflagefläche echte **Kratzerquellen**, auf die wir ein scharfes Auge werfen müssen.
- Aber, woran erkenne ich überhaupt einen Kratzer, der es wert ist so genannt zu werden? Ein erstes Indiz liefert uns die „**Nagelprobe**“: Alle Oberflächeneindrücke, die mit dem Fingernagel oder der Fingerspitze beim Darüberstreichen fühlbar sind, sollten wir ernst nehmen. Wir müssen aber immer daran denken, dass Kratzer und Riefen auch nachträglich wieder zugeedrückt

und deshalb kaum zu spüren sein können. Im Zweifelsfall sollten wir deshalb lieber einmal mehr als einmal zu wenig fragen.

- Die Fehlstelle darf **vor einer Beurteilung durch die Fachabteilung auf keinen Fall verändert** werden, also z.B. kein Kratzen mit harten Gegenständen und kein Überpolieren.
- Kratzer, Eindrücke und undefinierte Beschädigungen jeder Art sind der zuständigen Kontrollabteilung zur Bewertung vorzulegen.
- Eine **eigenmächtige Nacharbeit, wie z.B. das Auspolieren ist unzulässig.**
- Die **Ermittlung der Beschädigungsursache** stellt die Voraussetzung für gezielte Abhilfen dar.

Beschädigungen hochbeanspruchter Bereiche beim "handling" von Rotorscheiben können die Lebensdauer gefährlich verkürzen..

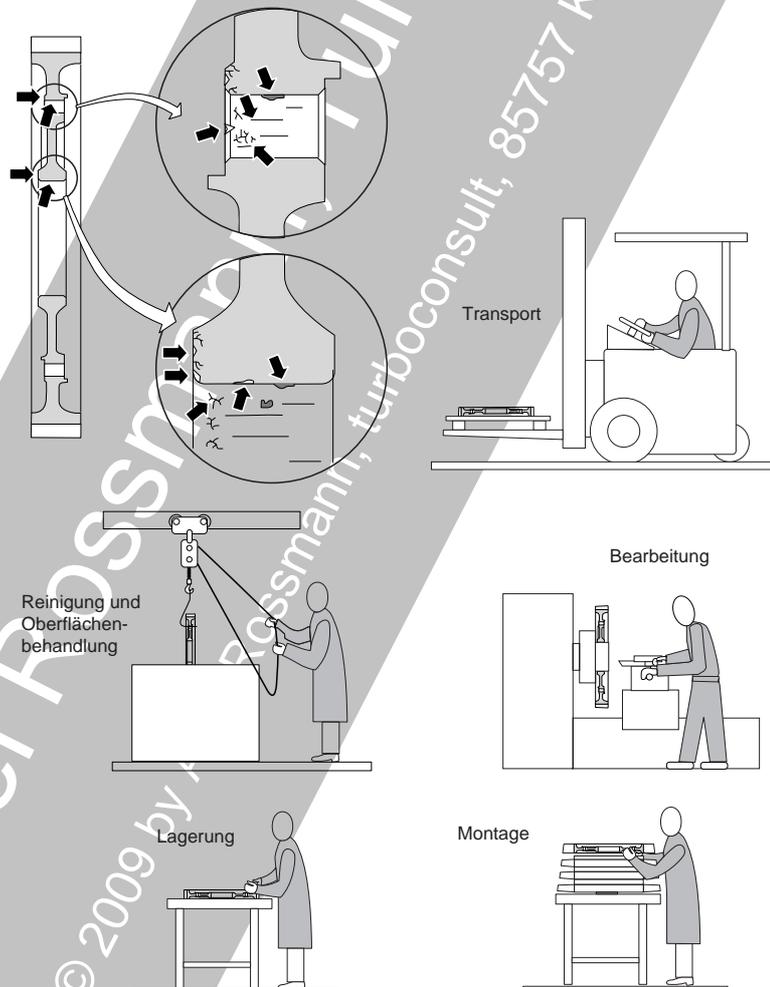


Bild 11

Die **Handhabung** („handling“) von **hochfesten Präzisionsbauteilen** erfordert besondere **Vorsicht**, denn die hohe Festigkeit wird durch entsprechende **Betriebsbelastungen** genutzt. Damit werden bereits **relativ kleine**

Oberflächenbeschädigungen gefährlich, weil von ihnen **Ermüdungsrisse** ausgehen können. Dieses Bild gibt eine **Übersicht der vielfältigen Beschädigungsmöglichkeiten** bei den unterschiedlichsten **Schritten** in einem **Fertigungsablauf**.

12. Knollenblätterpilz oder Champignon? (Der Umgang mit Hilfsstoffen)

Bei einem Flugzeughersteller wurde ein notwendiges Dichtmittel für Niete an einem Außenteil vergessen. Darauf entstand eine derartige Korrosionsgefahr, dass tausende dieser Niete ausgetauscht werden mussten. Solch ein Vorfall bedeutet neben etwaigen Sicherheitsrisiken hohe Kosten und ärgerliche Kunden.

Wie ich das Problem sehe:

Für viele von uns haben Hilfsstoffe wie **Schmiermittel und Dichtungspasten** eher den Stellenwert einer Schönheitscreme: Schaden kann's nicht, und es hilft, wenn man fest genug daran glaubt. Dies mag für Schönheitscremes gelten. Für Hilfsstoffe in technischen Geräten, insbesondere High-Tech-Geräten wie Flugtriebwerken, ist dies eine fundamentale Fehleinschätzung. Ein typisches Beispiel sind z.B. Schmierpasten für **Schraubengewinde**. Gehen wir einmal davon aus, dass anders als im angeführten Beispiel eine Anwendung erfolgt. Wie es das Schicksal will, gibt es jedoch zwei Schmierpasten mit äußerst unterschiedlichen Eigenschaften, die beide schwarz sind und auch eine ähnliche Konsistenz haben. So landen wir wieder bei der Überschrift. Die eine Schmierpaste, der „Knollenblätterpilz“ ist für kalte Teile gut geeignet. Sie enthält aber Schwefel, der bei fälschlicher Anwendung an Heißeilen auf Grund der hohen Betriebstemperaturen zu gefährlichem Korrosionsangriff an den sonst unempfindlichen Nickellegierungen führt. Häufig ist die Lebensdauer rotierender Teile durch die hohen Beanspruchungen an den Bohrungen, durch welche die Schrauben verlaufen, bestimmt, und gerade hier greift die Korrosion an. Das kann zum Sicherheitsproblem werden. So gibt es z.B. **schwefelfreie Schmierpasten**, die zwar auch schwarz sind, sich aber hervorragend für Heißeile eignen.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Hilfsstoffe, insbesondere Schmierstoffe sind nur in **Verpackungen** zu verwenden, die eindeutig das Produkt kennzeichnen und auf denen der Einsatzbereich deutlich angegeben ist. Die Kennzeichnung auf einem entfernbaren Deckel ist nicht ausreichend.
- Ein Umfüllen in neutrale oder dem Produkt nicht zuordenbare Behältnisse sollte auf keinen Fall erfolgen.
- Die Identifikation einer Schmierpaste allein durch die Farbe ist nicht möglich. Im Zweifelsfall darf die Schmierpaste nicht verwendet werden. Eine Identifikation ist nur durch die Fachabteilung möglich.
- Die Vermeidung einer gemeinsamen Lagerung verschiedener, zu verwechselnder Produkte am Verarbeitungsort ist wichtig.

Ein falsches Schmiermittel kann verheerende Folgen haben.

Vorsicht! Verwechslungsgefahr!

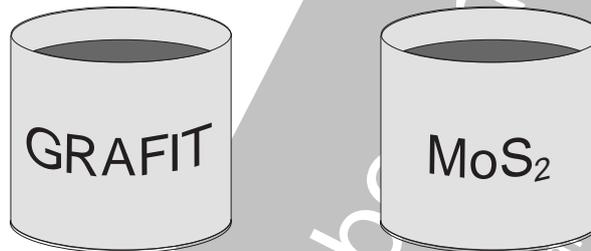


Bild 12

Die richtige Anwendung der richtigen **Hilfsstoffe** ist die Voraussetzung guter Fertigungsqualität und damit langer Bauteillebensdauer. So wird Qualität durch ein gutes Betriebsverhalten der Bauteile für den Kunden erst nutzbar.

Zu den Hilfsstoffen in Montage und Wartung gehören

- Öle zum **Schmieren** und **Konservieren**
- Gleitpasten für Verschraubungen
- Dichtmittel für Flansche von Gehäusen
- **Reinigungsmittel**, abgestimmt auf die Bauteilbesonderheiten

Das gleiche gilt im übertragenen Sinn selbstverständlich auch für die Hilfsstoffe der Fertigung. Hierzu gehören z.B. **Kühlschneidmittel** oder **Eingießmassen**.

13. Reingefallen (Fremdkörperschäden durch den Montagevorgang)

Auch erstaunlich kleine Fremdkörper können in Triebwerken zu umfangreichen Schäden führen. Die Erfahrung zeigt, dass ein Einschlag von gerade einem Millimeter Durchmesser nach längeren Betriebszeiten zu einem Verdichterschaukelbruch führen kann, der seinerseits wieder ein Feuer auslöst und damit das Flugzeug gefährdet.

Wie ich das Problem sehe:

Was hat ein Fremdkörperschaden mit uns als Hersteller neuer Bauteile und Triebwerke zu tun? Arbeiten wir nicht nach neuesten Methoden und höchstem Qualitätsstandard? Dass laufende Triebwerke alles Mögliche ansaugen können, ist uns bekannt. Warum sollten aber Fremdteilchen in „unseren“ noch nicht gelaufenen Triebwerken vorkommen und sich dann auch noch gravierend auf den späteren Betrieb auswirken?

Lassen sie mich die Problematik an einem typischen Beispiel erklären. Größere Triebwerke werden üblicherweise senkrecht stehend montiert. Werden nun z.B. außen Schrauben oder Muttern gegen Aufdrehen gesichert, so geschieht dies häufig mit dünnen **Drähten**, die mit einer Spezialzange verdrillt werden. Danach werden eventuell zu lange Drahtenden abgezwickelt. Der gelernte Triebwerksmechaniker weiß, dass man dabei die Drahtenden mit der Hand festhält, damit diese nicht unkontrolliert wegspringen. Geschieht dies ausnahmsweise einmal nicht, können die Drähte, wenn der Einlass nicht abgedeckt ist, oben in das Triebwerk hineinhüpfen. Jetzt könnte man denken: „Kein Problem, da drehen wir einfach zum Schluss das Triebwerk um und schütteln es etwas, dann fällt schon alles heraus“. Aber weit gefehlt. Durch die kegelförmige, dicker werdende Nabenkontur mit den Ringspalten zwischen den Rotorstufen fallen die kleinen Fremdkörper nahezu zwangsläufig in diese Spalte. Damit ist ein **Herausschütteln** nicht mehr möglich. Erst wenn das Triebwerk anläuft, werden die Fremdpartikel herausgeschleudert und können nun die Beschaukelung beschädigen. Selbst wenn diese Beschädigung bei einer anschließenden (Boroskop-) Kontrolle entdeckt wird, ist eine Zerlegung und erneute Montage sehr teuer. Bleibt der Einschlag unbemerkt, besteht die Gefahr, dass von dieser **Kerbe** aus ein **Schwingbruch** ausgeht, und es im Extremfall zu dem anfangs erwähnten katastrophalen Schaden kommt.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Wenn wir uns der Gefahr bewusst sind und strikt auf die Vermeidung von Fremdkörpern achten, sind Fremdkörperschäden tatsächlich nicht unser Problem. Damit dem aber so ist, müssen wir unseren Beitrag dazu leisten.
- Senkrecht stehende Triebwerke sind, falls dies die Zugänglichkeit nicht erfordert, immer durch die dafür vorgesehenen **Abdeckhauben** zu verschließen.

- **Sauberkeit** lohnt sich! Alle Arten von potentiellen Fremdkörpern und Fremdpartikeln sind vom Montagebereich soweit möglich fernzuhalten. Insbesondere sind Sicherungsdrahtenden durch Festhalten beim Abzwicken zu sichern.
- Wenn wir beobachtet haben, dass doch etwas in das Triebwerk gefallen ist, melden wir dies an die zuständigen Stellen. Diese denken daran, dass wir in Sicherheitsdingen auf das Engagement der Mitarbeiter angewiesen sind, und heutzutage der Überbringer einer schlechten Botschaft nicht mehr „geköpft“ wird.
- Ausgebaute Schaufeln mit Fremdkörperschäden, deren Entstehen nicht klar ist, werden zur **Identifikation** an die zuständige Fachabteilung übergeben. Dies ist die Voraussetzung dafür, dass der Ursprung des Fremdkörpers ermittelt und dann gezielte **Abhilfemaßnahmen** eingeleitet werden können.

Bei der Montage ist besonders darauf zu achten, dass keine Fremdkörper in das Triebwerk oder die Baugruppe fallen.

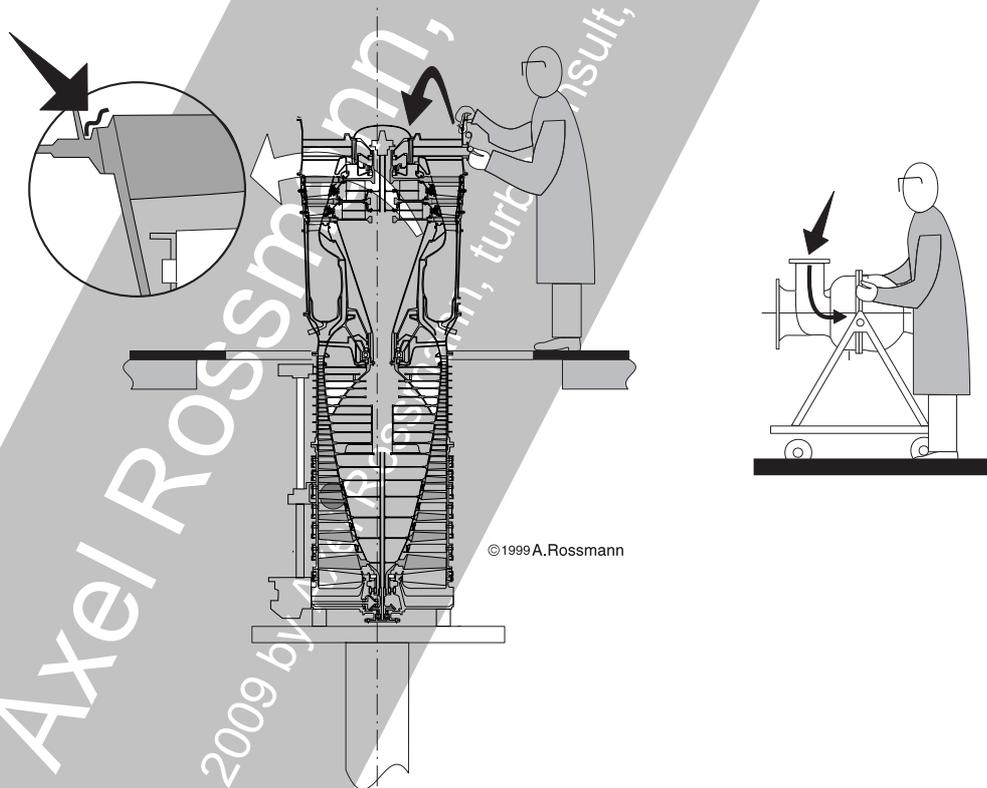


Bild 13

Montagearbeiten erfordern neben Funktionskenntnissen, Umsicht und Geschick auch ein hohes Verantwortungsbewusstsein. Fehler können hier leicht sicherheitsrelevante Folgen haben. Um das **Einbringen von Fremdkörpern** in das Triebwerk zu vermeiden, sind die Trieb-

werksöffnungen, insbesondere der Triebwerkeinlauf und alle nicht für den aktuellen Montagevorgang notwendigen Öffnungen, z.B. von Rohrleitungen und Flanschanschlüssen, durch geeignete **Abdeckvorrichtungen** zu schützen.

14. Auf schmalem Grat (Die Gefährlichkeit unzulässiger Gratbildung)

Der Wettbewerb wird immer schärfer. Dieser zwingt uns, die effektivsten Bearbeitungsverfahren zu nutzen. Trotzdem kann im Triebwerksbau ein etabliertes Verfahren nicht einfach durch ein neues, im Abtrag leistungsfähigeres Verfahren, ersetzt werden. Ein Grund dafür sind u.a. Bearbeitungsrate.

Wie ich das Problem sehe:

Zum Verständnis dieses Problems soll das folgende, tatsächlich aufgetretene Beispiel dienen:

Brennkammern bestehen aus sehr schwer zu bearbeitenden Werkstoffen und weisen hunderte von kleinen Kühlluftlöchern auf, die kostenintensiv hergestellt werden müssen. Da lag es nahe, ein schnelleres und kostengünstigeres Bearbeitungsverfahren anzuwenden. So wurde also das Bohrverfahren umgestellt. Die so gebohrten Brennkammern zeigten jedoch im Triebwerk ein unakzeptables Verhalten. Genauere Untersuchungen ergaben, dass bei dem neuen Bohrverfahren am Ende jeder Bohrung merkliche Grate entstanden waren. Diese **Grate** ließen die Kühlluft nicht mehr so leicht in die Bohrungen eintreten, was insgesamt bei den für solche Effekte typischerweise sehr empfindlichen Brennkammern zu den Betriebsproblemen führte.

Ein weiterer wichtiger Einfluss auf die Betriebstauglichkeit der Bauteile ist die **Kerbwirkung** von Graten, auch wenn diese scheinbar sehr klein sind. Sieht man sich einen solchen Grat bei höherer Vergrößerung an, dann erkennt man, dass dieser tiefe, scharfe Kerben aufweist. Von diesen Kerben können sich Ermüdungsrisse ausbilden, die z.B. in die hochbelasteten Kanten der Bohrungen oder Nuten einer Scheibe hineinlaufen und so die Bauteillebensdauer deutlich herabsetzen können.

Ein weiteres Problem ist das **Ausbrechen** von Graten im Kraftstoff- oder Ölsystem. Dadurch können die Gratpartikel hinter den „Schutzwall“ der Filter und so in die Lager gelangen. Damit entsteht die Gefahr eines Lagerschadens.

Wir sehen also, dass Bauteile mit Graten nicht nur wegen der **Verletzungsgefahr** mit Vorsicht zu behandeln sind, sondern, dass das Erkennen und die richtige Entfernung von Graten eine verantwortungsvolle Aufgabe darstellt, die für die Qualität unserer Bauteile entscheidend ist.

Das bedeutet für unser Handeln:

Einem Grat an Fertigteilen gehört unser besonderes Misstrauen. Wir denken daran, dass Grate oder ähnlich wirkende Kantenveränderungen nicht nur bei spanenden, sondern auch bei thermischen Verfahren, wie Laserbohren, Funkenerosion oder bei Verfestigungen, wie dem Kugelstrahlen, entstehen.

- Wir achten auch beim Fertigungsprozess auf **ungewöhnliche Gratbildung**, da dies auf eine unzulässige Veränderung des Prozesses, der Hilfsstoffe oder des Werkstoffes hinweisen kann.
- Werden Fertigungsverfahren umgestellt oder neue erprobt, ist eine eventuelle Gratbildung ein wichtiges Merkmal.

- Die Konstrukteure sorgen für unmissverständliche Angaben zum zulässigen **Zustand von Kanten**.
- Das **Entgraten** ist eine sehr verantwortungsvolle Aufgabe und gewährleistet die hohe Qualität und Lebensdauer unserer Produkte.
- Die Entgratungsverfahren sind vollwertige, **festgeschriebene Verfahren**, die genauestens nach den dazugehörigen Vorschriften einzuhalten sind!

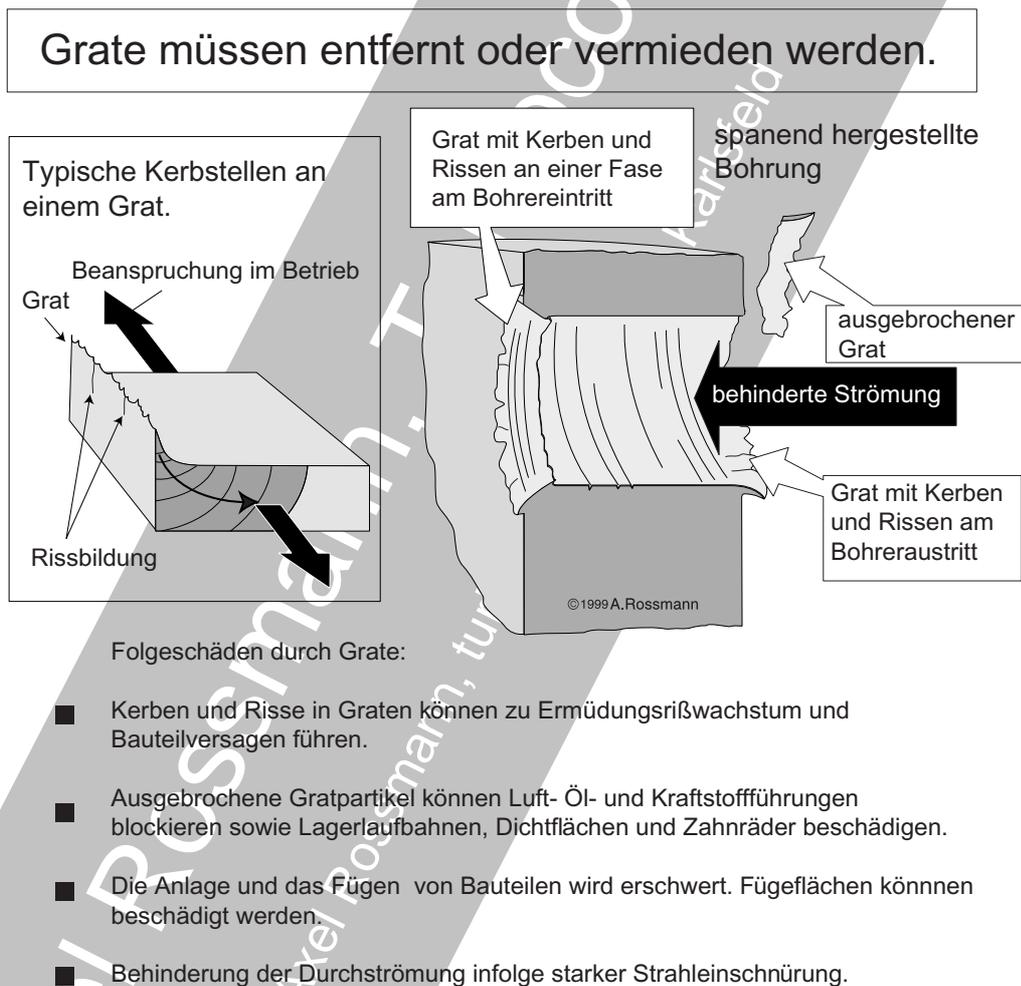


Bild 14

*Grate können an allen Kanten eines Bauteils bei unterschiedlichen Fertigungsschritten auftreten. Sie müssen als **Schwachstelle** für die Festigkeit und damit die Lebensdauer des Bauteils angesehen werden. Eine wichtige Arbeit ist das richtige, vorschriftsmäßige **Entfernen der Grate**.*

15. Was haben Waterloo und Sicherheitsgurte gemeinsam? (Auswirkungen nicht abgesicherter Änderungen)

Wenn spektakuläre Unfälle auftreten, findet sich nachher immer jemand, der glaubt zu wissen, wie man sich richtig verhalten hätte. So werden bei Flugzeugunglücken manchmal auch Stimmen laut, die vermuten, dass der Unfall vermieden worden wäre, wenn der Pilot die Vorschriften **nicht** beachtet hätte.

Wie ich das Problem sehe:

Es wird berichtet, dass die Schlacht von Waterloo verloren wurde, weil sich ein General strikt an die Anweisungen Napoleons hielt und diesem deshalb nicht zu Hilfe eilte. Die Älteren von uns erinnern sich noch an die unendlichen Diskussionen über den Sinn von Sicherheitsgurten. Zweifler behaupteten, dass sich diese möglicherweise bei einem Autounfall nachteilig auswirken könnten.

Das Problem in beiden Fällen: Es ist dem Einzelnen oft nicht möglich die gesamten Hintergründe einer Vorschrift zu kennen. Dies könnte dazu führen, dass man scheinbar unnötige Schritte - beispielsweise in einem speziellen Fertigungsablauf - nicht durchführt, eigenmächtig abändert oder ihnen nicht die notwendige Aufmerksamkeit schenkt. Ein solches Verhalten birgt die Gefahr einer gutgemeinten Verschlechterung.

Unser Qualitätskonzept beruht auf **stabilen Prozessen**, die durch langjährige Erfahrung und Erprobungen entwickelt wurden. Deshalb dürfen sie nicht einfach auf „Zuruf“ geändert werden. Vorschriften existieren, weil sich die darin vorgeschriebene Vorgehensweise nur selten negativ auswirkt, in der Regel Risiken minimiert und Qualität garantiert. Ist dies mit der Forderung nach permanenter Verbesserung zu vereinbaren?

Es wäre falsch aus dem oben Gesagten zu schließen, dass **Überarbeitungsvorschläge** ein erhöhtes Risiko bedeuten. Denn bevor neue Erkenntnisse in das Vorschriftensystem eingearbeitet werden, prüfen die zuständigen Fachleute jeden Vorschlag gründlich auf seine Tauglichkeit. So wird gewährleistet, dass es sich bei der Neueinführung wirklich um eine **Verbesserung** handelt.

Das bedeutet für unser Handeln:

- **Keine selbstständigen „Verbesserungen“**, kein Abweichen von Vorschriften.
- Wenn Sie **Verbesserungsvorschläge** haben, wenden Sie sich an die Profis, d.h. nutzen Sie das Verbesserungs-**Vorschlagwesen!**
- Es ist wichtig, den Sinn der Abläufe zu verstehen, deshalb im Zweifelsfall die zuständigen **Fachleute fragen**.
- Erkannte oder vermutete Verbesserungen sind als Verbesserungsvorschläge einbringen, aber erst nach der offiziellen Einführung anwenden.

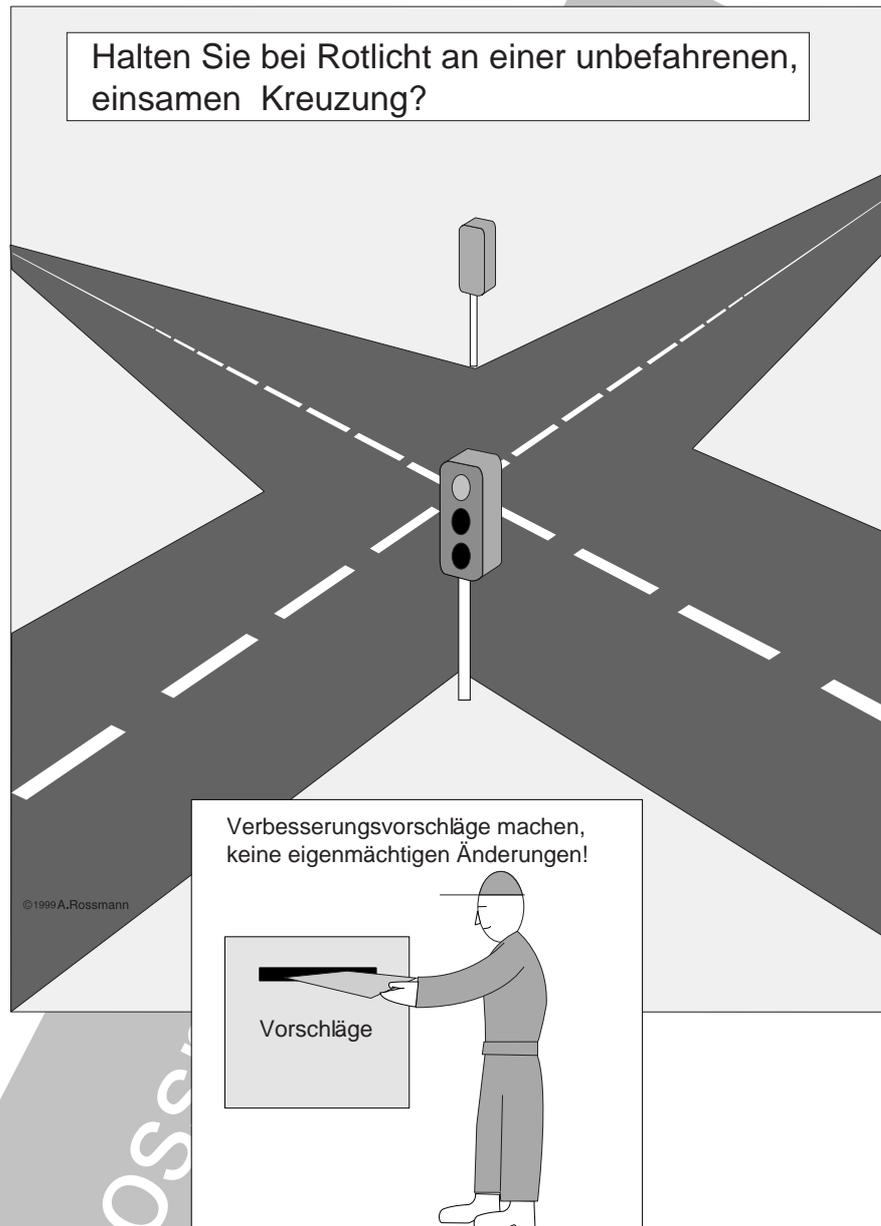


Bild 15

In einem echten Techniker, gleich ob Werker oder Ingenieur, steckt der Drang zur Perfektion und damit zur **Verbesserung**. Dabei wird häufig vorausgesetzt, dass diejenigen, welche das Bauteil oder das Fertigungsverfahren vorher entwickelt haben durchaus verbesserungsbedürftige Arbeit geleistet haben. Der natürliche Verbesserungsdrang muss jedoch dann halt machen, wenn Sicherheitsfragen im Spiel sind. Der richtige Weg ist der offizielle Verbesserungsvorschlag, da so die Problematik von allen Seiten ausreichend beleuchtet wird. Besondere Vorsicht ist geboten, wenn Bauteile oder Verfahren scheinbar unnötige Forderungen

gen oder Besonderheiten aufweisen. In einem solchen Fall ist davon auszugehen, dass diese Auffälligkeiten eine wichtige Funktion außerhalb unseres Erfahrungshorizonts erfüllen und auf keinen Fall eigenmächtig dem Rotstift oder engen Terminvorgaben zum Opfer fallen dürfen. Eine solche Situation besteht besonders bei **Lizenzprodukten**, die nicht im eigenen Hause entwickelt wurden. Wir können nicht davon ausgehen, dass der Lizenzgeber uns den Grund für die Besonderheit und damit wichtiges Know-How preisgibt.

So bleibt der Grundsatz: „**Keine Änderungen ohne ausdrückliche Zustimmung des Entwicklers.**“

16. Wenn der Vogel schlägt... (Betriebsbelastungen und Bauteileigenschaften)

Ein Vogelschlag hat für den Triebwerksbauer in erster Linie nichts mit der Sangeskunst eines Vogels zu tun, sondern mit den zum Teil verheerenden Auswirkungen, wenn dieses Tier in ein Triebwerk gerät. In der Presse wird auf die hohe Zahl von Triebwerksschäden durch eintretende Vögel hingewiesen. Trotzdem gelingt es der modernen Technik den hohen Sicherheitsstandard für die Passagiere zu gewährleisten, auch wenn merkliche Reparaturkosten anfallen können.

Wie ich das Problem sehe:

Das Problem, dass die Vögel vor den Flugzeugen da waren und sich noch nicht voll auf deren Vorfahrt eingestellt haben, beschäftigt die Triebwerkskonstrukteure seit es Turbotriebwerke gibt. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit eines Vogelschlags in Flughöhen von wenigen hundert Metern besonders groß. Dies betrifft üblicherweise den Start- und Landeanflug. Bei militärischen Flugzeugen erhöht der Trend zu Niedrigflügen bei hohen Geschwindigkeiten das Risiko weiter.

Die Aufprallgeschwindigkeit des Vogels auf nicht rotierende Teile entspricht etwa der Geschwindigkeit des Flugzeugs. Wird jedoch die Rotorbeschaufelung getroffen, so kommt zusätzlich die Rotationsbewegung mit ins Spiel. Dies führt zu Aufprallgeschwindigkeiten bis in die Nähe der Schallgeschwindigkeit. Bei solchen Aufschlägen verhält sich der Vogel wie ein Geschoss, das die Beschaufelung bis zum Bruch überlasten kann.

Aus diesem Grund gibt es genaue Abnahmevorschriften, die einen Nachweis des zulässigen Vogelschlagverhaltens fordern. Ohne diese **Vorschriften peinlich genau einzuhalten**, was in **Versuchen zu demonstrieren** ist, kann ein Verdichter in einem Serientriebwerk nicht verkauft werden.

Wer also auf dem Weltmarkt Verdichtertechnologie anbieten will, muss sich eingehend mit diesem Problem beschäftigen. So gelang es, moderne Triebwerke zum "Vogelschlag-Musterknaben" zu machen. Dazu waren umfangreiche, äußerst aufwendige Versuche und Berechnungen notwendig, die uns heute in die Lage versetzen, bereits in der Auslegungsphase Risiken zu vermeiden.

Man kann daraus auch den Schluss ziehen, wie wichtig es ist, **im Rahmen militärischer Entwicklungen gezielt möglichst viel zu lernen**, um dies für zukünftige Produkte zu nutzen. **Je höher die „Latte“ liegt, die wir meistern, um so wertvoller ist der Erfolg.**

Das bedeutet für unser Handeln:

- Wir dürfen davon ausgehen, dass Besonderheiten an Bauteilen, die uns auf den ersten Blick unverständlich erscheinen, eine wichtige Funktion im **Betriebsverhalten** haben.
- Falls eine Änderung an den Bauteilen uns „das Leben erleichtern“ würde, etwa in der Fertigung oder Überholung, so muss diese in jedem Fall mit den Fachabteilungen abgesprochen werden.
- Wir haben Verständnis für teure und langfristige **Entwicklungsaktivitäten** und unterstützen diese auch, wenn es sich scheinbar um „exotische“ Probleme handelt.

Die Vogelschlaggefahr wird heute dank umfangreicher Entwicklungsarbeiten beherrscht.

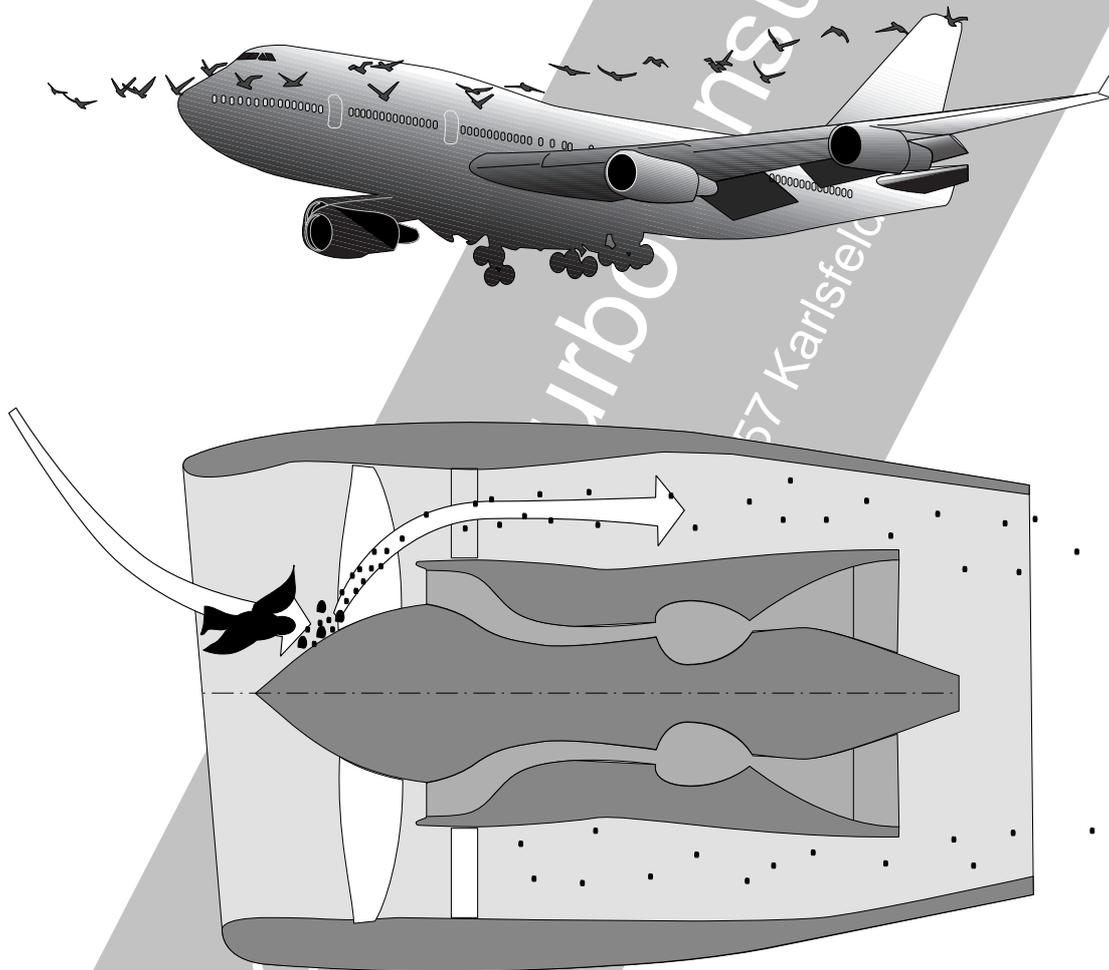


Bild 16

Forschung und Entwicklung sichern unsere Zukunft. Je größer das Entwicklungsproblem, um so größer die Lernchance. Wir helfen mit Ideen und Zuarbeit eine erfolgreiche Akquisition für neue Projekte zu betreiben. Forschungsgelder sind kein Selbstzweck, sie sind besonders kostbar, weil wir damit Gelegenheit erhalten, unsere Zukunft zu sichern. Wir werden also besonders sorgfältig und effektiv damit umgehen.

17. Die Probleme der Mitbewerber können unsere Stärke sein.

(Auswirkung von niedrig schmelzenden Metallen auf Heißeile)

Vor kurzem erhielt ich ein neues Fachbuch, in dem chinesische Wissenschaftler aus Peking von einem Turbinenschaufelbruch in einem Zivilflugzeug berichteten, den sie auf die Einwirkung von niedrig schmelzendem Eingießmetall aus dem Fertigungsprozess zurückführen.

Wie ich das Problem sehe:

Geschmolzenes Fremdmetall, das auf ein hoch belastetes Bauteil wie eine Turbinenrotorschaukel einwirkt, kann in dieses schlagartig eindringen („einschießen“). Voraussetzung dafür ist, dass die schützende Oxidschicht an der Oberfläche in kleinen Bereichen (z.B. an Kerben) aufplatzt, wie dies unter normalen Wärmespannungen im Betrieb geschehen kann. Das Aufplatzen ist unvermeidlich und kein Problem, wenn sich sofort wieder eine neue Schutzschicht bildet. Wenn aber geschmolzenes Metall einwirken kann, wird es gefährlich. Es kann, wie in dem zitierten Beispiel, zum Sprödbruch der Schaufel kommen. Diesen Vorgang nennt der Fachmann **Lötrissigkeit**.

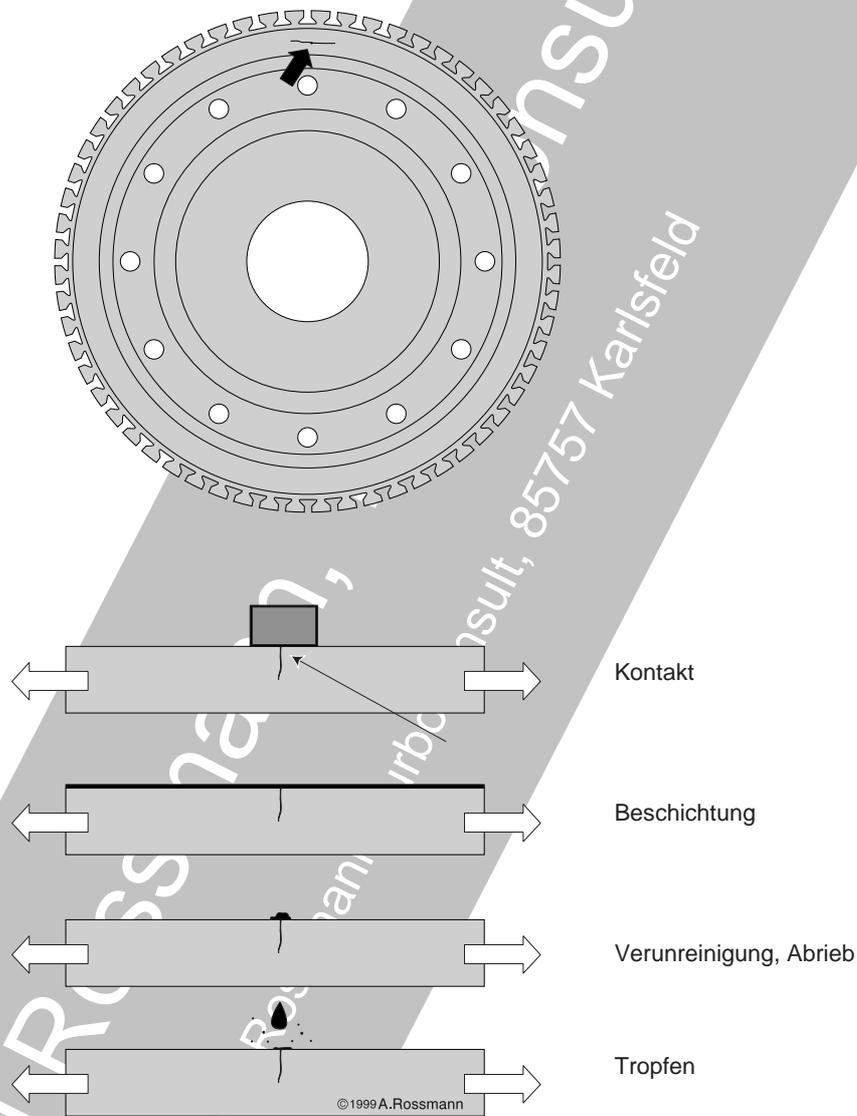
Die Technologie der Einspannung von Schaufeln durch Eingießen in eine **niedrig schmelzende Legierung** wird, wie wir sehen, weltweit angewandt. Diese Technik nutzt man, um auf einfache Weise komplex geformte Bauteile, bei denen man nicht weiß, wie man sie „packen“ soll, doch noch für die Bearbeitung „in den Griff“ zu bekommen. Es ist also kein entscheidender Vorteil unserer Produktionstechnik gegenüber potentiellen Mitbewerbern auf dem Weltmarkt, wenn wir lediglich dieses Verfahren anwenden. Unsere Chance ist das *Wie* und die elegante Vermeidung möglicher Probleme des Verfahrens.

Das bedeutet für unser Verhalten:

Gefährlich wird es immer, wenn niedrig schmelzende Metallreste oder **Metallabrieb** in Kontakt mit einem Bauteil kommen. Dies kann im Fertigungsprozess oder im Betrieb geschehen. Dabei muss es sich nicht nur um Eingießmetall handeln. Jedes andere Fremdmetall, wie z.B. Silber, Kupfer, Zink und Aluminium, ist ebenfalls gefährlich (abhängig vom Grundwerkstoff, mit dem es in Kontakt kommt) und muss vermieden werden.

- Bei der Verwendung niedrig schmelzender Metalle in der Fertigung (z.B. **Vorrichtungen und Hilfsstoffe**) und Montage (z.B. **Montagewerkzeuge**) ist besondere Aufmerksamkeit geboten.
- Die Konstruktion ist sich dieses Schadensmechanismus bewusst und kombiniert keine gefährlichen Werkstoffe.
- Die Erkenntnisse über die **schädliche Wirkung von Fremdmetallen** sind in der Planung unserer Fertigungsabläufe zu berücksichtigen.
- Die Anwendung sicherer und praktikabler Prüfverfahren ist zu gewährleisten.

Lötrissigkeit (Liquid metal embrittlement = LME) ist eine konkrete Gefahr.



verschiedene Ursachen für den Kontakt mit Metallschmelzen

Bild 17

Metallschmelzen können in Bauteile aus unterschiedlichsten Metalllegierungen „einschießen“ und dort zu **spröder Rissbildung** (sog. **Lötrissigkeit**) führen. Besondere Vorsicht und Sauberkeit sind dort geboten, wo im vorgeschriebenen Fertigungsprozess mit hohen Temperaturen und Metallschmelzen gearbeitet wird. Was z.B. als Lot für die Herstellung des

einen Bauteils unbedingt notwendig ist, kann als unbeabsichtigter **Lotspritzer** auf einem anderen Bauteil zu einer unzulässigen Schwächung führen.

18. Housekeeping- die Hausfrau am Arbeitsplatz? (Bauteilschädigungen durch Fremdpartikel)

Eine wahre Begebenheit: Vor kurzem wurde ein potentieller Lieferant von Fachleuten eines Interessenten besucht. Eigentlich war fast alles prima, Sachkunde, Einrichtung und Technologie überzeugend, auch der Preis diskutabel. Trotzdem entschied man sich gegen eine Beauftragung mit der Begründung: Schlechtes „Housekeeping“.

„Housekeeping“ ist wieder einmal ein typischer und beneidenswert prägnanter Begriff unserer angelsächsischen Freunde. Er bezeichnet den Zustand eines Haushalts. Salopp gesagt: Wenn es aussieht „wie bei Hempels unterm Bett“, handelt es sich um schlechtes Housekeeping. Es herrscht Unordnung, in den Ecken hängen Spinnenweben und statt auf den Besen verlässt man sich darauf, dass sich alles, was runterfällt, am Boden festtritt. Kurzum, es ist der äußere Eindruck, der sich spontan bei einem Besucher einstellt.

Wie ich das Problem sehe:

Viele werden denken, dass es für die Technik und Qualität unserer Teile unerheblich ist, ob z.B. auf diesen im Laufe der Fertigung ab und zu etwas Staub und Späne liegen, wenn bei der Auslieferung dann wieder alles sauber ist. Leider ist dem ganz und gar nicht so. Solche, scheinbar nur kleine Nachlässigkeiten können sogar die Sicherheit unseres Produkts beeinflussen.

Staub und Späne können sich als sogenanntes **Fremdmaterial** bei einer Wärmebehandlung in die Bauteiloberfläche fressen (Man nennt diesen Vorgang „Diffundieren“), oder gar zu Anschmelzungen führen, weil der Schmelzpunkt in diesem Bereich abfällt. In solchen „**Pünktchen**“ kann der Werkstoff „butterweich“ geworden sein oder sich spröd wie Glas verhalten. Taucht man verschmutzte Teile in galvanische Bäder, kann es zu Reaktionen und Anfrassungen kommen. Wenn dann im Betrieb an solchen Schwachstellen **ein Riss entsteht**, ist „Feuer auf dem Dach“.

Wir sehen also, dass in jedem von uns eine Hausfrau stecken sollte, auch wenn wir zu Hause das Staubsaugen anderen überlassen.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Wir achten darauf, dass **auch die Äußerlichkeiten stimmen**, z.B. keine Abfälle wie Zigarettenkippen in den Transportkisten.
- Staub oder Späne sind von Bauteilen vor einer Wärmebehandlung (auch Beschichten und Löten) oder vor Ätz- und galvanischen Prozessen vollständig zu entfernen.
- **Vorgänge, die Staub erzeugen** (z.B. Entzunderung von Wärmebehandlungsvorrichtungen oder Reinigung von Öfen), sind so durchzuführen, dass Bauteile in der Fertigung nicht verschmutzt werden können.
- **„Pünktchen“ auf Bauteiloberflächen**, die sich nicht mit dem Fingernagel entfernen lassen, sind ein Alarmzeichen und der zuständigen Qualitätssicherung zu melden.

Fremdmateriale auf Bauteiloberflächen kann in vielfältiger Weise schädigend wirken. Um dies zu vermeiden, sollte man die Ursachen für Verunreinigungen durch Fremdmateriale kennen.

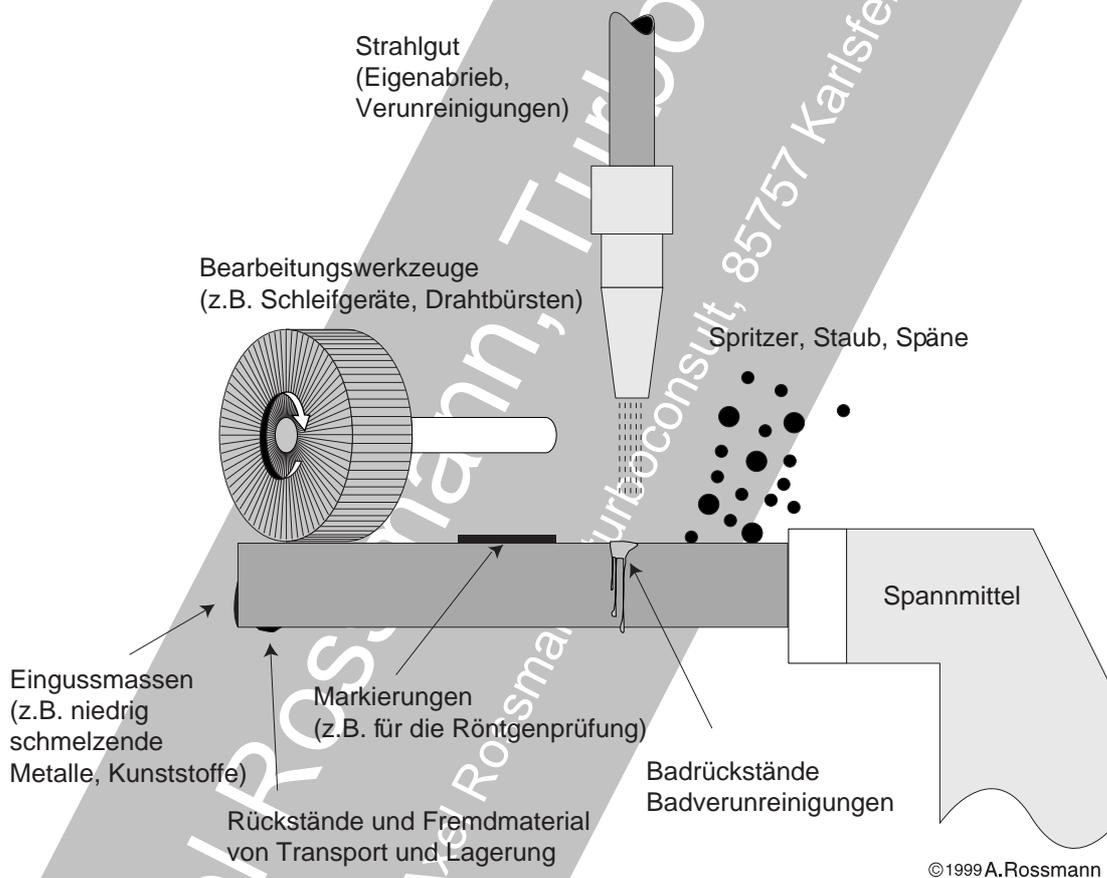


Bild 18

Auf unterschiedlichste Weise kann **Fremdmaterial** bzw. können **Verunreinigungen** auf fertige Bauteilflächen gelangen und dort zu **Schädigungen** führen. Das Bewusstsein dieser Gefahren motiviert uns, auf Sauberkeit der Bauteile und deren Umfeld zu achten.

19. Wenn es Schaufeln zu warm wird (Probleme bei der Herstellung gekühlter Heiteile und deren Auswirkungen im Betrieb)

In Statistiken kann man sehen, dass die Bauteile mit der „traditionell“ krziesten erwarteten Lebensdauer Schaufeln der Hochdruckturbine sind. Es handelt sich damit auch um Bauteile mit dem griten Ersatzteilbedarf. Sie sind deshalb für den Kunden ein wichtiges Kriterium, sich für ein bestimmtes Triebwerk und damit auch für einen Flugzeugtyp zu entscheiden.

Wie ich das Problem sehe:

Die begrenzte Lebensdauer eines Bauteils ist zwar für den Ersatzteillieferanten interessant, die Konkurrenzsituation erfordert jedoch vom Konstruktionsverantwortlichen, dem Betreiber eine möglichst lange und sichere Lebenserwartung dieser Bauteile zu gewährleisten. Diese heute schon erstaunlich langen garantierten Lebensdauern von tausenden Betriebsstunden sind nur bei bestem Qualitätsniveau einzuhalten.

Lassen Sie mich dies kurz erklären:

Gekühlte Turbinenschaufeln sind die höchstbelasteten Bauteile in einem Triebwerk. Sie leben von ihrer Kühlung. Die Heißgase, in denen die Schaufel „arbeitet“, haben oft Temperaturen, die über dem Schmelzpunkt des Schaufelwerkstoffs liegen. Wenn also die Kühlung etwas schlechter ist, kann die Schaufel „schlapp“ machen. Der Fachmann weiß, dass eine dauernde Temperaturerhöhung von nur 15 °C das Leben der Schaufel halbiert. Jede Beeinträchtigung der Kühlung ist also unbedingt zu vermeiden.

Zur gefährlichen Verschlechterung der Kühlung gehört eine, wenn auch nur teilweise **Verstopfung** der Kühlluftkanäle und der Entstaubungsbohrungen durch **Kernrckstnde**, **Strahlgut**, **Beschichtungspulver** und **Schmelzperlen**. Aber auch die Verwendung von nicht ausreichend abgesicherten Fertigungsverfahren bei der Herstellung der Kühlluftbohrungen kann sehr gefährlich sein. Die Form oder Rauigkeit der Wandungen von Bohrungen kann so beeinflusst werden, dass der Kühlluftstrom abnimmt und die Schaufel heißer wird.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Probleme, welche die Lebensdauer unserer Bauteile betreffen, wollen wir im eigenen Interesse und dem unserer Kunden mit dem gleichen Engagement vermeiden, als wenn es um die Halbierung der Lebensdauer des Motors unseres Autos ginge.
- **Jede Beobachtung, die auf eine Verstopfung des Khlluftsystems hinweist**, ist der zuständigen Qualittsstelle mitzuteilen. Hierzu gehört das ungewöhnliche „Sabbern“ oder Rieseln von irgendwelchen Medien aus Kühlluftbohrungen.
- Bei der Einführung von Verfahren, bei denen eine **Verstopfungsgefahr** bestehen könnte, sollte eine Strategie zur Vermeidung dieser Gefahr vorliegen.

- Treten bei der Röntgenprüfung „verdächtige Schatten“ auf, ist deren Ursache zu klären.
- Kein Allheilmittel, aber von großer Wichtigkeit sind **Kühlluftdurchsatzmessungen** der Qualitätskontrolle. Ihnen gilt besondere Aufmerksamkeit.



Bild 19

Heißeile können bereits bei relativ geringem Betriebstemperaturanstieg erheblich an Lebensdauer einbüßen. Die Behinderung des

Kühlluftflusses ist bei Heißeilen deshalb unbedingt zu vermeiden.

20. Was geht uns eine Zugkatastrophe an? (Einsatz geeigneter Prüfverfahren)

Vor kurzem wurden wir von einer Katastrophe mit vielen Toten erschüttert. Es entgleiste ein ICE-Zug. Die hohe Sicherheit von Bahnen ist bekannt. Trotzdem kam es nach dem bisherigen Kenntnisstand zum technischen Versagen eines wichtigen Bauteils, einer innovativen Radkonstruktion: Es brach der auf einer Gummizwischenlage sitzende Radreifen aus Stahl. Diese Konstruktion verbessert den Fahrkomfort, weil die Räder weniger schwingen. Damit wird auch das unangenehme, eine Gänsehaut erzeugende Kreischen gedämpft. Nach den Berichten der Medien trat der Schaden offenbar trotz Erprobung und vorhandener Prüfverfahren ein.

Wie ich das Problem sehe:

Eine Triebwerksfirma, die ebenfalls Komponenten eines Verkehrssystems mit hoher Sicherheitsrelevanz entwickelt, herstellt und betreut, muss sich fragen, ob sie aus einem solchen Ereignis lernen kann. So fragt sich mancher, ob nicht jede Entwicklung bei einem solchen System unzulässig hohe Risiken birgt. Eine solche pessimistische Einstellung würde jedoch jede innovative Entwicklung verhindern. Ich glaube, die Einführung neuer Entwicklungen mit neuen Technologien und Verfahren ist gerade für High-Tech-Firmen überlebensnotwendig. Das Risiko ist dann akzeptabel, wenn diese Entwicklungsschritte wie Auslegung, Herstellung, Erprobung und Qualitätssicherung optimal durchgeführt werden.

Die Konstruktion und Auslegung der Bauteile erfordert große Fachkenntnis und Erfahrung, um das theoretische Handwerkszeug richtig einzusetzen und systembedingte Schwachstellen zu finden. Ausreichende Erfahrung garantiert, dass alle sicherheitsrelevanten Effekte berücksichtigt werden.

Die praktische **Erprobung im Versuch** wird durch auch noch so leistungsstarke Computerprogramme nicht überflüssig. Gerade bei komplexen Systemen wie Turbinenteilen muss die Sicherheit ähnlich dem Radreifen trotz Werkstoffbesonderheiten und Betriebseinflüssen, wie Korrosion und Verschleiß, gewährleistet sein.

Dass dies möglich ist, zeigt z.B. die hohe **Sicherheit der Verdichter- und Turbinenscheiben** in Flugtriebwerken. Diese muss nicht nur bei Neuteilen gewährleistet sein, sondern auch während der gesamten Lebensdauer auf Grund der richtigen Auslegung und geeigneter Prüfverfahren bei der Überholung.

Voraussetzung für diese Sicherheit sind nicht zuletzt betriebsnahe **Tests** bis zum Versagen der Bauteile. Es ist also falsch, wenn ein Bauteilversagen im Test beklagt oder zur Katastrophe hochstilisiert wird. Meist ist das Gegenteil richtig, der Versuch war erfolgreich, da er die Schwachstelle aufgezeigt hat. Wir haben etwas gelernt und konnten gezielte Maßnahmen einleiten.

Zurück zu unserem Schadensfall. Ein ausreichend betriebsnaher Test muss also an einem Radreifen solche Anrisse von der Innenseite her erzeugen. Die richtige Einschätzung dieser Erkenntnis ist dann die Voraussetzung für den Einsatz eines sicheren Prüfverfahrens.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Die Qualität unserer Produkte wird bereits von den ersten Entwicklungsschritten beeinflusst. Von besonderer Bedeutung ist die rechtzeitige **Anpassung der Prüfverfahren**.
- Eine Voraussetzung für die **Auswahl der richtigen Prüfverfahren** ist, dass ich weiß, nach welchem Fehler ich suchen muss. Diese Aufgabe erfüllen ausreichende, fachkundige und betriebsnahe Bauteiltests, die über die **Versagensgrenzen** hinausgehen.
- Das **Ultraschallverfahren** (siehe Rahmen), welches im Zusammenhang mit den Radreifenproblemen immer wieder genannt wurde, hat sich bei unseren Rotorkomponenten als ein wichtiges und äußerst zuverlässiges Verfahren bewährt. Wichtig ist jedoch, dass unsere Prüfer hervorragende Fachleute sind und den Prüfbefund richtig bewerten.

Bei der Rissprüfung sollte man wissen, worauf man besonders achten muss.

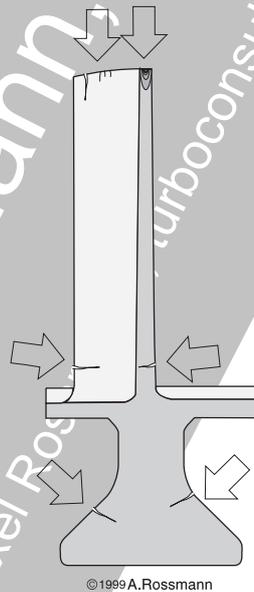


Bild 20

Ein erfolgreicher **Rissprüfer** kennt „seine Pappenhäuser“. Er weiß, wo er bei welchem Teil besonders aufmerksam hinzusehen hat. Dabei lässt er aber auch die anderen Oberflächen nicht aus dem Auge. **Erfahrung und Fachkenntnis**, auch über **Funktion und Belastung** „seiner Bauteile“, sollten jeden auszeichnen, der Fehler finden muss.

21. Fehler beim Kugelstrahlen - Triebwerke wurden im Flug abgeschaltet.

(Einfluss des Kugelstrahlens auf die Bauteilfestigkeit)

Wie die Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“ berichtet, mussten zwei Triebwerke unserer Mitbewerber im Flug abgeschaltet werden, weil „... die Starterantriebswelle wegen hoher Spannungen, die in der Fertigung eingebracht wurden, versagte.“ Nach Ansicht der FAA hat der **Kugelstrahlprozeß** gefehlt, der die Ermüdung der Welle verhindern soll.

Wie der Artikel zeigt, wird ein sog. „inflight shut down“ vom Betreiber und den Behörden sehr ernst genommen, und es liegt verständlicherweise im Interesse der Hersteller, solche Fälle zu vermeiden.

Wie ich das Problem sehe:

Der Fall ist auch für uns interessant, obwohl diese Triebwerke nicht unsere Teile enthalten. Antriebswellen der Anbaugeräte wie Starter und Pumpen müssen unter allen Betriebsbedingungen, sowohl bei schwingender Beanspruchung als auch bei kurzzeitiger hoher Last, sicher arbeiten. Dies erreicht man durch einen zähen Werkstoff mit einer hohen Schwingfestigkeit an der Oberfläche. Kugelstrahlen ist dafür das geeignete Verfahren. Es **verfestigt die Oberfläche** und vermeidet unerwünschte Zugspannungen in der Bauteiloberfläche. Das Kugelstrahlverfahren wird bei vielen Bauteilen wie Scheiben und Schaufeln angewandt und garantiert den schadensfreien Betrieb in den Triebwerken.

Eigentlich hat ein Verfahren, das solche Vorteile bietet, unsere besondere Aufmerksamkeit und Wertschätzung verdient. Trotzdem wird es nicht selten mit Reinigungsstrahlverfahren gleichgesetzt und eher als Gürtel zum Hosenträger der Festigkeitsauslegung betrachtet.

Die Schäden, welche unsere Mitbewerber betroffen haben, zeigen uns eindringlich, dass dem Kugelstrahlen die gleiche Aufmerksamkeit zusteht wie traditionellen Fertigungsverfahren, z.B. dem Zerspanen und dem Schleifen. Auch hier schützen uns Fachkenntnis und Erfahrung verbunden mit einem engagierten Qualitätsbewusstsein vor Fehlern und Abweichungen.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Der **Strahlprozess muss auf die Anwendung abgestimmt sein**. Hier ist die Erprobung und der Konstrukteur besonders gefordert.
- Die **Verfahrensparameter** werden entsprechend den Vorschriften überwacht und dokumentiert.
- Die Qualität wird durch die Anwendung geeigneter Verfahren garantiert.
- Wenn Abweichungen im Verfahren oder am Bauteil auffallen, werden die Fachabteilungen hinzugezogen.

Das Stahlkugelstrahlen als wichtiges Verfahren zur Festigkeitssteigerung.

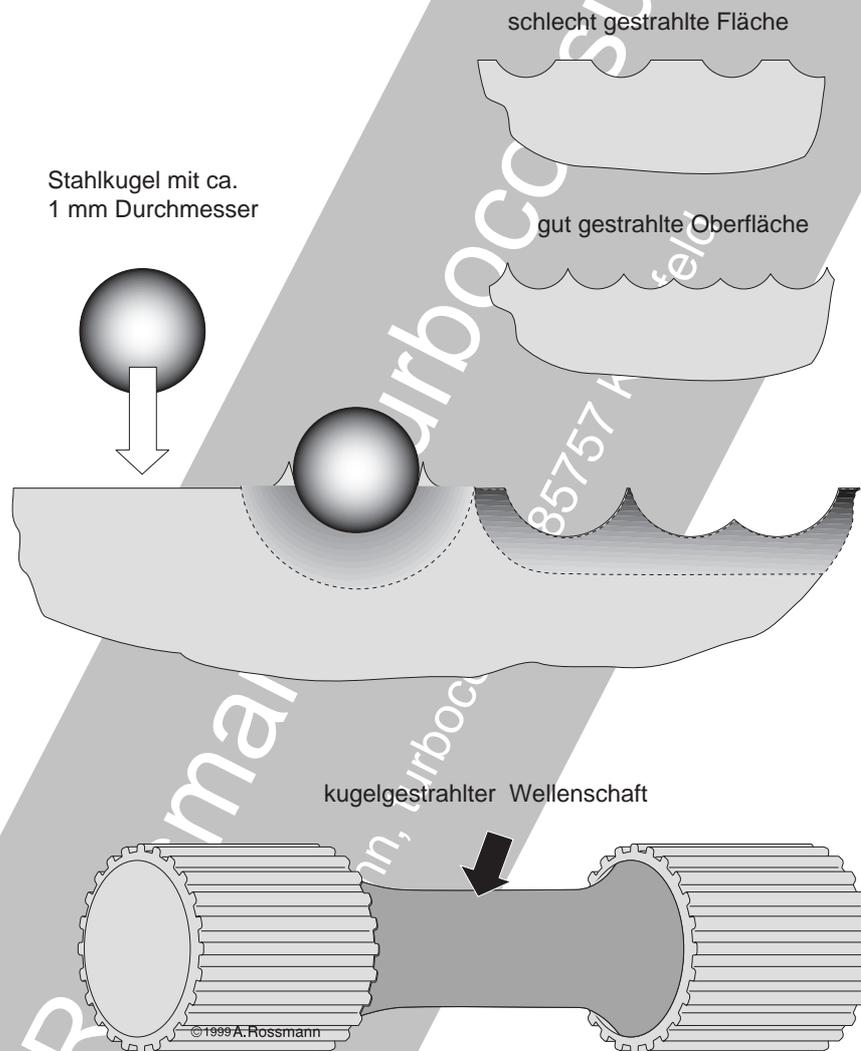


Bild 21

Das Kugelstrahlen gewährleistet ein gutes Betriebsverhalten **schwingbeanspruchter Bauteile**. Seine Wirkung ist deshalb durch genaue Einhaltung der Verfahrensvorschriften zu gewährleisten.

Bei diesem Verfahren werden viele kleine Kugeln auf die Bauteiloberfläche „geschossen“. Jede auftreffende Kugel hämmert einen kleinen Eindruck in die Oberfläche. Damit wird die Oberfläche an dieser Stelle verfestigt, und es werden eventuell vorhandene Fehler und schädliche Spannungen neutralisiert.

Wenn wir wieder zu unserem Vergleich mit dem Hammer zurückkehren, ist es leicht verständlich, dass die Größe und Form des Hammers sowie die Kraft, mit der zugeschlagen wird, für das Ergebnis von Bedeutung sind. Das heißt, dass beim Kugelstrahlen viele Dinge wie Kugelgröße und -form, der Auftreffwinkel, die Strahlzeit usw. eingehalten werden müssen.

Bauteile, die kugelgestrahlt sind, haben eine **höhere Schwingfestigkeit** und sind weniger empfindlich gegen kleine Beschädigungen der Oberfläche, die im Betrieb entstehen können.

22. Es wird spannend.

(Entstehung und Auswirkung von Eigenspannungen im Fertigungsprozess)

Wir alle leiden mehr oder weniger unter Stress, einem inneren Spannungszustand der, wenn er zu groß wird, zu lebensbedrohlichen Schädigungen führen kann. Da ist es immer noch besser, wenn es einem gegeben ist, gelegentlich zu „explodieren“ und so zum Spannungsabbau beizutragen, auch wenn dies unserer Umwelt nicht unbedingt Freude macht. Wussten sie schon, dass auch unsere Bauteile, wenn auch im übertragenen Sinn, durchaus unter einem vergleichbaren Stress leiden können?

Wie ich das Problem sehe:

Wenn unsere Bauteile unter Stress stehen und leiden, so nennt dies der Fachmann in seiner kühlen technischen Ausdrucksweise „**Eigenspannungen**“. Eigenspannungen stehen im Bauteil im Gleichgewicht. Weil das Bauteil sich deshalb nicht bewegt, sind die Spannungen somit äußerlich nicht erkennbar. Erst wenn wir auf besondere Weise von außen einwirken, z.B. durch eine Glühbehandlung oder eine spanende Bearbeitung, können sich Eigenspannungen „lösen“ bzw. abbauen. Dies zeigt sich meist durch einen Verzug.

Eigenspannungen können auf vielfältige Weise in die Bauteile geraten. Wie beim Menschen kann man von gutem Stress (z.B. sportliche oder kreative Herausforderung) oder gefährlichem Stress (z.B. Ärger, Konflikte) sprechen. Bei unseren Bauteilen sind Druckeigenspannungen, wie sie bewusst durch Kugelstrahlen eingebracht werden, von der guten Sorte. Dagegen sind hohe Zugeigenspannungen wie sog. **Schweißspannungen**, **Bearbeitungsspannungen** oder **Härtespannungen** gefährlich und müssen vermieden werden. Im Extremfall führen diese Spannungen bereits während oder kurz nach dem Entstehungsprozess zur Rissbildung. Dann spricht man von einem Schweiß-, Schleif- und Härteriss. Die Folge der Rissbildung ist ein Spannungsabbau. Wenn Zugeigenspannungen in gefährlicher Höhe im Bauteil verbleiben, können die Teile unter Umständen die vorgesehenen hohen Betriebsbelastungen nicht zusätzlich ertragen. Dann kommt es zur Rissbildung und zum Versagen im Betrieb. Wir werden also unsere Fertigungsverfahren genauestens dahin optimieren, dass möglichst wenig schlechte und möglichst viele gute (Druck-) Eigenspannungen entstehen. Unerwünschte Eigenspannungen werden z.B. bei Schweißteilen durch ein Spannungsarmglühen abgebaut, wobei wegen der Restfestigkeit beim **Glühen** nie ein spannungsloser Zustand erreichbar ist.

Obwohl Stress beim Menschen äußerlich nur zu erahnen ist, kann der Arzt durch Ermittlung des Blutdrucks und mit Hilfe seiner Fachkenntnis Rückschlüsse auf unseren Zustand ziehen. Genauso verhält es sich mit den Eigenspannungsmessungen. Wir können Spannungen nicht direkt an unseren Bauteilen sehen. Die hohe Kunst liegt auch hier in der Auswahl des aussagefähigen Messverfahrens und der praxisgeeigneten Interpretation der Ergebnisse.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Unsere Fertigungsverfahren werden auch auf günstige Eigenspannungen hin entwickelt. Eine **Veränderung von Fertigungsverfahren** (z.B. Veränderung von Zerspanungsparametern oder Temperaturänderungen beim thermischen Spritzen) oder die Umstellung auf ein anderes Fertigungsverfahren (z.B. vom Drehen auf Schleifen) ohne Einverständnis der Fachabteilungen ist unzulässig.

- Das Weglassen oder Hinzufügen von Fertigungsschritten wie einer Glühbehandlung ist auf Auswirkungen auf den **Eigenspannungszustand** hin zu überprüfen.
- Im Zweifelsfall sollte eine **Eigenspannungsmessung** durchgeführt und von einem Fachmann bewertet werden.

Eigenspannungen können zum Versagen im Betrieb führen.

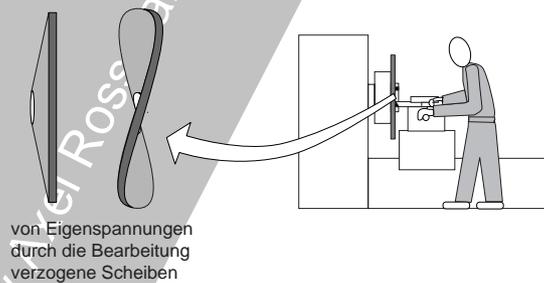
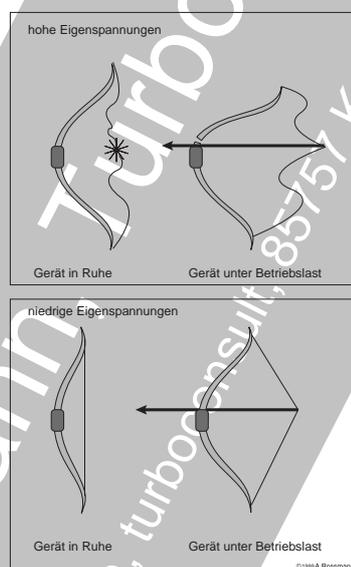


Bild 22

Ein gespannter Bogen steht unter Eigenspannungen, die Sehne hat hohe **Zugeigenspannungen**. Trotzdem befindet sich das Teil in Ruhe und bewegt sich nicht. Erst wenn die Eigenspannungen frei werden, in unserem Fall die Sehne reißt (oben links), schnappt der Bogen auf. Dies entspricht einem Bauteilverzug, wenn z.B. beim Spannungsarmglühen ein **Verzug** eintritt. Wenn der Bogen im „Betrieb“ steht, d.h. gespannt wird, kann eine zu hohe

Vorspannung zum Bruch (oben rechts) führen. Ähnliches kann bei einem Bauteil mit zu hohen Zugeigenspannungen im Betrieb passieren. Ist der Bogen richtig gespannt (links unten), besteht weder in Ruhe noch im Betrieb (unten rechts) die Gefahr eines Schadens. Die Betriebsspannungen waren in diesem Fall nicht von bereits vorhandenen, hohen Eigenspannungen überlagert.

23. „Babylon ist überall“.

(Richtige Interpretation und Umsetzung von Vorschriften, Handbuchangaben und Konstruktionsunterlagen)

Im Zeitalter der „Global Player“ wird das Problem unmissverständlicher Kommunikation besonders wichtig. Unterschiedliche Mentalitäten, Sprachen, Vorschriften, Begriffe, Maße usw. können auch leicht zu missverständlichen Beschreibungen von Fehlern und deren zulässigen Grenzen in Spezifikationen und Überholhandbüchern führen.

Wie ich das Problem sehe:

Lassen Sie mich die Problematik an Hand eines Beispiels aus der Praxis beschreiben: Die Turbinenräder eines Hubschraubertriebwerks werden bei der Überholung nach Angaben im Überholhandbuch bewertet. Darin wird lediglich von starker **Überhitzung** gesprochen, ohne dass detaillierte Angaben über typische Merkmale, an denen diese Überhitzung erkannt werden kann, gemacht werden. Liegt eine solche Überhitzung vor, dürfen auch die Räder der folgenden Stufen nicht mehr wieder verwendet werden. Diese stellen einen merklichen Anteil der Gesamtkosten des Triebwerks dar. Dem Kunden fiel mit der Zeit die hohe Ausfallrate durch überhitzte Turbinenräder auf, und er reklamierte. Laboruntersuchungen an einem typischen Turbinenrad zeigten, dass die bewerteten Merkmale keine Überhitzungsanzeichen waren, sondern durch eine relativ einfach reparierbare Erosion entstanden waren. Somit wanderten offenbar verwendbare Turbinenräder über Jahre in den Schrott.

Die potentielle Gefahr solcher **Fehlbeurteilungen** besteht häufiger als wir auf den ersten Blick glauben. Die Angaben von zulässigen Anzeigen einer Eindringprüfung und deren Grenzwerten in Vorschriften oder Zeichnungen erfordern besonderes Fachwissen, damit diese sinnvoll und zweifelsfrei in der Praxis angewendet werden können.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Bei der Übertragung von Fachbegriffen sind die Fachabteilungen hinzuzuziehen. Selbst ein versierter, technischer Übersetzer kann besondere **Fachbegriffe** nicht immer unterscheiden. Im Zweifelsfall ist z.B. auf die Erfahrung des Labors und der Kontrolle zurückzugreifen.
- Zur Erklärung und Verdeutlichung von Fehlstellen sind nach Möglichkeit **übersichtliche Skizzen** oder **aussagefähige Fotografien** zu verwenden.
- Zur Bewertung von Schadensbildern sollten leicht zugängliche **Mustertafeln** vorliegen.

Unklare Angaben oder Beschreibungen können Fehlinterpretation mit grossen Sicherheitsproblemen und Folgekosten verursachen.

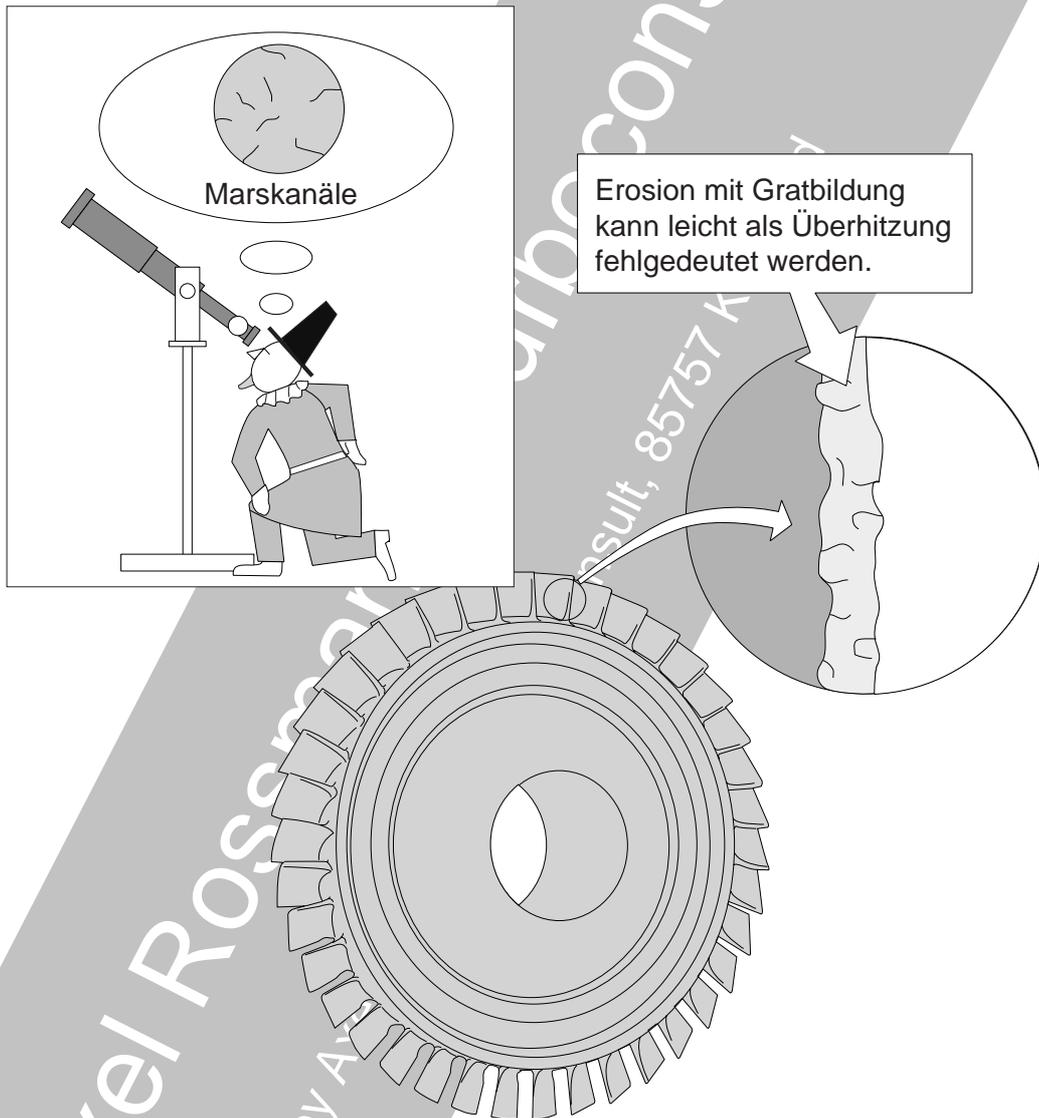


Bild 23

Die verständliche und eindeutige **Beschreibung von Fehlern und Fehlergrenzen in Spezifikationen und Handbüchern** ist eine Voraussetzung für richtige Entscheidungen bei der Beurteilung der Betriebstauglichkeit von Bauteilen.

Die Gelehrten früherer Zeiten interpretierten die Linienmuster auf dem Mars als Kanäle und zogen daraus entsprechend falsche Schlüsse. Sie erwarteten Marsmenschen. **Fehlinterpretationen** können uns also zu falschen Aktionen verleiten, die nicht zuletzt für die **Qualität unserer Bauteile unerwünschte Folgen** haben.

24. Wer kauft die Designeruhr von einem Unbekannten an der Tankstelle? (Verhinderung der Verwendung nicht zugelassener Ersatzteile)

So mancher von uns wurde schwach, wenn das vermeintliche Superschnäppchen vor ihm liegt. Da gibt es, zugegebenermaßen unter etwas undurchsichtigen Umständen, eine ungeheuer preisgünstige Designeruhr, wie sie sonst nur „die Großen dieser Welt“ tragen. Das Label teurer Sportbekleidung leuchtet uns an einem Marktstand aus der Grabbelkiste entgegen, oder im Basar raunt man uns unglaublich günstige Preise für wertvoll aussehende Lederware zu.

Bei genauerem Hinsehen zu Hause, nach erstem Gebrauch oder einer ersten Reinigung kommt dann das böse Erwachen. Aber selbst im seriösen Ersatzteilbetrieb können wir einen billigen Auspuff oder Bremsbeläge erwischen, die sich durch besonders kurze Lebensdauer auszeichnen.

Wie ich das Problem sehe:

So etwas gibt es bei unseren Triebwerken nicht, werden nun die meisten im Brustton der Überzeugung sagen. Dies stimmt leider nur bedingt. Zwar besteht hier eine ausgeklügelte Qualitätssicherung und Rückverfolgbarkeit, trotzdem liest man immer wieder, dass Kunden auf dem internationalen „Markt“ **Ersatzteile** gekauft haben und im Rahmen der Überholung in ihre Triebwerke einbauen ließen, die im Betrieb versagten. Später stellte sich dann heraus, dass die Teile nicht den Vorschriften entsprachen und offenbar gefälscht worden waren. Das heißt, die Teile stammen z.B. von nicht zugelassenen Herstellern oder wurden mit nicht zugelassenen Verfahren hergestellt bzw. repariert.

So wurde z.B. in der Zeitschrift „Flugsicherheit“ vor kurzem berichtet, dass bei der Montage eines Hubschraubertriebwerks Schraubenbrüche auffielen und von dem aufmerksamen Personal gemeldet wurden. Eine Untersuchung der betroffenen Teile ergab, dass es sich offenbar um nicht spezifikationsgerecht gefertigte Teile eines dubiosen Unterlieferanten handelte. Solche Teile werden in der Literatur mit „**bogus parts**“ bezeichnet und kommen gar nicht so selten vor. Insbesondere Zulieferteile wie Wälzlager, Schrauben und Dichtungen sind erfahrungsgemäß betroffen.

Für uns als zugelassenem Hersteller hochwertiger Neuteile und vorschriftsmäßig reparierter Teile sind solche „Piratenaktivitäten“ besonders durch den Preisdruck minderwertiger Teile ärgerlich, ganz abgesehen davon, dass die gesamte Triebwerksindustrie durch die Anhäufung von Schäden an Ansehen einbüßt.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Wir achten bei Wartungsarbeiten und Montage auf Bauteile (z.B. Schrauben, Wälzlager, Dichtungen) mit **ungewöhnlichem Aussehen und Verhalten** oder mit auffälligen Kennzeichnungen. Im Zweifelsfall benachrichtigen wir die zuständigen Kontrollstellen.
- Wir informieren unsere Kunden über das **Risiko billiger Ersatzteile** und/oder solcher mit zweifelhafter Herkunft. Zumindest sollten in Zweifelsfällen Probeteile angefordert und für eine Freigabe genauestens untersucht werden.
- Beim Wareneingang und bei Kontrollarbeiten achten wir ebenfalls auf **Besonderheiten und Abweichungen vom normalen Befund**.

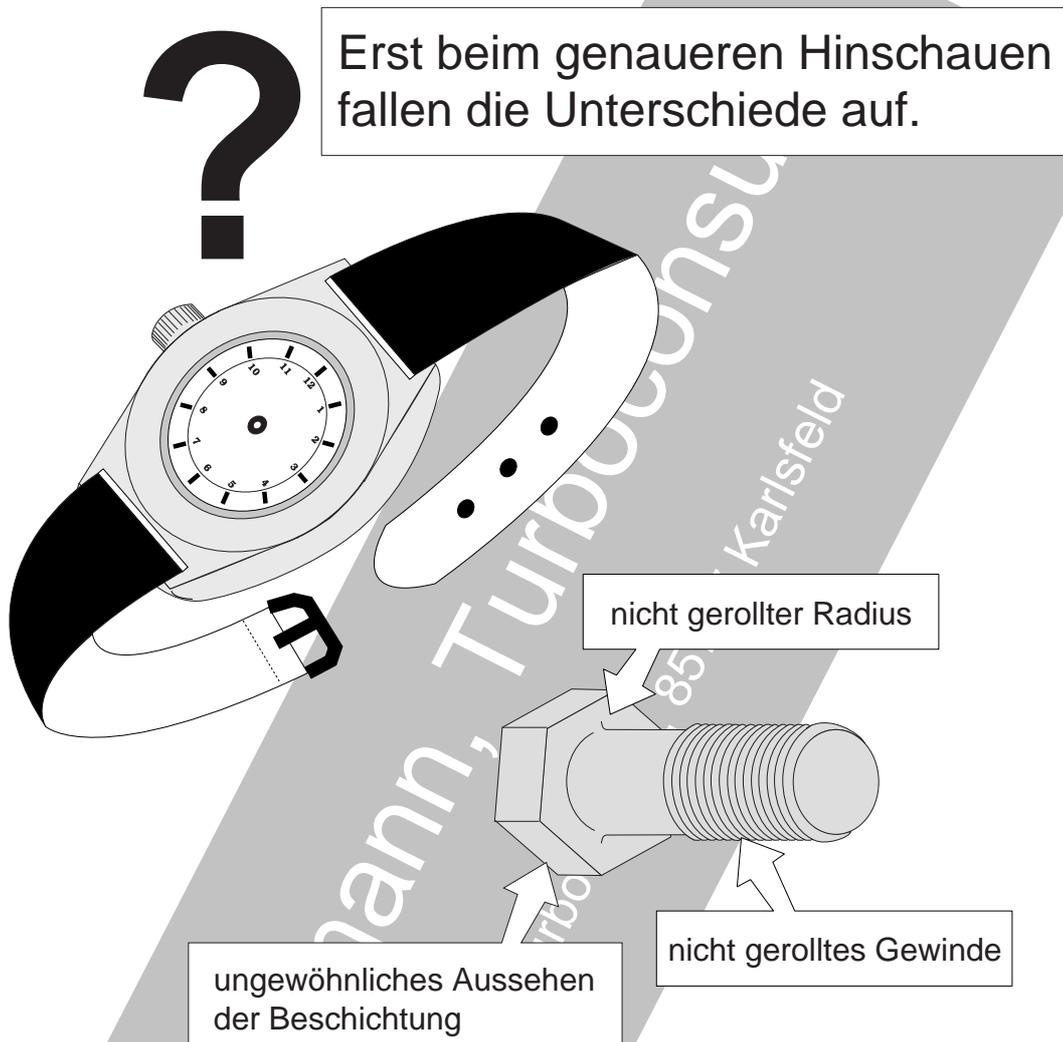


Bild 24

Nicht zugelassene Bauteile können sehr unterschiedlichen Ursprungs sein. Im schlimmsten Fall kann es sich um gefälschte Teile mit deutlich schlechteren Eigenschaften als die Originalteile handeln.

Bauteile können auch aus Unfalltriebwerken oder ausgemusterten Triebwerken stammen und als reparierte Originalteile angeboten werden.

Teile aus militärischen Beständen kommen z.B. dann auf den Markt, wenn ein Triebwerkstyp ausgemustert wird, und die auf Lager befindlichen Ersatzteile nicht mehr benötigt werden. Diese Teile sind möglicherweise für bestimmte Triebwerksvarianten und einen bestimmten Einsatz zugelassen, nicht aber für die von uns betriebenen Triebwerke.

Welche **typischen Abweichungen nicht zugelassene Bauteile** aufweisen können, soll die skizzierte Schraube zeigen. Sind die Gewinde geschnitten und nicht gerollt (Gerollte Gewinde sind durch kalte Verformung verfestigt.) ist die Festigkeit schlechter als erwartet, und die Schraube kann durch einen Schwingbruch im Gewinde versagen. Entsprechendes gilt für den Kopfradius. Beschichtungen, die sich von der Originalbeschichtung unterscheiden, können ein schlechtes Korrosionsverhalten zeigen. Die Schraube wird angefressen, und es entstehen im Betrieb Risse. Die Schichten können auch die Reibung der Mutter verändern, so dass das vorgeschriebene Anzugsmoment falsche Vorspannungen in der Schraube ergibt.

25. Wer schreibt eine Bibel ohne Fehler? (Ausfallsicherheit im Triebwerksbau)

In der Literatur liest man von immer neuen Projekten und Maßnahmen, um die hohen Sicherheits- und Qualitätsanforderungen sicherheitsrelevanter Bauteile, wie die Lenkung beim Auto oder das Radlager eines Bahnwagons, zu erreichen.

Wie ich das Problem sehe:

Ein Triebwerk besteht aus einer Vielzahl von Komponenten. Jedes muss die Sicherheit gegen Ausfall aufweisen. Damit das gesamte Triebwerk den hohen **Sicherheitsanforderungen** genügt, muss jedes einzelne Teil für sich noch viel ausfallsicherer sein. Darin sind die Forderungen nach fast unvorstellbar niedrigen zulässigen Ausfallraten bei den Einzelteilen begründet. Im Fachchinesisch der Statistiker hört man Begriffe wie **6-Sigma oder ppm**, welche die **Ausfallrate**, d.h. die Zahl der schlechten Teile zur Gesamtzahl, beschreiben.

Eine mittelfristig angestrebte Ausfallrate von 6-Sigma entspricht z.B. etwa 3 ppm, d.h. es dürfen von einer Millionen Teile nur drei Teile ausfallen. Kommen wir auf die Überschrift zurück, so bedeutet dies eine Million Worte und nur drei Schreibfehler, oder dass bei der Reinigung des Teppichs einer 150 qm Wohnung nur eine stecknadelgroße Fläche nicht erfasst worden wäre.

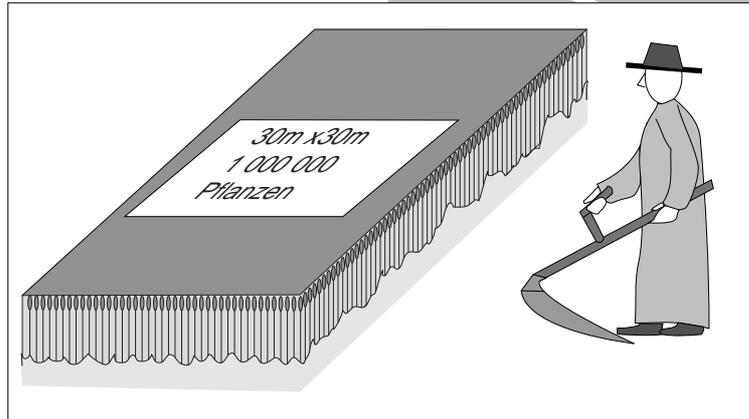
Wenn man sich vorstellt, dass die Bauteile mit feinsten Messverfahren auf jede kleine Abweichung hin überprüft werden, dann lernen wir „Schreibtischtäter“ die besonderen Anforderungen und Leistungen unserer Fertigung zu würdigen.

Solch geringe Ausfallraten sind nur mit bestens erprobten und überwachten Fertigungsprozessen, empfindlichsten Prüfverfahren und hervorragender Qualitätssicherung erreichbar. Diese Voraussetzung erfordert natürlich darüber hinaus entsprechend motivierte, gewissenhafte und fachkundige Mitarbeiter.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Wir verwenden **nur vorgeschriebene bzw. zugelassene und erprobte Fertigungsprozesse**.
- **Selbst scheinbar kleine Ausschusszahlen** sind vom Standpunkt der angestrebten Ausfallwahrscheinlichkeiten durchaus ein Anlass, die Ursache zu ermitteln und gezielte Abhilfen einzuleiten.
- Der **Motivation** der unmittelbar am Fertigungsprozess Beteiligten ist besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Bei Problemen steht die **Abhilfe im Vordergrund**.
- Die Qualität und **Gleichmäßigkeit der Rohteile** muss sich an den statistischen Anforderungen unserer Fertigteile orientieren.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit, dass mehr als ein "Korn" in einem Getreidefeld nicht aufgeht, können wir uns in der Triebwerkstechnik nicht leisten.



In einem Rotorscheibenleben ist die Ausfallwahrscheinlichkeit vergleichbar gering.

Bild 25

Die **Ausfallsicherheit** der von uns hergestellten Bauteile muss sehr hoch sein. Wenn z.B. eine Verdichterscheibe an einer kritischen Stelle einen wenige Zehntelmillimeter großen Fehler aufweist, kann hier frühzeitig ein Riss entstehen, der die Lebensdauer deutlich herabsetzt. Da es sich um verschiedene **Fehlertypen** handeln, kann die auf unterschiedliche Fertigungsschritte zurückzuführen sind (z.B. Rohteilherstellung, Zerspanung, Wärmebehandlung und Handhabung), muss jeder dieser Fehler mit noch größerer Sicherheit ausgeschlossen werden als dies für die Sicherheit des Gesamtteils gilt.

3 **ppm** bedeutet 3 Fehler pro einer Million Teile. Das hieße z.B., dass auf einem 30x30 Meter großen Getreidefeld nur ein Saatkorn nicht aufgehen darf.

Diese Sicherheiten sind nur **durch die Kombination erprobter und stabiler Fertigungsverfahren** mit geeigneten Qualitätssicherungsmaßnahmen und Prüfungen zu erreichen. Hierbei erfüllt der Facharbeiter eine wichtige Funktion.

26. Kommunikation vermeidet Fehler (Der Einfluss moderner Arbeitsmethoden auf die Produktqualität)

Trotz leistungsfähigster Computer und Berechnungsprogramme, trotz Cyberspace und Animation, trotz Simulation und 3D, spektakuläre und peinliche Fälle von Problemen an Neuentwicklungen scheinen eher zuzunehmen. Da kippen Autos um obwohl, sie im Fahrsimulator offenbar durchaus standfest waren, und das Kippen schon in der Schule im Physikunterricht ein Thema war. Da kamen Autos ins Schleudern, weil sie durch den Fahrtwind hinten zu leicht werden, als ob es nicht hochgenaue Rechenverfahren zum aerodynamischen Verhalten gäbe.

Wie ich das Problem sehe:

Gerade im „Cyber-Zeitalter“ verlieren wir leicht den Bezug zur Realität und durchschauen die Hintergründe für unsere Meinungen und Entscheidungen immer weniger. Da werden z.B. Bauteile mit fotografischer Genauigkeit „naturecht“ berechnet und dargestellt, und man könnte vergessen, dass sie weder hergestellt noch erprobt wurden. Wir werden computergläubig und sind nur noch selten in der Lage, den Rechenprozess ausreichend nachzuvollziehen und kritisch zu betrachten.

So sind uns z.B. oft Randbedingungen, die der Programmierer bei der Erstellung eines Programms das wir täglich benutzen voraussetzte, unbekannt. Dadurch können die so gewonnenen Ergebnisse für bestimmte Fälle nicht mehr gültig sein. Am **Bildschirm erscheinen Konstruktionszeichnungen in anderer Form** als früher auf dem weitaus größeren Reißbrett. Die Probleme beginnen bereits bei so einfachen Dingen, wie der richtigen Vorstellung von der Größe der Teile. Am Bildschirm ist man, wie allgemein zu beobachten, allein. Selten sieht man mehrere Kollegen am Bildschirm ein Problem kreativ besprechen oder über eine Konstruktion diskutieren. Immer hat man das Gefühl, den so fleißig am Bildschirm Tätigen zu stören. Damit ist die Chance deutlich gemindert, dass, wie früher am Reißbrett, ein vorbeigehender Kollege oder gar ein fachkundiger Chef klärende Fragen stellt oder Vorschläge macht. Auf diese Weise wird die Chance, das **Know-How erfahrener Kollegen** zu übertragen, minimiert. Solche „Sicherungen“ sind also überbrückt, und die Fehlergefahr steigt. Natürlich gilt das Gesagte nicht nur für die „Kopfgesteuerten“. Gerade auf die Erfahrung der Praktiker, insbesondere der Werker, sind wir heute angewiesen, die für die Umsetzung der „Software“ in die „Hardware“ sorgen. Sie sind die letzte „Sicherung“ um das „Kippen“ zu vermeiden.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Suchen Sie gezielt die **Fachdiskussion mit den Kollegen**. Dies kann z.B. durch das Aufhängen interessanter Ausdrücke aktueller Arbeiten wie einer Zeichnung oder durch das gut zugängliche Auflegen eines Bauteils unterstützt werden.
- **Sprechen Sie bewusst Probleme an** und stehen Sie den Diskussionsbeiträgen positiv gegenüber. Seien sie sich bewusst, dass die kreative Fachdiskussion eine Chance, ist Probleme zu vermeiden und sich selbst zu verbessern.

- Wenn wir Bedenken haben, darf dies natürlich **nicht zu einer eigenmächtigen, spontanen Änderung** führen. In den meisten Fällen werden wir bei einer Überprüfung feststellen, dass der Irrtum auf unserer Seite lag. Dies sollte uns aber nicht von einer Rückfrage abhalten.
- Wir sollten im Kopf abschätzen, ob das was in der Zeichnung oder der Vorschrift steht, sinnvoll oder überhaupt möglich ist. Was uns „komisch“ vorkommt, sollten wir ernst nehmen. Falls wir Bedenken haben, sollten wir die zuständigen Fachabteilungen um eine Erklärung bitten.
- Nicht plausible oder extrem **schwer einhaltbare Fertigungsparameter** sind auf eine richtige **Übersetzung der Vorschrift** hin zu überprüfen. Hierzu gehören dimensionsabhängige Größen wie Schnittgeschwindigkeit und Vorschub.



Bild 26

Bei der **Arbeit am Bildschirm** und an weitgehend automatisierten Fertigungsprozessen besteht die Gefahr eines gewissen **Realitätsverlustes** und der „Vereinsamung“. Deshalb ist die **fachliche Kommunikation** zu suchen, um der alten Volksweisheit Genüge zu tun: „Vier Augen sehen mehr als zwei.“

27. „Das Maß aller Dinge“

(Die Globalisierung erfordert eine höhere Aufmerksamkeit für die Maßsysteme)

Die Bedeutung dieses Satzes wird uns nicht nur beim missglückten Einparken oder durch einen spektakulären Fehlschlag der Raumfahrt verständlich. Eine Sonde schaffte es nach großem Kosten- und Zeitaufwand bis zum Mars. Sie sollte die Planetenoberfläche untersuchen. Doch nachdem die Wissenschaftler das Landemanöver eingeleitet hatten, blieb die Sonde stumm. Die folgenden Untersuchungen ließen den Schluss zu, dass die Sonde mit hoher Geschwindigkeit auf die Marsoberfläche aufgeschlagen war. Die Ursache war ein Versehen. Man hatte bei der Programmierung der Computer Meter und Fuß vertauscht. Weil drei Fuß aber nur einem Meter entsprechen, glaubte die Sonde, noch genügend Bremsweg zu haben als tatsächlich vorhanden war.

Wie ich das Problem sehe:

Im Zeitalter der Globalisierung werden wir mit noch mehr Partnern zusammenarbeiten, die Ihre eigene Kultur einbringen, und dazu gehören gerade auch die Maßsysteme. Das metrische System scheint sich durchzusetzen und ist bei einigen internationalen Entwicklungsprojekten eingeführt. Dem Mensch gelingt es jedoch immer wieder trickreich eine „eigene Note“ einzubringen. Da ist z.B. ein **Gewinde** metrisch, beim genauen Hinsehen entspricht es aber doch nicht der gewohnten metrischen Norm. Triebwerke erreichen ein „biblisches“ Alter. Die vielen alten Typen und Bauteile mit „historischen“ Maßangaben verschwinden auch nicht einfach vom Erdboden und müssen in der Produktion neben neuen Teilen mit einem anderen Maßsystem hergestellt werden.

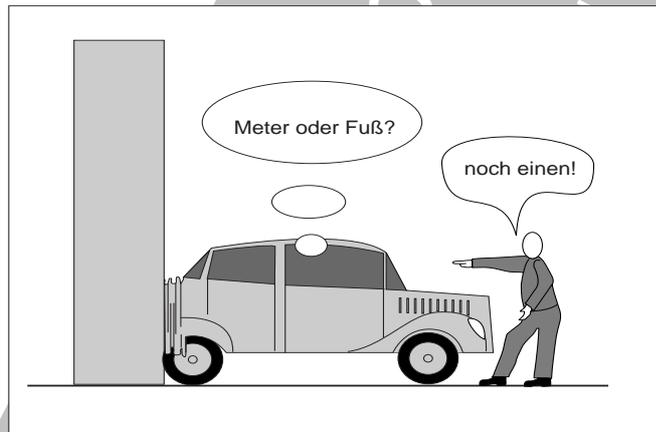
Ein Beispiel sind **Strahlmittel**. Sie werden durch die sog. „**Kornverteilung**“ gekennzeichnet, die aussagt wie viele Teilchen bestimmter Größe vorhanden sind. Es ist möglich, dass in unterschiedlichen Maßsystemen keine identische Kornverteilung am heimischen Markt beziehbar ist. Da die Kornverteilung jedoch beim Reinigen oder Kugelstrahlen das Ergebnis beeinflusst, muss gegebenenfalls ein Nachweis für ein verfügbares Strahlmittel vor der Anwendung erbracht werden.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Kommen Ihnen Dinge in Ihrer täglichen Arbeit seltsam vor, gehen sie nicht nach dem Motto: „Das wird schon so richtig sein“, darüber hinweg. Fragen Sie bei den zuständigen Fachabteilungen nach. Es gilt der Merksatz: „Es gibt keine dumme Frage, nur eine dumme Antwort.“
- Bei der **Umschlüsselung von Zeichnungen, Vorschriften und Handbüchern** ist auf die jeweils verwendeten Maßsysteme zu achten. Temperaturen, Längenmasse, Gewinde, Schlüsselweiten, Pulverkorngrößen, Gewichte, Anzugsmomente, Volumenangaben usw. sind trotz oder gerade wegen der Globalisierung von verwirrender Vielfalt.
- Besonders schwergängige Gewinde an Schrauben und Bolzen, „ausgeschlagene“ Schraubenschlüssel, Bauteile mit seltsam großem Spiel sollten unser Misstrauen wecken. Vielleicht versuchen wir gerade etwas zusammenzufügen, was nicht zusammen gehört.

- Vergewissern Sie sich im Zweifelsfall bei Spezifikationen und Maßangaben an Hand der **Originalunterlagen** (z.B. Zeichnungen vom Lizenzgeber und nicht in „umgeschlüsselten“ Zeichnungen).
- Sind bei **Hilfsstoffen** die von Vorschriften geforderten **Originalprodukte nicht verfügbar**, ist die Abweichung der vorhandenen Stoffe vor deren Einsatz genau zu prüfen. Gegebenenfalls kann ein versuchstechnischer Nachweis vor dem Einsatz notwendig werden.

Unterschiedliche Maßsysteme als Fehlerquelle.



die Werkerselbstkontrolle als letzte Sicherheit

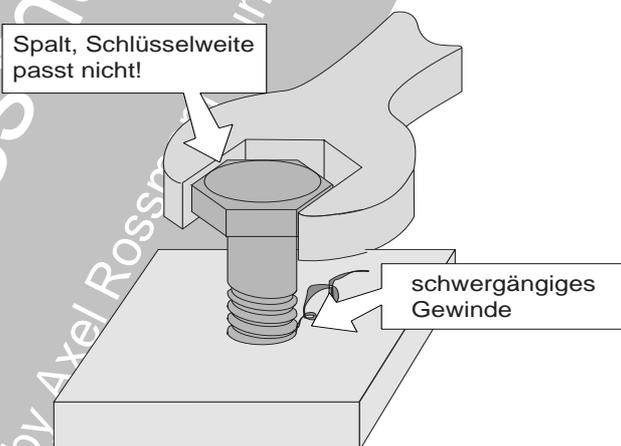


Bild 27

Stimmen die Gewinde überein?

Aus unserem privaten Bereich wissen wir, wie **Misverständnisse** den eigenen Geldbeutel strapazieren oder gar unsere Sicherheit gefährden können. Wer auf Reisen ist, kennt das Problem der unterschiedlichen Stromnetze. Schnell zeigt sich, dass der mitgebrachte Rasierapparat nicht benutzt werden kann oder gar zerstört wird.

Bei nicht passenden Schraubengewinden besteht die Gefahr, dass die **Schraube** entweder zu locker sitzt und ausreißt, dass sich das Gewinde im Betrieb herausdreht oder, dass es beim gewaltsamen Eindrehen zerstört wird. Nicht exakt passende Schlüsselweiten können neben ungewöhnlichen Anzugsmomenten ein Indiz für einen solchen **Maßfehler** sein.

28. „Sand im Getriebe“ (Vermeidung von Fremdkörpern im Ölkreislauf)

Immer wieder kann man in der Fachpresse lesen, dass an Triebwerken Schäden an Komponenten des Ölsystems auftreten, die auf harte Fremdpartikel zurückzuführen sind. Hierzu gehören besonders Schäden an Lagern. Das Versagen eines Lager kann schnell eine bedrohliche Situation entstehen lassen.

Wie ich das Problem sehe:

Zuerst wollen wir uns einmal fragen, welche Fremdkörper das sind und wo sie herkommen. Weil die feinen Ölfilter solche Fremdkörper üblicherweise aus dem Ölstrom herausholen bevor das Öl wieder auf die Lager und Zahnräder gespritzt wird, ist es sehr unwahrscheinlich, dass Verunreinigungen beim Ölwechsel eingebracht worden sind. Die Erfahrung zeigt, dass es je nach Herkunft zwei Hauptgruppen von Verunreinigungen gibt.

Verunreinigungen, die auf die Behandlung der Teile bei Herstellung und Reparatur zurückzuführen sind. Hierbei handelt es sich meist um **Strahlgut** aus **abrasiven Reinigungsvorgängen (Oxidstrahlen)** oder vom **Verfestigungsstrahlen (Glasperlenstrahlen, Kugelstrahlen)**. Bekannt geworden sind auch Gusskernrückstände, die sich später im Betrieb lösen.

Verunreinigungen durch abplatzende Spritzschichten, die als Panzerung der Labyrinthspitzen von Lagerkammerdichtungen dienen, sowie Abrieb von Einlaufschichten in solchen Dichtungen. Im Bereich des Ölsystems eines Triebwerks gilt das **Gebot höchster Sauberkeit**. Hier sollte also die Sauberkeit ähnliche Beachtung finden wie bei einer Operation im Bereich des Blutkreislaufs eines Menschen. Wir sehen somit, wie wichtig bei Spritzschichten eine gute Haftfestigkeit ist.

Geraten diese Partikel auf die **Lagerlaufbahnen** und/oder zwischen **Getriebezahnräder**, so entstehen Eindrücke, die als Kerben wirken. Die Folge ist eine Schwingermüdung durch das Überrollen bzw. den Zahnkontakt mit **Materialausbrüchen** (sog. Ermüdungspittings), die selbst wieder als Fremdkörper wirken und den Schaden beschleunigen.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Bei **Prüf- und Abnahmeläufen** ist während der **Filterkontrolle** auf ungewöhnliche Mengen von **Fremdpartikeln** zu achten. Gegebenenfalls ist ein weiterer Lauf durchzuführen, und der Filter erneut zu kontrollieren. Das Ergebnis ist den zuständigen Fachabteilungen vorzustellen. Der Befund sollte in jedem Fall in der zum Triebwerk gehörenden Dokumentation festzuhalten werden, um eventuell später wieder darauf zurückgreifen zu können.
- Bei zugelieferten **Gussteilen** (z.B. Getriebegehäuse) ist genau darauf zu achten, ob bereits bei der Anlieferung oder später in der Fertigung Partikel herausrieseln, die sich z.B. durch Vibrationen oder bei einem Reinigungsvorgang gelöst haben. In diesem Fall sind die Teile dem zuständigen Kontrolleur vorzustellen. Im Zweifelsfall kann eine **Röntgenprüfung** ins Auge gefasst werden, weil erfahrungsgemäß gute Chancen bestehen, größere Ansammlungen von Fremdmaterial (z.B. Gusskernreste) durch Röntgen zu finden.
- Keine Zugeständnisse dürfen bei der **Säuberung der Bauteile nach Strahlverfahren** gemacht werden.
- Bei Lager- oder Zahnradschäden sind die Laufflächen (soweit noch möglich) auf schadensursächliche Fremdpartikel zu überprüfen.

Verunreinigungen im Öl müssen vermieden werden

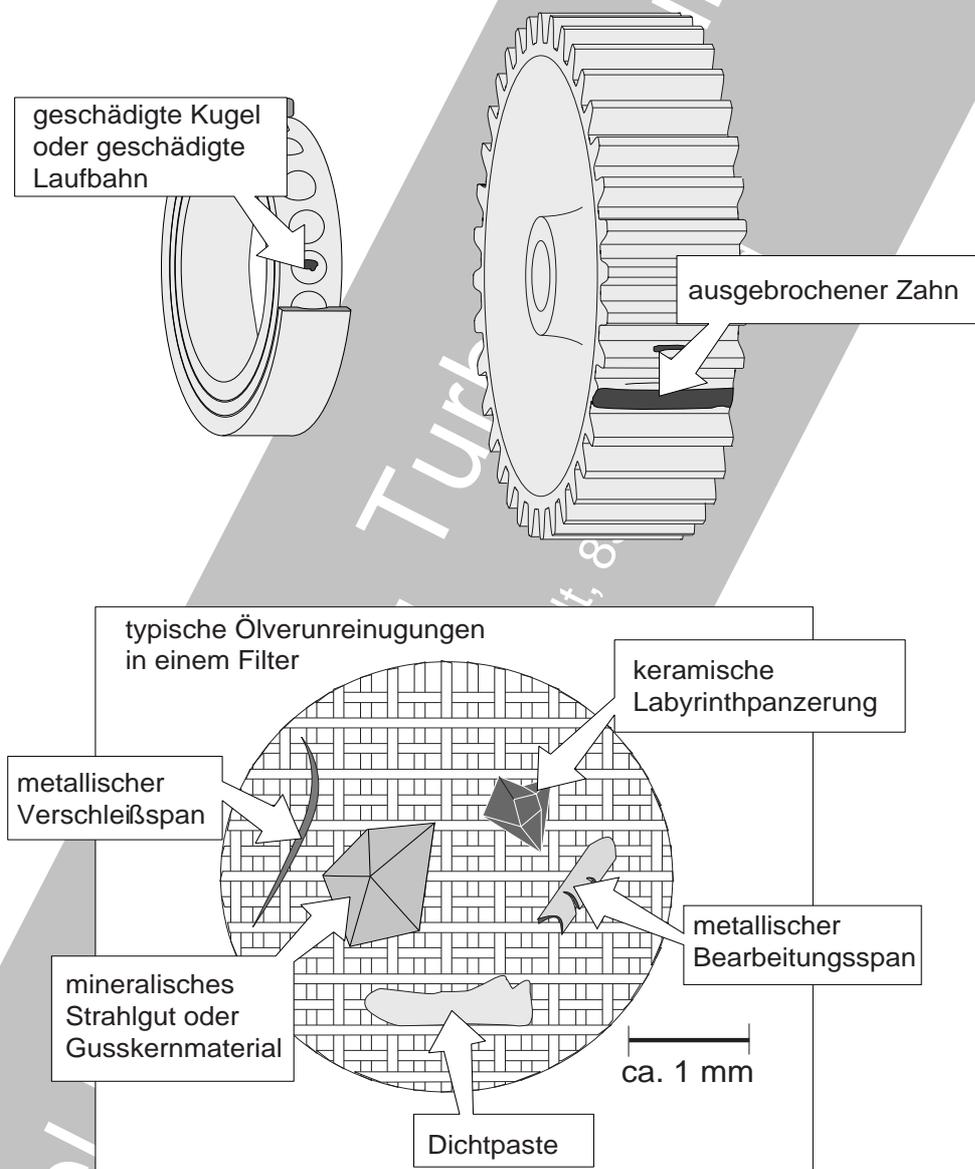


Bild 28

Der Ölkreislauf eines Triebwerks kann unterschiedliche Fremdmaterialien mitführen, die sich, wenn wir Glück haben, im Filter absetzen bevor sie empfindliche Bauteile wie Wälzlager oder Zahnräder schädigen. Untersucht der Fachmann die **Filterrückstände unter dem Mikroskop**, kann er die Herkunft der Partikel an Hand ihrer **Form, dem Oberflächenanschein und der Zusammensetzung** ermitteln.

Damit ist ein wichtiger Schritt getan, das Risiko eines Schadens im Triebwerk abzuschätzen und gegebenenfalls gezielte Maßnahmen wie das Öffnen des Triebwerks an der richtigen Stelle einzuleiten. Die Kenntnis der **Fremdkörperherkunft** ermöglicht auch vorbeugende Maßnahmen, indem das Einbringen von Fremdkörpern in den Ölkreislauf etwa im Fertigungsprozess verhindert wird.

29. Ein Weltraumteleskop sollte uns zu denken geben. (Risiken zeit- und kostenminimierter Entwicklungsprojekte)

Das Hubble-Teleskop ist ein Wunderwerk der Technik. Als es jedoch in der Umlaufbahn erstmalig zum Einsatz kam, erlebten die entsetzten Wissenschaftler ihr Wunder.

Das Teleskop zeigte nur enttäuschend schlechte Bilder. Eine umfangreiche Untersuchung ergab, dass die Fehlfunktion auf einen winzigen Fertigungsfehler zurückzuführen war. Nur mit einer umfangreichen Reparatur in Weltraum konnte die Milliardeninvestition gerettet werden, so dass sich heute die Wissenschaft an den faszinierenden Ergebnissen erfreuen kann.

Wie ich das Problem sehe:

Über den Fall des Hubble-Teleskops wurde in Zeitschriften und im Fernsehen umfangreich berichtet. Aus diesen Beiträgen lässt sich der folgende Ablauf erkennen:

Das zentrale Schlüsselbauteil ist der riesige Spiegel, ein Einzelstück, der wie eine Linse an unserem Fernglas das Bild verarbeitet. Bei dem Schleifen der hochgenauen Spiegeloberfläche entstand unbemerkt eine winzige Ungenauigkeit. Es war bekannt, dass Ungenauigkeiten den Spiegel ruinieren können, nur glaubte niemand, dass bei den computergesteuerten Herstellungsverfahren so etwas passieren könnte. Dann kam es, wie es kommen musste, das Geld ging aus, und der Auslieferungstermin drohte. Eine Prüfung der Spiegelfunktion wäre sehr zeit- und kostenaufwendig gewesen. So setzte sich das „**Prinzip Hoffnung**“ durch. Der Spiegel kam ungeprüft zum Einbau und letztendlich so in den Orbit. Wie es weiter ging wissen wir.

Um daraus zu lernen, wollen wir uns fragen: Was wurde außer dem ungenauen Schleifen des Spiegels noch falsch gemacht?

- Es war offenbar nicht möglich, vorher das Verfahren an ausreichend ähnlichen Versuchsteilen zu erproben.
- Man hat sich ohne angemessene Kontrollmaßnahmen „blind“ auf den Fertigungsprozess verlassen.
- Eine befriedigende Prüfung vor der Auslieferung wurde nicht vorgenommen.

Diese typischen Fehler drohen grundsätzlich immer da wo Bauteile entstehen. Wechselt man z.B. den Lieferanten einer Schleifscheibe für hochgenaue Flächen an Schaufeln, kann dies zu einer verstärkten Schleifrissebildung führen. Da solche Risse meist verschmiert sind und deshalb ohne Vorbehandlung durch die Eindringprüfung kaum auffindbar sind, besteht die Gefahr, dass sich erst am Ende der später folgenden Qualitätsprüfungen am Fertigteil eine große Zahl der Teile als unbrauchbar erweist. Besser wäre es gewesen, trotz Kosten- und Zeitdruck eine geeignete Erprobung durch Vorabprüfung der ersten Teile vorzunehmen. Letztendlich wären damit Zeit und Kosten gespart.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Bei Neuentwicklungen ist ein ausreichender versuchstechnischer Nachweis durchzuführen. Ein entsprechender Aufwand ist von den Projektteilungen vorzusehen.
- Auch scheinbar kleine **Abweichungen im Fertigungsprozess** sind kritisch zu betrachten und die Unbedenklichkeit dafür von den Fachabteilungen einzuholen.

- An Terminen und **Kosten** sollten im Zweifelsfall qualitätssichernde Prüfungen, die über die Funktion eines wichtigen Bauteils entscheiden, nicht scheitern.
- Für Serienteile wird bei **Beginn einer neuen Charge**, insbesondere nach einem längeren Stillstand der Fertigungsanlagen, dringend empfohlen, die ersten Teile durch die kritischen Prüfungen in der Kontrolle laufen zu lassen, und die Charge erst nach der Freigabe die Charge durchzuziehen.

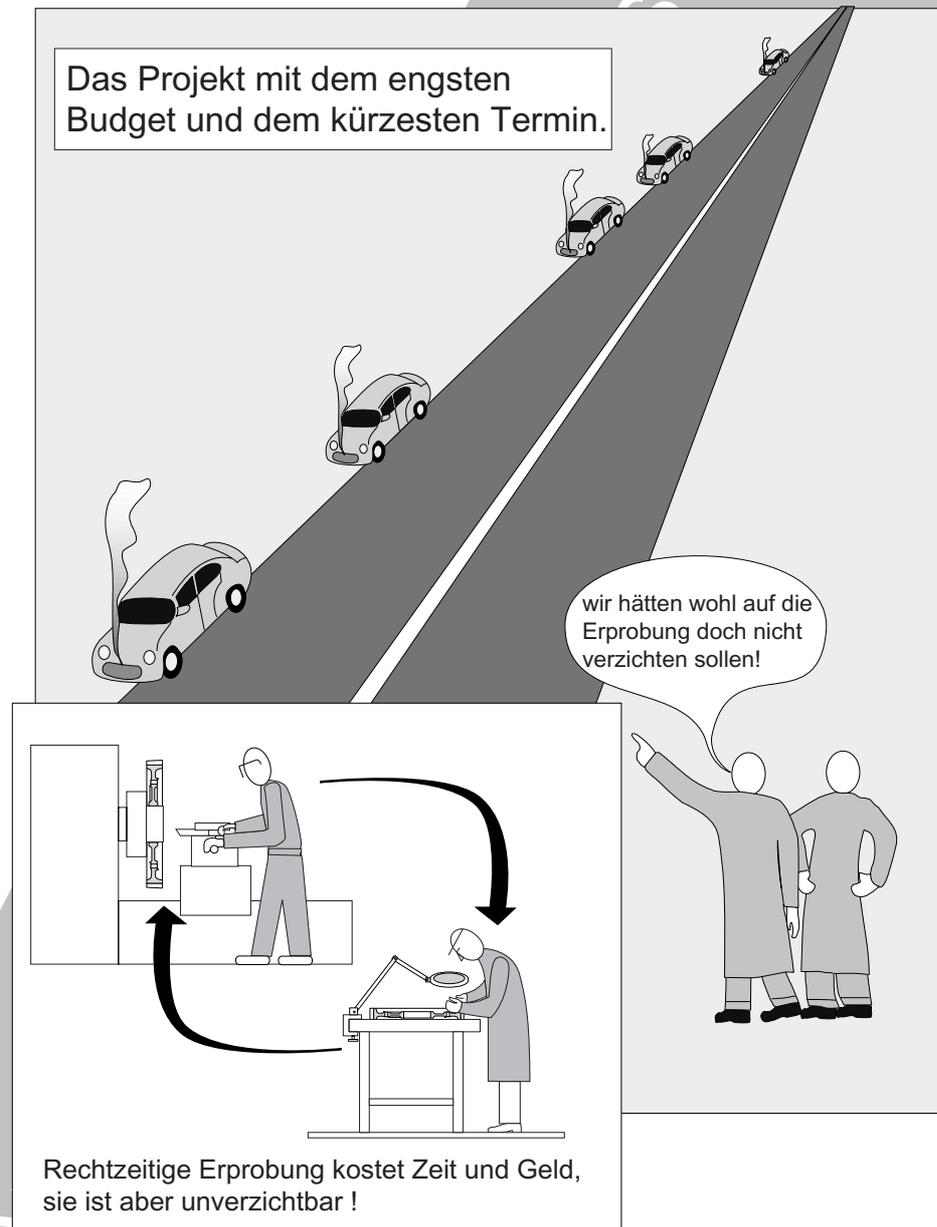


Bild 29

Wenn wir immer wieder den gleichen neuen Autotyp mit einer Panne am Straßenrand stehen sehen, wird das wohl unser Kaufverhalten gegenüber dieser Marke negativ beeinflussen. Da wäre es für den Hersteller wohl besser gewesen, gleich ausreichend Mittel und Zeit in die Entwicklung und Erprobung zu investieren

als teure Nachrüstungen mit Imageverlust zu riskieren.

Bei Triebwerken kommt noch ein besonderer Sicherheitsaspekt hinzu. Besonders bei Fertigungsverfahren ist eine **bauteilspezifische Erprobung** unerlässlich. Die so erarbeiteten Fertigungsparameter sind dann in der Serienanwendung einzuhalten.

30. „Verpackungskünstler“ (Die richtige Verpackung empfindlicher High-Tech-Teile)

Endlich trifft unsere bereits sehnsüchtig erwartete Bestellung ein. Die Nachnahmesendung haben wir klaglos bezahlt und der Überbringer ist bereits wieder abgefahren. Zugegeben, die Verpackung macht einen etwas billigen Eindruck und ist äußerlich leicht ramponiert. Das macht uns aber nicht misstrauisch. Welch herbe Enttäuschung erfahren wir jedoch nach dem Auspacken!

Das Gerät zeigt deutliche Spuren von Gewalteinwirkung. Als Prachtstück für das Wohnzimmerregal kommt es nicht mehr in Frage, und die Funktion könnte auch betroffen sein. Offenbar liegt ein Transportschaden vor. Kein Wunder bei dieser Verpackung!

Wie ich das Problem sehe:

Transportschäden sind für den Absender, den Transporteur und den Empfänger ein Ärgernis. Sie führen zu Verzögerungen und Kosten. Wir sollten deshalb alles daran setzen, Transportschäden zu vermeiden. Dies ist dann möglich, wenn wir selbst der Absender sind. Gerade Triebwerksteile stellen meist einen großen Wert dar, sie sind hoch präzise, manchmal auch filigran oder korrosionsempfindlich. **Verpackungen** müssen also diese Eigenschaften des Transportguts und die zu erwartenden Transportbelastungen berücksichtigen, wobei natürlich die Verpackungskosten in einem sinnvollen Verhältnis zum Bauteilwert stehen sollten. So sind z.B. Stöße, auch von den Kanten her abzufangen, Feuchtigkeit ist vom Innenraum fernzuhalten und Belastungen in einem Stapel sind zu berücksichtigen. Im Inneren dürfen die Teile nicht direkt zusammenschlagen, damit keine gefährlichen Kerben entstehen oder keine spröden Schichten (z.B. keramische Wärmedämmschichten) abplatzen. Sie dürfen bei Vibrationen nicht aneinander reiben, damit z.B. Beschichtungen nicht ausplatzen. Die Verpackung muss das Teil also sicher fixieren, und die Berührungsflächen der Verpackung müssen so nachgiebig und weich sein, dass die Teile auch hier nicht beschädigt werden können. So hat sich z.B. gezeigt, dass Honeycombdichtungen mit ihren typischen dünnen Blechstege an den Kanten durch Transportstöße in Kunststoffkästen beschädigt werden können.

Wenn aber trotz guter Verpackung das Teil ramponiert beim Kunden eintrifft, besteht der berechtigte Verdacht, dass beim Transport ungewöhnlich rauh verfahren wurde. Wie kann man das aber nachweisen? Die Chancen dafür sind gar nicht schlecht. Mit modernen Labormethoden lassen sich bei akzeptablem Aufwand die Ursachen eines Transportschadens klären. So verdächtige anfangs der Empfänger einen herausstehenden Nagel in der Transportkiste als **Ursache für die Beschädigung** am Außendurchmesser einer von uns gelieferten Verdichterscheibe. Es ließen sich jedoch mit Labormethoden typische Mauerreste nachweisen, die eindeutig belegten, dass das Teil gegen eine Mauer gestoßen war. Offenbar hatte die Verpackung entweder unter extremer **Stoßbelastung** versagt, oder das Teil war bereits ausgepackt gegen die Mauer gestoßen worden. In einem anderen Fall konnten in verbogenen Honeycombzellen ausgebrochene Kunststoffreste der Verpackung gefunden werden, was auf einen offenbar zu harten Kunststoff der Verpackung hinwies.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Verpackungen von Triebwerksteilen erfordern **Fachwissen** und sind Spezialistensache. Sie müssen eine Vielzahl von Forderungen wie Kosten, Haltbarkeit, Aufwand, Gewicht und Volumen berücksichtigen.

- Verpackungen sollten **für den jeweiligen Anwendungsfall erprobt und spezifiziert** sein. Änderungen sind mit den zuständigen Fachleuten abzusprechen.
- Werden vom Kunden Transportschäden reklamiert, sollten diese, falls Zweifel an der **Ursache** bestehen, einer Begutachtung im Labor zur Verfügung stehen.
- Transportschäden an Verpackungen sind auch ein Know-How-Gewinn. Die so teuer erworbenen Erfahrungen sollten in die **Verbesserung der Verpackungen und deren Spezifikation** einfließen.

Typische Transportschäden an einem "High Tech"-Teil des Triebwerksbaus

- 1 Bohrungen verstopfen
- 2 Thermobarrieren platzen aus
- 3 Labyrinthpanzerungen werden abgeschlagen
- 4 Dichtungen wie Honeycomb oder Anlaufschichten werden beschädigt
- 5 Spröde Schutzschichten (Diffusionsschichten) splintern ab
- 6 Rissbildung in spröden Schichten
- 7 Spitzenpanzerungen brechen aus
- 8 Verformungen an Auflage- und Passflächen
- 9 Fremdmaterial wird aufgeschmiert

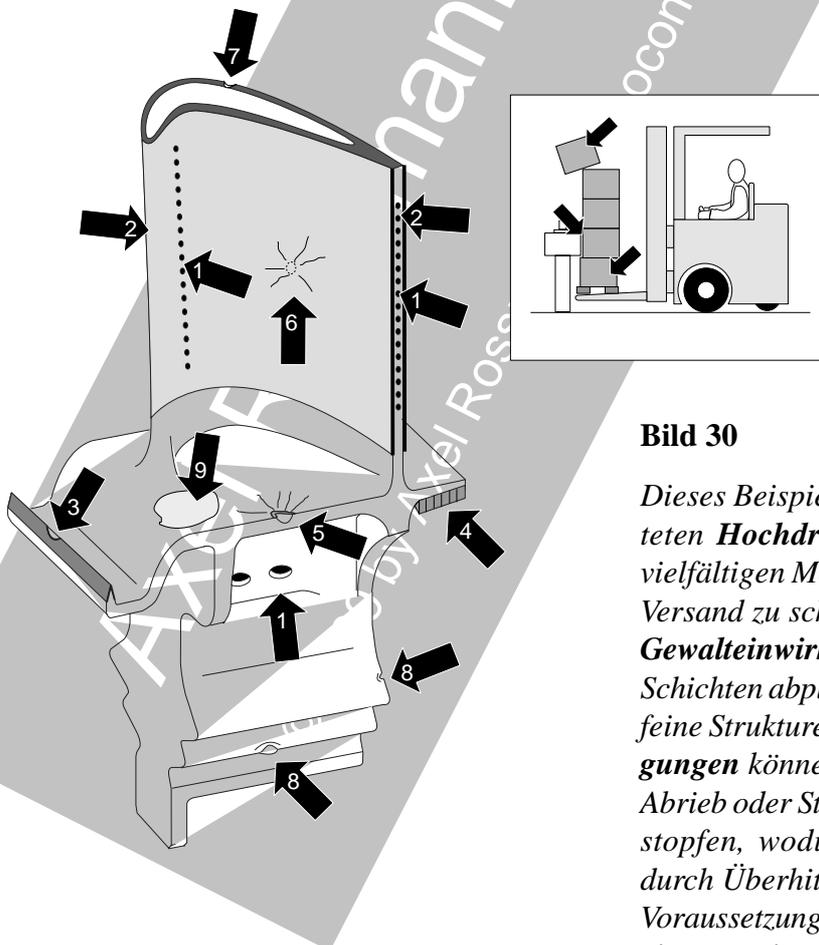


Bild 30

Dieses Beispiel einer gekühlten und beschichteten **Hochdruckturbinenschaufel** zeigt die vielfältigen Möglichkeiten dieses Bauteil beim Versand zu schädigen.

Gewalteinwirkung kann Kerben eindrücken, Schichten abplatzen lassen, Risse erzeugen und feine Strukturen deformieren. Diese **Beschädigungen** können zum Bauteilbruch führen.

Abrieb oder Staub können **Kühlluftkanäle** verstopfen, wodurch die Schaufeln im Betrieb durch Überhitzung versagen.

Voraussetzung dafür, dass solche Schäden nicht eintreten, ist eine geeignete Verpackung.

31. Der Facharbeiter als Qualitätssicherer (Qualitätssicherung durch die fachkundige Beobachtung des Fertigungsprozesses)

Wenn wir von „Werkerselbstkontrolle“ hören, fällt uns meist zuerst eine Kosteneinsparung ein, weil der Facharbeiter zusätzlich Qualitätssicherungsaufgaben durch die Kontrolle der Bauteilmaße übernimmt. Diese Sichtweise ist aber deutlich zu kurzfristig. Durch die Beobachtung der Fertigungsprozesse kann der Facharbeiter weit mehr zur Qualität und Sicherheit unserer Bauteile beitragen.

Wie ich das Problem sehe:

Die Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen an Triebwerksteile machen eine möglichst lückenlose Kontrolle der Eigenschaften unserer Bauteile notwendig. Hierfür erforderliche Prüfungen, z.B. an den Rohteilen beim Wareneingang, sind teuer und nur eingeschränkt möglich. Wir können ja nicht die Teile zerschneiden, die wir verkaufen wollen. Auch die Probenentnahme und die Probenprüfung aus Aufmaßmaterial ist zeitaufwendig, teuer und genau genommen nur für den Bereich der Probenentnahme voll aussagefähig.

Wie schön wäre es doch, große Teile der Bauteiloberfläche auf unzulässiges Werkstoffverhalten und Schädigungen durch **Abweichungen des Fertigungsprozesses** zu überwachen! Dass dies kein frommer Wunsch bleiben muss, dafür können unsere Facharbeiter sorgen, indem sie den Fertigungsprozess, für den sie verantwortlich sind, genau und fachkundig beobachten.

Weil z.B. die **Werkstoffeigenschaften** wie Festigkeit oder Zähigkeit das **Zerspanungsverhalten** und die Oberflächengüte des Bauteils deutlich beeinflussen können, können z.B. eine ungewöhnliche Spannbildung, ein anderes **Oberflächenaussehen**, besonderer **Werkzeugverschleiß**, bedenkliche **Wärmeentwicklung** (z.B. starke **Anlauffarben** an Bauteil und Werkzeug) oder Bauteilverzug auf eine unzulässige Veränderung des Fertigungsprozesses und/oder des Werkstoffes hinweisen. Auch die Funkenbildung bei Schleifprozessen kann auf Besonderheiten hinweisen.

Dies gilt auch für alle anderen Fertigungsverfahren. Ungewöhnliche Blasenbildung in einem **Ätzbad** oder bei einem galvanischen Prozess, ein von der Erfahrung abweichendes Schmelzbadverhalten oder Oxidation beim **Schweißen**, eine sonderbare Schweißnahtausbildung, verstärkte Schweißspritzer, Flecken, Anlauffarben oder Anzeichen für Oxidation bei Wärmebehandlungen sind nur einige Beispiele.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Achten Sie auf **ungewöhnliche** von Ihren Erfahrungen abweichende **Erscheinungen** beim Fertigungsprozess! **Melden sie Ihre Beobachtungen** den zuständigen Fachabteilungen!
- Wenn Sie eine bedenkliche Beobachtung gemacht haben, **unterbrechen Sie den Fertigungsprozess** und versuchen sie nicht erst das gesamte Bauteillos fertigzustellen!
- **Erhalten Sie möglichst den von Ihrer Erfahrung abweichenden Zustand!** Insbesondere

sollte nicht noch eine Arbeitsfolge oder ein Zerspanungsvorgang durchgeführt werden, der das Aussehen nicht mehr nachvollziehbar verändert. Hierzu gehört, dass Anlauffarben oder andere Oberflächenveränderungen nicht entfernt werden sollten.

Während des Fertigungsverganges können wichtige Beobachtungen gemacht werden, die Rückschlüsse auf die Qualität zulassen.

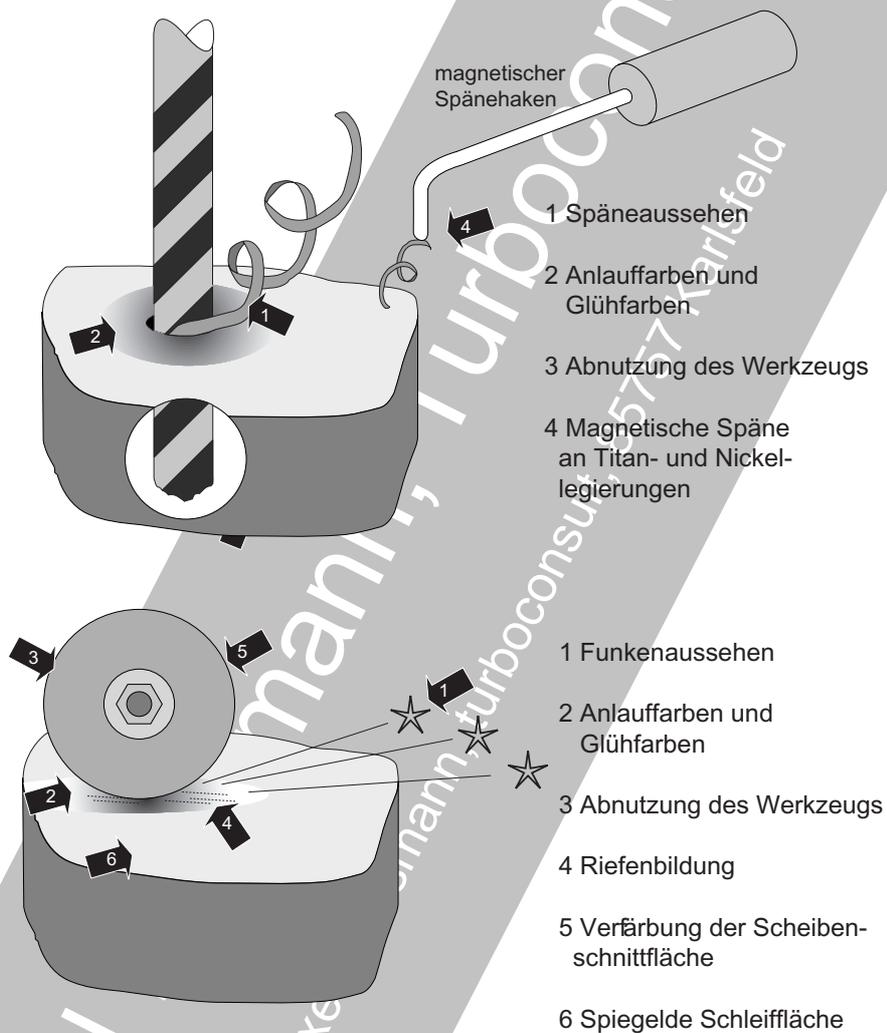


Bild 31

Ein Facharbeiter kennt und versteht „seinen“ Fertigungsprozess. Ihm fällt z.B. bei spanender Bearbeitung das **ungewöhnliche Verhalten seines Werkzeugs** oder eine **besondere Spanbildung** auf. Solche Beobachtungen können ein erstes Indiz dafür sein, dass „etwas aus dem Ruder gelaufen ist“, bzw. der Fertigungsprozess oder die Werkstoffeigenschaften nicht mehr stabil sind. Besondere Aufmerksamkeit ist

geboten, wenn ein **neues Rohteile-Lieferlos** zur Bearbeitung ansteht, oder wenn sich der **Rohteil- oder Werkzeuglieferant geändert** hat. Dies gilt auch, wenn im Fertigungsprozess Änderungen vorgenommen wurden, z.B. die Bearbeitung auf einer **anderen Maschine** (diese kann vom gleichen Typ sein) durchgeführt wird.

32. Die Seuche

(Die Beeinflussung der Fertigungs- bzw. Prüfqualität durch Hilfsstoffe und „Fremdmedien“)

Fast wie im richtigen Leben wird die Produktion, oder besser die Kontrolle, ab und zu von einer Seuche heimgesucht. Diese macht sich dadurch bemerkbar, dass sich plötzlich die Bauteile der Eindringstoffprüfung verweigern. Diese Seuche wird üblicherweise erst an einzelnen Teilen beobachtet und breitet sich dann über die ganze Fertigung aus. Gibt es eine „Schutzimpfung“ oder müssen wir, wie es manchmal scheint, die Heimsuchung wie im Mittelalter über uns ergehen lassen und durch Mehraufwand die Symptome so lange kurieren, bis das Problem so spontan verschwindet wie es aufgetaucht ist?

Wie ich das Problem sehe:

Die Seuche kann sich auf unterschiedliche Art ankündigen. Zuerst ist die Oberfläche mancher Teile unter der UV-Lampe ganz oder teilweise grün fluoreszierend, die sog. „**Hintergrundfluoreszenz**“ hat zugeschlagen und verhindert die Erkennung eines möglichen Risses, der ebenfalls grün leuchtet, nun aber nicht mehr zu sehen ist. Es kann auch der gänzlich andere Fall auftreten, nämlich, dass der Eindringstoff, dessen Funktion von der **Benetzung der Oberfläche** lebt, plötzlich abperlt, als ob die Bauteiloberfläche frisch eingefettet ist. Nun sieht die Oberfläche unter dem UV-Licht blitzblank aus ohne jede Fehlstelle. Das ist verdächtig, und wir können nicht sicher sein, ob nicht doch ein Riss vorhanden ist, in den der Eindringstoff nur nicht eindringen konnte. Nun hebt üblicherweise ein intensives manuelles Reinigen an, das durchaus mehrmals vorgenommen werden muss und sich sehr zeit- und kostenintensiv gestaltet, ganz zu schweigen von der allgemeinen Verunsicherung.

Wo kommt die Seuche her? Inzwischen wissen wir uns deutlich besser zu helfen, den Übeltäter zu überführen. Zuerst sollte man alle Reinigungsbäder, insbesondere die in der Rissprüfung auf Verunreinigungen überprüfen, die sich auf der Badoberfläche angesammelt haben und dort jedes eingetauchte Teil beim Herausziehen mit einem Film überziehen, der sich mit dem Rissprüfmittel nicht verträgt. In vielen Fällen ist der Übeltäter Silikonöl. Wir kennen diese Flüssigkeit von den Windschutzscheiben unserer Autos, wenn sich trotz sauberer Wischer nur noch Schlieren bilden. **Silikonöle** kommen, wenn nicht strikt verboten, immer wieder in der Fertigung zur Anwendung. Sie treten als **Entschäumungsmittel bei Schneidflüssigkeiten** oder als **Trennmittel in Formen** auf. Dieses Silikonöl wird von den Teilen in die Reinigungsbäder getragen, wo es zwar wie erwünscht abgewaschen wird, sich aber auf dem Bad ansammelt. Den Rest kennen wir.

Das bedeutet für unser Handeln:

- **Verbannen Sie Silikonöle und Substanzen** unbekannter und ungeprüfter Zusammensetzung (z.B. Handcreme, Schmiermittel, „Schaumbremsen“, Trennmittel) aus Ihrer Fertigung!
- Wenn die Bauteile nicht mehr mit Eindringstoff rissprüfbar sind, **erneuern Sie alle Reinigungsbäder**, insbesondere die, welche vor der Rissprüfung zur Anwendung kommen! Sorgen Sie dafür, dass die Behälter vor der neuen Befüllung gereinigt werden!

- Nicht jedes ungewöhnliche Verhalten der Bauteiloberfläche ist auf Verunreinigungen zurückzuführen, die die Rissprüfbarkeit unzulässig beeinflussen. Im Zweifelsfall ist die zuständige Fachabteilung hinzuzuziehen. Diese hat die Möglichkeit sich an Hand von Proben Gewissheit zu schaffen.
- Wir bringen **keine eigenen Sprays, Lotions, Seifen, Handcremes usw. an den Arbeitsplatz**, sondern verwenden hier nur offiziell von den zuständigen Fachabteilungen freigegebene Pflegemittel.

Die Verunreinigung auf Entfettungsbädern können die Rissprüfung sehr erschweren.

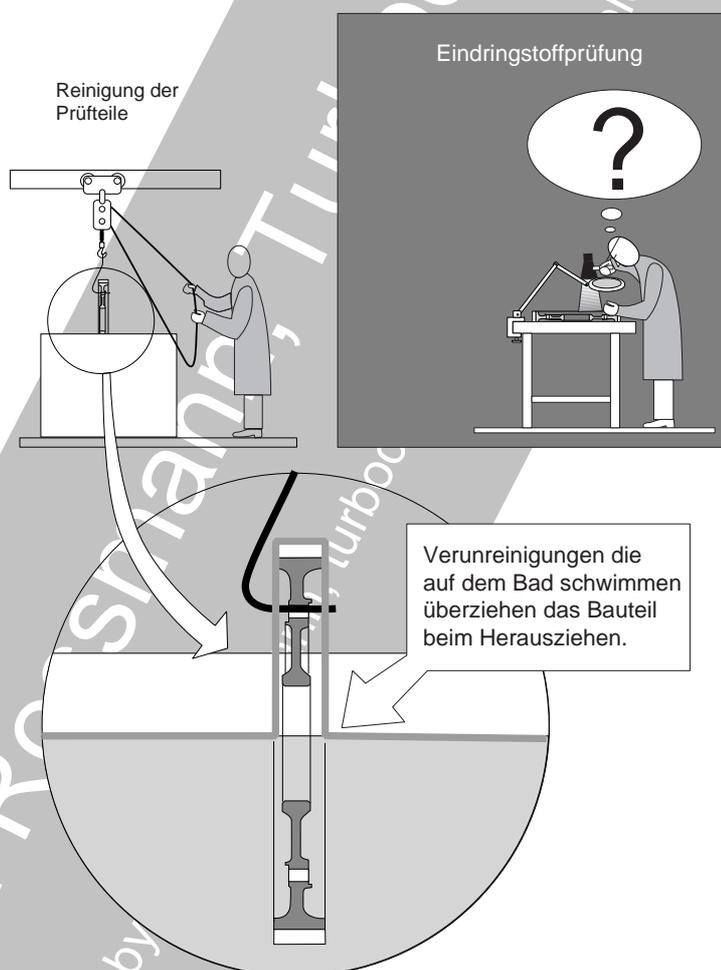


Bild 32

Die komplexen Fertigungsprozesse im Triebwerksbau können durch Einwirkung unvorhergesehener Medien unzulässig beeinflusst werden. Ein typisches Beispiel ist die **Verunreinigung von Reinigungsbädern**, die sich auf die Bauteile überträgt. Es gibt aber noch viele andere Möglichkeiten unangenehmer Nebeneffekte. Hierzu gehören Bindefehler in faser-

verstärkten Kunststoffteilen an Stellen, die mit Trennmitteln (z.B. Teflonspray) verunreinigt wurden, oder Verunreinigungen mit Substanzen wie Markierungen mit **nicht zugelassenen Stiften**. Diese können bei einer Wärmebehandlung mit der Bauteiloberfläche reagieren.

33. Im Schweiß des Angesichts...

(Wasserstoffinduzierte Rissbildung beim Schweißen unter der Einwirkung von Feuchtigkeit)

Schweißen ist wohl das in der Technik am häufigsten angewandte Fügeverfahren. Trotzdem oder gerade deshalb gilt: Schweißen ist Spezialistensache. Wer schweißt, kämpft gegen eine Vielzahl von Problemen und muss trotzdem höchste Qualität und Festigkeit gewährleisten. Er erfährt mit Sicherheit mehr Vorwürfe als Lob und Anerkennung. Wir sollten uns bemühen, unseren Beitrag zu liefern, damit ihm „das Leben etwas leichter“ gemacht wird.

Wie ich das Problem sehe:

Ein **Problem der Schweißtechnik** ist eine im Volksmund **Wasserstoffversprödung** genannte Rissbildung. Die besondere Gemeinheit dieser Risse ist, dass es sich hier um eine sogenannte **verzögerte Rissbildung** handelt, d.h. es kann passieren, dass die geschweißten Teile rissfrei auf Lager gelegt wurden, oder auf den nächsten Fertigungsschritt warten. Werden die Teile dann wieder genauer angesehen, entdeckt man mit Entsetzen Risse in und/oder um die Schweißnaht. Hier hat nicht etwa die Rissprüfung versagt, sondern der Werkstoff ist tatsächlich erst längere Zeit nach dem Schweißen aufgerissen.

In einem solchen Fall kann der Fachmann an Hand der Bruchflächen sicher und schnell die Art des Schadens feststellen. In vielen Fällen, insbesondere bei Stählen mit höherer Festigkeit wie sie bei Triebwerksgehäusen im kälteren Bereich verwendet werden, wird Wasserstoff als Täter identifiziert. Wie kommt nun Wasserstoff, ein Gas, in das Metall? Beim Schweißen entsteht unter dem Brenner bzw. Lichtbogen eine Schmelze. Ist genügend **Feuchtigkeit in der umgebenden Luft**, dann werden die Wassermoleküle im Lichtbogen zersetzt, es entsteht Wasserstoff, der wie Kohlensäure im Wasser der Sprudelfläche von der Schmelze gierig aufgenommen wird. Erstarrt die Schmelze, bleibt der Wasserstoff im Metall gefangen und kann nun sein übles Spiel beginnen. Er sammelt sich nämlich an bestimmten Stellen unter ungeheurem Druck in kleinen Poren und sprengt das Metall. Ein Riss ist da.

Wir können der Gefahr der Wasserstoffversprödung nur begegnen, indem wir kein Wasser bzw. keine Feuchtigkeit beim Schweißen in die Nähe lassen. Das heißt, dass natürlich das Schutzgas trocken sein muss. Wird ein falsches Schlauchmaterial verwendet, saugt dies die Feuchtigkeit geradezu in das innen fließende Schutzgas. Befindet sich an der Teileoberfläche ein Schweißwasserfilm oder hat feuchte Luft zum Schmelzbad Zutritt, ist das Problem bereits vorprogrammiert. Dies ist auch der Grund, warum man bei diesen Problemen eine **Jahreszeitenabhängigkeit** beobachten kann. Wenn Bauteile vor dem Schweißen im Winter draußen in der Kälte stehen, dann zum Schweißen in die warme Halle gebracht werden, beschlagen sie mit Feuchtigkeit wie ein mit kühlem Bier gefülltes Glas im Sommer.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Werden an vorher rissfreien Bauteilen **später Risse gefunden**, so kann es sich um verzögerte Rissbildung handeln. Vorwürfe an die Rissprüfung, die Risse übersehen zu haben, sind dann ungerechtfertigt.

- Bei verzögerter Rissbildung sind die Bruchflächen auf **Wasserstoffversprödung** zu untersuchen.
- **Feuchtigkeit** ist grundsätzlich vom **Schweißprozess** fernzuhalten. Selbst scheinbar kleine Mengen Wasser sind für empfindliche Werkstoffe (Stähle) gefährlich. Empfindliche Bauteile sind **unmittelbar vor dem Schweißen im Ofen zu trocknen**.
- Die **Schweißanlage** (z.B. die **Schläuche** für das Schutzgas) ist nach dem Stand der Technik gegen Feuchtigkeit zu schützen.

Feuchtigkeit beim Schweißen kann zur Rissbildung führen.

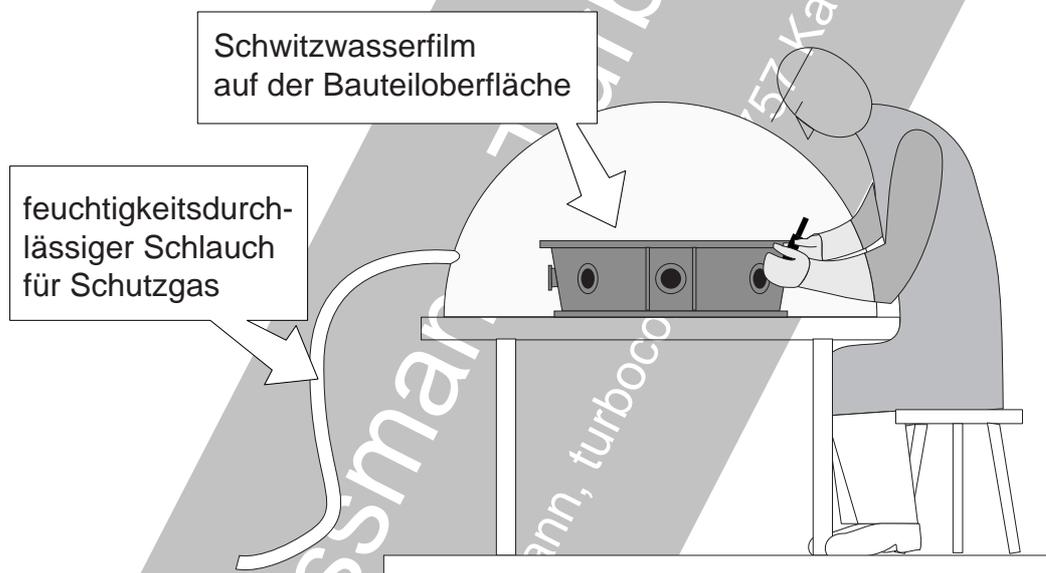


Bild 33

Rissbildung während oder nach dem Schweißen, sei es bei einer Wärmebehandlung oder während der Lagerung des Bauteils, ist ein typischer und gefürchteter Schaden. Die vielen möglichen Ursachen, wie Werkstoffbesonderheiten, Verunreinigungen, Schweißprozess und die Nachbehandlung machen die Feststellung der Schadensursache schwer. Häufig müssen empirisch durch viele Versuche Abhilfen gefunden werden.

Bei Bauteilen wie Verdichter- und Turbinenaustrittsgehäusen aus Stählen mit höherer Festigkeit (Sie können daran erkannt werden, dass sie magnetisch sind.) besteht die besondere Gefahr der Rissbildung durch eingedrungenen Wasserstoff. Besonders heimtückisch ist bei

dieser Schadensart, dass die Risse häufig erst nach längerer Ruhezeit am Lager auftreten, also von der Rissprüfung direkt nach dem Schweißprozess nicht gefunden werden konnten. Die Erfahrung zeigt, dass diese Schäden immer dann auftreten, wenn Feuchtigkeit zum Schmelzbad der Schweißung Zutritt hat. Je nach Werkstoff genügt schon wenig **Feuchtigkeit in der Luft oder im Schutzgas** um solche Schäden auszulösen. So hat ein **Schutzgasschlauch aus ungeeignetem Kunststoff**, der die Feuchtigkeit der Luft zum innenströmenden Schutzgas geradezu ansaugt, jahrelang zu Rissen verbunden mit Mehrarbeit und großer Verunsicherung geführt.

34. „Wer den Pfennig nicht ehrt...“

(Der Einfluss der Qualität von Massen-Zukaufteilen auf die Zuverlässigkeit komplexer Gesamtsysteme)

Nicht erst seit der „Challenger-Katastrophe“ und nachdem vor Millionen Zuschauern Rennwagen stehen geblieben sind, weiß man den wahren Wert von sogenannten Pfennigartikeln oder zum Gesamtsystem vergleichsweise billigen Bauelementen wie Dichtungen, Rohrschellen oder Schrauben zu schätzen. Dies gilt natürlich und gerade auch für eine komplexe High-Tech-Maschine wie ein Flugtriebwerk.

Wie ich das Problem sehe:

Vor kurzem konnte man lesen, dass eine Befestigungsschraube mit einem zu kleinen Kopfdurchmesser im Betrieb durch die Bohrung der zu haltenden Rohrschelle rutschte. Dadurch konnte aus der zu haltenden Leitung eine brennbare Flüssigkeit austreten. Dies führte zu einem Triebwerksbrand im Flug. Beim „Columbia“ Space-Shuttel ermöglichte eine ungeeignete O-Ringdichtung den Austritt von Heißgas der Feststoffraketen. Es folgte die Explosion der Rakete mit dem Raumfahrzeug.

Wir sehen also, wie wichtig es ist, dass wir diesen „**Kleinteilen**“ **unsere volle Aufmerksamkeit schenken**. Wird bei einer Lieferung von Dichtungsringen ein ungeeigneter Kunststoff verwendet, dürfte dies nur schwer zu erkennen sein. Vielleicht fällt auf, dass sich die Härte oder die Farbe verändert hat oder, dass die Montage schwieriger oder leichter als gewohnt ist. Weil die Erkennung am Neuteil so schwierig ist, muss auch bei der Demontage gelaufener Triebwerke nach Erprobungsläufen oder dem Serieneinsatz auf den Zustand solcher einfacher Bauteile geachtet werden, bevor diese als „**Wegwerfartikel**“ in der Schrottkiste landen. Wenn sich z.B. Ausfälle häufen, oder sich das Aussehen gegenüber der bisherigen Erfahrung verändert hat, sollte „Alarm geschlagen“ werden. Werden z.B. Kunststoffe an Dichtungen plötzlich wellig, quellen stark auf oder dringen durch den Dichtspalt, wie es bisher noch nicht beobachtet wurde, ist dies ein deutlicher Hinweis für einen Angriff durch die abzudichtende Flüssigkeit. So kommt den „Männern mit den schmutzigen Händen“ im Überholshop und der **Demontage eine wichtige Aufgabe** in unserem Qualitätssicherungssystem zu.

Das bedeutet für unser Handeln:

- **Pfennigartikel** werden zumindest mit einer ausreichenden Stichprobenzahl einer eingehenden spezifizierten Wareneingangsprüfung unterzogen. Ungewohnte Verfärbungen oder Kennzeichnungen sollten uns misstrauisch machen.
- **Bei der Montage registrieren wir Abweichungen** vom bekannten Verhalten der Teile. Beispiele sind größere Dehnungen bzw. veränderte Umdrehungen des Schlüssels beim Anziehen von Schrauben oder ungewohnte Probleme bei der Montage von Lippendichtungen oder O-Ring-Dichtungen.
- Bei der **Demontage gelaufener Triebwerke** achten wir auf Änderungen des Zustands der Kleinteile oder einen Anstieg von bestimmten Verschleißmerkmalen gegenüber unserer bisherigen Erfahrung. Wenn wir solche Beobachtungen machen, wenden wir uns an eine zuständige Fachabteilung, im Zweifelsfall an die Kontrollabteilung.

Einfache "Kleinteile" die unsere Aufmerksamkeit verdienen

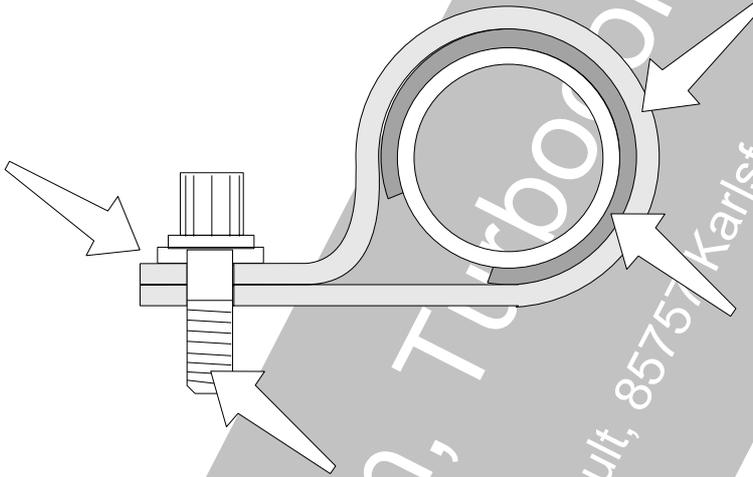


Bild 34

Triebwerke weisen eine Vielzahl von „**Kleinteilen**“ auf. Dies sind Schrauben, Muttern und Beilagscheiben verschiedenster Sorten, Rohrverschraubungen und Befestigungsschellen, Dichtungen wie O-Ringe, Gleitdichtungen und Federn usw. Diese Teile müssen von zugelassenen Firmen hergestellt werden und genauen Spezifikationen entsprechen. Häufig werden die Teile bei der Triebwerksüberholung geprüft und gegebenenfalls „regeneriert“, sodass sie wieder zur Anwendung kommen können.

Obwohl es sich um Teile mit scheinbar untergeordneter Bedeutung handelt, kann ein Versagen der Funktion zu umfangreichen Folgeschäden führen. Öllecks können Öl-mangel mit Lagerschäden hervorrufen und/oder ein Ölfeuer verursachen, das im Extremfall zum Bersten einer Rotorscheibe führt.

Versagende Kraftstoffdichtungen bedeuten unmittelbare Feuergefahr. Bricht der Kopf einer Schraube der Rotorverschraubung, kann das Bruchstück die benachbarten Scheiben gefährlich beschädigen. Solche Kerben können als

Rissstarter wirken und so die Gefahr eines gefährdeten Scheibenplatzers heraufbeschwören. Es ist also sehr wichtig, dass wir den „Kleinteilen“ unsere Aufmerksamkeit widmen. Hier sind besonders die **Monteure** gefragt, die unsere Triebwerke zusammenbauen. Aber auch der Zustand dieser Teile nach langen Laufzeiten ist interessant und kann uns wichtige Hinweise auf eventuelle Mängel und Abweichungen geben.

Brechen bei der Demontage ungewöhnlich häufig Schrauben, sollte man nicht zur Tagesordnung übergehen, weil die Schrauben halt einmal besonders „festgefressen“ sind. Denkbar ist, dass die Schrauben Betriebsanrisse aufweisen und deshalb abbrechen. Eine kurze Untersuchung der Bruchfläche durch einen Fachmann wird schnell zeigen, ob sich hinter den abgerissenen Schrauben ein größeres Problem verbirgt.

35. Klebeband auf staubiger Fläche- ein hoffnungsloser Fall (Die Auswirkung unzureichender Verfahrenserprobung am Beispiel des thermischen Spritzens)

Wir kennen das Problem. Ein Klebeband soll mal schnell aufgebracht werden. Zugegeben, die zu beklebende Fläche haben wir in der Eile nicht extra abgewischt. Aber das darf doch kein Problem sein. Leider müssen wir immer wieder erkennen, dass das Band überall klebt nur nicht an der vorgesehenen Klebefläche. Auch erneutes Andrücken bleibt wirkungslos.

Wie ich das Problem sehe:

Was hat nun dieser ärgerliche Effekt mit unserer Fertigung zu tun? Da müssen wir uns erst einmal die Ursache für die Klebeverweigerung genauer betrachten. Der lose Staub auf der Klebefläche verhindert den direkten Kontakt zum Kleber auf dem Band. Die losen Staubpartikel haften am Klebeband und werden abgehoben. Damit hat das Klebeband jeden „Klebewillen“ für immer aufgegeben.

Beschichtungen durch **thermisches Spritzen** sind in der Triebwerkstechnik weit verbreitet. Beispiele sind Anstreifschichten in Verdichtergehäusen und Labyrinthdichtungen und Wärmedämmschichten (Thermobarrieren) auf den Heißeilen wie Brennkammer und Turbinenschaufeln und als Verschleißschutz auf Labyrinthspitzen oder den Kontaktflächen von Schaufeldeckbändern.

Beim thermischen Spritzen wird feines Pulver durch einen Lichtbogen oder eine Flamme geblasen und dabei aufgeschmolzen. Treffen die Schmelztröpfchen auf die zu beschichtende Bauteiloberfläche, dann bleiben sie dort „kleben“. Ein erheblicher Teil der Tröpfchen prallt jedoch ab, zerstäubt dabei, und bleibt als feiner Staub auf allen umgebenden Flächen liegen. Werden diese Flächen wie üblich mehrschichtig in mehreren Durchläufen aufgespritzt, dann verhindert dieser Staub wie beim Klebeband die Haftung der nächsten Schichtlage. Solche Schichten haben verständlicherweise sehr schlechte Haftfestigkeiten und blättern spätestens im Betrieb ab. In einer mikroskopischen Untersuchung lässt sich dieser Schadensmechanismus durch Anhäufungen charakteristischer Kügelchen, dem Spritzstaub, nachweisen. Man spricht deshalb auch vom „**Kügelchenproblem**“.

Das bedeutet für unser Handeln:

- **Verstaubte Bauteile** sind vor dem Beschichten zu reinigen.
- Anlagen für das thermische Spritzen sind möglichst staubfrei zu halten. Zumindest sollten die zu beschichtenden Teile nicht in aufgewirbeltem Staub aufgebaut werden.
- Durch geeignete **Abdeckungen und Blenden** müssen die zu beschichtenden Flächen **vor Abprallerstaub geschützt** werden. Die optimale Anordnung dieser Vorrichtungen ist Bestandteil der bauteilspezifischen Verfahrensentwicklung.
- Treten **Abblätterungen** an thermischen Spritzschichten auf, sind die Trennflächen mikroskopisch **auf das „Kügelchenproblem“ hin zu überprüfen**, gegebenenfalls sind die genannten Maßnahmen einzuleiten.

Staub ist der Feind der Haftfestigkeit von thermischen Spritzschichten.

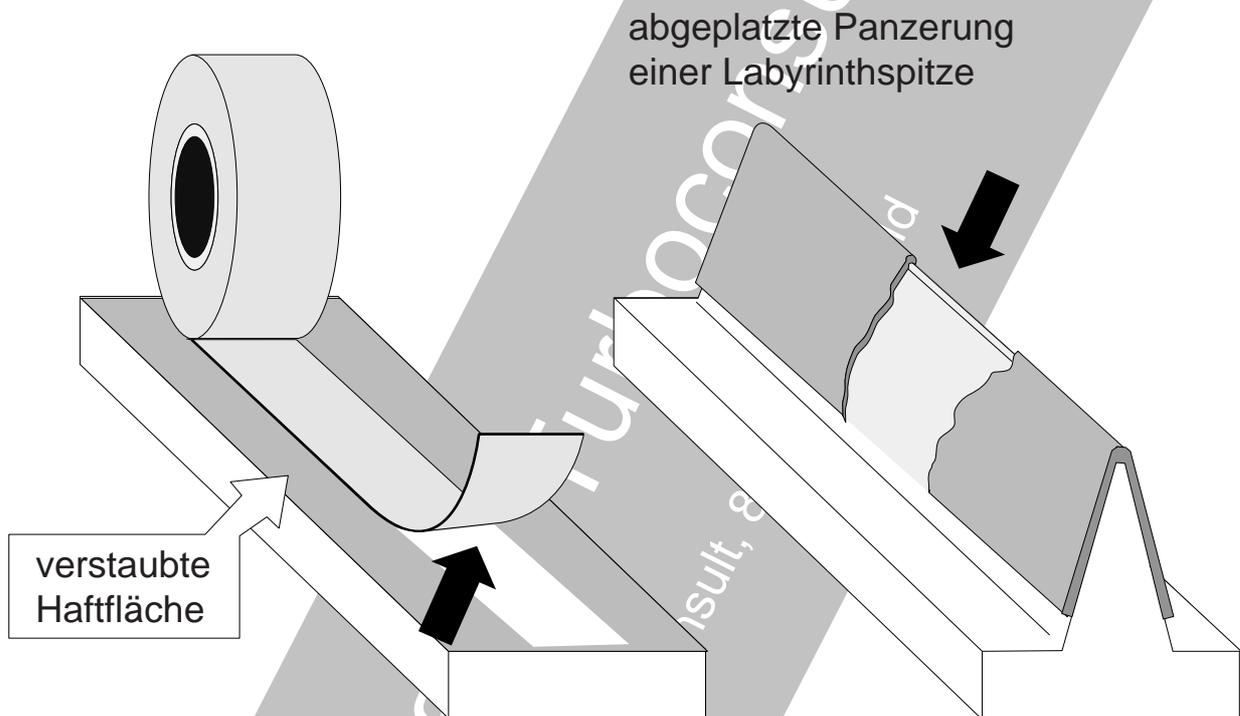


Bild 35

Das Ablösen oder Ausbrechen von thermischen Spritzschichten an Triebwerksteilen kann durchaus bedenklich sein. Durch diesen Vorgang verliert das Bauteil örtlich seine, für einen störungsfreien Betrieb notwendige, Eigenschaft. Handelt es sich z.B. um die **Panzerung einer Labyrinthspitze** kann beim Anstreifen an dieser Stelle der Grundwerkstoff stark überhitzt werden. Eine harte und raue Panzerung schneidet sich nämlich in die Gegenfläche z.B. in eine Honigwabenstruktur ein, ohne dass viel Wärme entsteht. Streift der relativ weiche Grundwerkstoff an, gibt es Aufschmierungen, und es können örtliche Anschmelzungen mit sogenannten Heißrissen auftreten. Von diesen Rissen laufen dann unter Umständen mit der Zeit im Betrieb die Risse weiter bis das Bauteil versagt. Solche Schäden sind von rotierenden Labyrinthtringen zwischen den Schaufelstufen bekannt.

Platzen **Wärmedämmschichten** ab, dann fehlt an dieser Stelle die „Isolierung“, und die Kühlung kann hier die Wärme nicht mehr wegtransportieren. Es kommt zur örtlichen Überhitzung mit der Gefahr der Rissbildung und dem Bruch des Bauteils.

Platzen die harten keramischen **Anstreifschichten** auf Rotorzwischenringen ab, kommt es meist zu Kerben und Verformungen an der Beschaukelung mit der Gefahr von Blattbrüchen durch Schwingermüdung.

Dies kann auch beim **Ausbrechen von Einlaufschichten** in den Gehäusen geschehen. Zusätzlich wird der Spalt an den Schaufelspitzen vergrößert, was sich auf den Kraftstoffverbrauch und das Betriebsverhalten des Triebwerks negativ auswirkt.

Wir sehen also wie wichtig es ist, das Abplatzen von Schichten zu verhindern. Eine wichtige Maßnahme ist das **Vermeiden von „Kügelchen“ auf den aufzuspritzenden Flächen.**

36. Fingerabdrücke schätzt nur die Polizei. (Die Schädigung von Bauteilen durch Handschweiß)

Die Polizei freut sich, wenn sie nach einer Straftat Fingerabdrücke des Täters findet. Ganz anders sieht dies in der Technik aus. In der Fachliteratur liest man, dass es mehrfach in Triebwerken zum Schaufelbruch mit umfangreichen Folgeschäden kam. Diese Brüche konnten auf die schädigende Wirkung von Fingerabdrücken bei der Fertigung der Schaufeln zurückgeführt werden.

Wie ich das Problem sehe:

Dass Fingerabdrücke sehr „langlebig“ sein können sieht man in Krimis, in denen diese nach relativ langer Zeit und trotz der Einwirkung von Umweltbedingungen noch auswertbar sind. Vielleicht haben wir auch schon in unserem Haushalt beobachtet, wie Teile angelaufen oder gerostet sind die wir einige Zeit vorher angefasst haben.

Diese aggressive **Wirkung des Handschweißes** beruht auf kleinen Wassertröpfchen auf unserer Haut die mit Kochsalz aus unserem Körper angereichert sind. Eine solche Flüssigkeit reagiert z.B. mit nicht rostbeständigen Stählen, wie sie bei Kugellagern verwendet werden. Es entsteht Rost. Unter dem Mikroskop entdeckt man an solchen Fingerabdrücken Rostpusteln, die sich in die Metalloberfläche gefressen haben und dort kleine Löcher (Korrosionsgrübchen) entstehen lassen. Befinden sich solche Schäden z.B. auf den Laufflächen von Wälzlagern, kann dies die Lebensdauer der Teile empfindlich verkürzen. Nach einiger Zeit entstehen größere Ausbrüche und das Lager versagt. Deshalb sollten diejenigen, die mit solchen rostempfindlichen Stahlteilen zu tun haben, Baumwollhandschuhe tragen.

Titan rostet nun aber bekanntermaßen nicht. Das ist richtig, doch es ist gegen eine andere, noch schlimmere Korrosionsform empfindlich, eine sogenannte **Risskorrosion**. Bei dieser entstehen keine Grübchen, sondern Risse. Wie unser Beispiel zeigt, schwächen diese Risse das Bauteil so sehr, dass die normalen Schwingungen im Betrieb zum Bruch des Teils führen können. Bei Titanenteilen entsteht diese gefährliche Korrosion jedoch, Gott sei Dank, nicht bei Raumtemperatur, sondern benötigt Temperaturen von mindestens 450°C. Solche Temperaturen liegen meist über den Betriebstemperaturen, sie kommen jedoch bei Wärmebehandlungen im Fertigungsprozess vor. Bei diesen Temperaturen zersetzt sich das Kochsalz des **Fingerabdrucks**, und es bildet sich aggressives Chlorgas. Sind nun auch noch hohe Zugeigenspannungen vorhanden (was nie auszuschließen ist), dann kommt es zum spröden Aufreißen der Bauteiloberfläche.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Wir tragen bei der Handhabung **korrosionsempfindlicher Stahlteile wie Wälzlager** oder Reglerkomponenten **geeignete Schutzhandschuhe**.
- Titanteile die sich **vor einem Wärmebehandlungsprozess** befinden müssen eine saubere Oberfläche haben, insbesondere sind **Fingerabdrücke zu vermeiden**. Im Zweifelsfall ist eine geeignete Reinigung vorzusehen.
- Korrosionsempfindliche Stahlteile sollten bei der Handhabung nach Möglichkeit mit **Konservierungsöl** behandelt sein.

**Bild 36**

In der Literatur werden mehrere Fälle beschrieben, bei denen eine Fanschaufel eines Triebwerkstyps durch einen Fertigungsanriss im Betrieb brach. Die Untersuchungen zeigten, dass offenbar an bestimmten Stellen der Schaufeln im Bereich von **Fingerabdrücken Korrosionsrisse** bei einer **Wärmebehandlung** entstanden waren. Solche Risse treten nur dann auf, wenn der Werkstoff für das Korrosionsmedium, hier das Salz des Handschweißes, empfindlich ist und ausreichend hohe Spannungen (in unserem Fall innere Spannungen, die man äußerlich nicht sehen kann) vorhanden sind. Diese Risse wurden, wie anzunehmen ist, durch die zerstörungsfreien Prüfungen nicht mehr gefunden, die Teile kamen zum Einbau. Jede Schaufel in einem Triebwerk unterliegt einer Schwingbeanspruchung. Diese ist jedoch so niedrig, dass keine Rissbildung auftritt. Befindet sich in der Schaufel aber bereits ein Riss,

dann kann der unter den normalen und üblicherweise harmlosen Schwingbeanspruchungen weiterlaufen und zum Schaufelbruch führen.

Dieser Fall zeigt beispielhaft, wie ein Schaden erst durch die Kombination mehrerer Einflüsse und Mängel ausgelöst wird. In diesem Fall war die Rissbildung durch Korrosion erst möglich, weil sich Salz bei hoher Temperatur auf einem empfindlichen Werkstoff befand der unter großen inneren Spannungen stand. Zu allem Unglück, Murphy lässt grüßen, folgte der Wärmebehandlung offensichtlich keine ausreichende Rissprüfung mehr.

37. „Ätzend“ (Die Gefahr einer Bauteilschädigung durch Ätzverfahren)

Mit einer Gänsehaut lesen wir, wie unliebsame Konkurrenten im Gangstermilieu mit Hilfe von Säurebädern beseitigt werden. Offenbar lässt sich nahezu alles, vorausgesetzt man hat das richtige Ätzmittel gewählt, auf diese Art auflösen. Ätzen ist jedoch zu allererst im Triebwerksbau ein wichtiges Hilfsmittel zur Qualitätssicherung. Es dient z.B. zur Behandlung vor der Eindringprüfung, zur der Beurteilung der Werkstoffqualität und zur guten Haftung einer Beschichtung. Aber wir wissen, auch Heilmittel können, falsch angewandt oder überdosiert, gefährlich werden.

Wie ich das Problem sehe:

Wo Licht ist, ist auch Schatten. Durch Ätzen lässt sich eine Oberfläche abtragen, aktivieren und reinigen. Um gelaufene Heißeile wie Turbinenschaufeln sicher mit Eindringstoff rissprüfen zu können, muss zuerst die **Oxidschicht entfernt** werden, weil sich diese raue Schicht sonst mit Prüfmittel vollsaugt und die Risserkennung verschlechtert oder, weil ein Riss mit Oxiden vollgestopft ist, die ein Eindringen des Prüfmittels verhindern. Leider gehören solche Oxide zu dem Beständigsten, was es in der Natur gibt. Um sie durch **Ätzverfahren** (meist in Kombination mit einer vorherigen abrasiven Strahlbehandlung) entfernen zu können, bedarf es sehr aggressiver Säuren. Nur durch genau eingehaltene Verfahrensparameter wie Badzusammensetzung, Badtemperatur und Ätzzeiten kann dabei eine Schädigung des Grundwerkstoffs vermieden werden. Solche Schädigungen können je nach Werkstoff und Ätzbad als lochartige Anfressungen, als Risse oder örtlicher Abtrag auftreten. Bei Badverwechslungen oder der Anwendung ungeeigneter Bäder kann es auch zur weitgehenden Auflösung großer Bauteile wie Verdichtergehäusen kommen. Wenn Bauteile Beschichtungen wie **keramische Anstreifschichten** aufweisen, ist besondere Vorsicht geboten. Da solche Schichten mit den zu entfernenden Oxidschichten verwandt sind, ist damit zu rechnen, dass die Beschichtung geschädigt oder abgelöst wird. Umgekehrt, wenn solche Anstreifschichten vom Bauteil entfernt werden sollen, besteht die Gefahr, dass die im Grundwerkstoff normalerweise vorhandenen und notwendigen Karbide auch aus der Oberfläche gelöst werden, und so die Festigkeit des Bauteils verschlechtert wird.

Die Verwendung **ungeeigneter Ätzbäder** oder Verfahrensparameter kann durch die **Aufnahme von Wasserstoff** in Stahlteilen auf besonders heimtückische Weise zu einer äußerlich nicht sichtbaren Schädigung führen. Wird diese Schädigung nicht sofort durch eine geeignete **Wärmebehandlung** entfernt, kann das Teil später im Betrieb plötzlich spröde brechen.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Nur die für das Bauteil und den Fertigungsschritt **zugelassenen Ätzbäder und Verfahrensparameter** anwenden. Das Ätzbad muss einer geeigneten **Überwachung** unterstehen, die z.B. das Bad auf Verunreinigungen und seine Zusammensetzung hin überprüft.
- Ätzbäder und andere Verfahrensschritte sind unverwechselbar zu **kennzeichnen**, das Personal ist ausreichend zu unterweisen.
- Wird der gewünschte Ätzeffekt nicht bei einem „Durchlauf“ erzielt, ist im Zweifelsfall von der Fachabteilung zu prüfen, ob ein **weiterer Durchlauf** möglich ist.

- Konstrukteure, die Fertigungsverfahren direkt oder durch die Bauteileigenschaften indirekt vorgeben, müssen prüfen, wie oft diese Verfahren z.B. im Rahmen einer Überholung angewandt werden dürfen, ohne das Bauteil unzulässig zu schädigen. Davon hängt unter anderem die **Zahl der möglichen Behandlungen bzw. Überholungen** und so die erreichbare Lebensdauer der Bauteile ab.
- Die **Arbeitsvorbereitung** prüft, ob das Bauteil Besonderheiten (z.B. **Beschichtungen**) aufweist, die vor dem Ätzverfahren entfernt werden müssen oder durch diese geschädigt werden.
- Bauteile, die sich **in einem Ätzbad ungewohnt verhalten** (z.B. besondere Blasenbildung oder Verfärbungen), sind von der hinzuzuziehenden Fachabteilung auf eventuelle Schädigungen hin zu überprüfen.
- Ätzverfahren sind einer eingehenden **Verfahrenserprobung** zu unterziehen. Hierzu gehört der **Nachweis**, dass das zu behandelnde Bauteil keine unzulässige Schädigung erleidet.

Folge einer Badverwechslung

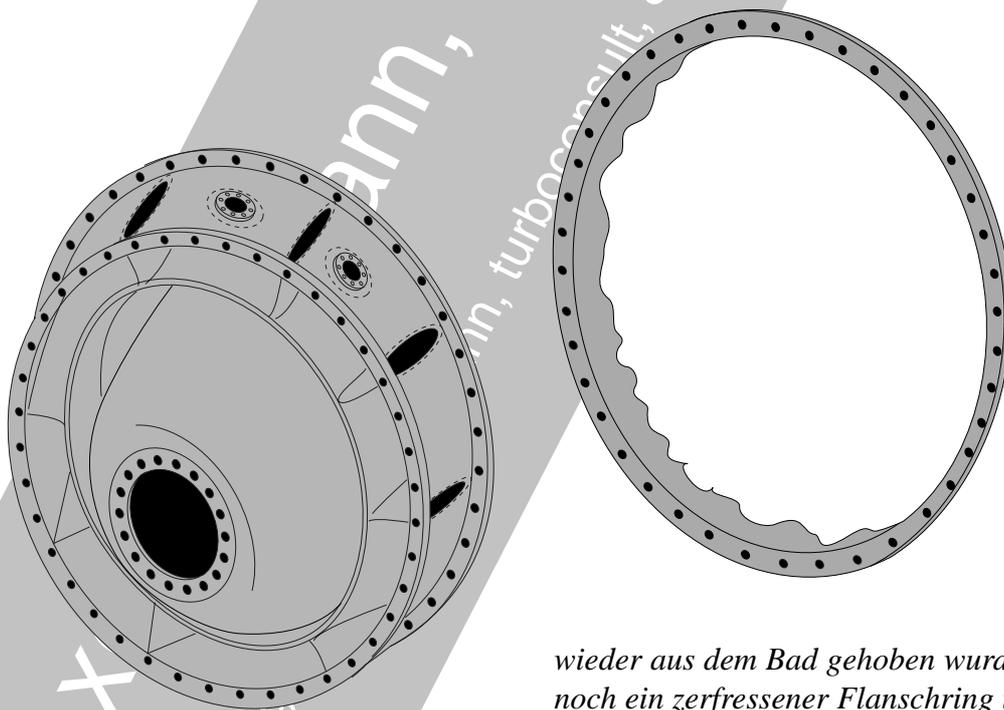


Bild 37

Dieses Bild stellt einen tatsächlich aufgetretenen **Schadensfall** dar. Es handelt sich um ein kompliziertes Verdichtergehäuse aus einem niedrig legierten Stahl. Im Zuge der Überholung sollte das Teil geätzt werden. Irrtümlicherweise wurde es in ein **falsches Bad** getaucht. Als nach der vorgeschriebenen Zeit das Teil

wieder aus dem Bad gehoben wurde, war nur noch ein zerfressener Flanschring übrig. Aus diesem Fall können wir einige Schlüsse ziehen:

Die Bäder waren offenbar nicht **unverwechselbar gekennzeichnet**, und/oder die **Einweisung des Werkers** war nicht ausreichend.

Der Werker hätte die ungewöhnliche **Blasenbildung** durch die **heftige Reaktion des Bauteils mit dem Bad** beobachten müssen. Anscheinend fand eine solche Überwachung des Ätzprozesses nicht statt.

38. Wenn „Nacharbeit“ notwendig wird (Beseitigung von Fertigungsschäden durch Nacharbeit)

Trotz des Nullfehlerkonzepts treten offenbar immer wieder Fehler in der Fertigung auf, bei denen relativ geringfügige Fehler zum Ausschuss von sehr teuren und/oder sonst nicht verfügbaren Teilen führen. Dies hängt wohl damit zusammen, dass, wie es schon große Dichter erkannten, alles was aus Menschenhand ist, nicht absolut fehlerfrei ist.

Wie ich das Problem sehe:

Was tun, wenn also doch einmal passiert, was nie hätte passieren dürfen? Dann ist „**Nacharbeit**“ angesagt. Dies darf aber nicht eine Nacharbeit von der Art sein: „Jetzt probieren wir erst einmal die Sache wegzupolieren“. Damit wird die Chance einer späteren erfolgreichen und professionellen Nacharbeit gemindert. Es ist auch denkbar, dass durch eine solche Nacharbeit Verfestigungen durch Kugelstrahlen oder den vorschriftsmäßigen Bearbeitungsprozess entfernt werden, und so die Bauteilfestigkeit gemindert wird. Das undefinierte **Herauserodieren von abgebrochenen Werkzeugen** wie Bohrern kann z.B. zu gravierenden **Schäden in der Bohrung** führen, die, wenn sie unerkannt bleiben, einen Bauteilbruch im Triebwerk nach sich ziehen können. Grundsätzlich sind nur zugelassene und dokumentierte Verfahren für die Nacharbeit anzuwenden. Es gibt eine Vielzahl erprobter und bei richtiger Anwendung sicherer **Nacharbeitsverfahren**, mit denen sich Oberflächenfehler zur Zufriedenheit der zuständigen Fachabteilungen beseitigen lassen. Die **Auswahl** des geeigneten Verfahrens sollte dieser Abteilung überlassen bleiben. Sie muss zuerst feststellen, ob es sich überhaupt um einen nachbearbeitbaren Fehler handelt. Dann ist zu ermitteln, um was für einen Fehler es sich handelt, damit gezielte, **vorbeugende Maßnahmen** ergriffen werden können. So kann sicher gestellt werden, dass dieses Problem nicht bei weiteren Teilen auftritt. Für den Umfang der Nacharbeit ist die sichere Ermittlung von Ausdehnung und Tiefe der Schädigung Voraussetzung. Hierfür können **Laboruntersuchungen** notwendig werden.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Wird ein Fehler entdeckt, ist die zuständige Fachabteilung zu benachrichtigen, um die **Fehlerart, den Fehlerumfang und die Nacharbeitsfähigkeit** zu begutachten.
- **Unzulässig ist die eigenmächtige Nacharbeit**. Auch ein undefiniertes Überpolieren kann bereits die Bauteilfestigkeit beeinträchtigen.
- Das **Auserodieren von Werkzeugbruch darf in keinem Fall eigenmächtig** erfolgen. Hier ist immer die Zustimmung der zuständigen Fachabteilungen einzuholen.
- Nacharbeiten sind **genauestens zu dokumentieren** und nachvollziehbar dem individuellen Teil zuzuordnen.
- Unsere Vorgesetzten wissen, dass es ihre primäre Aufgabe ist, bei einem gemeldeten Fehler nicht den Überbringer der schlechten Nachricht zu strafen, sondern gemeinsam mit diesem **Abhilfemaßnahmen zu erarbeiten** und einzuleiten.

Typische Fertigungsfehler mit unterschiedlichen Chancen einer erfolgreichen Nacharbeit.

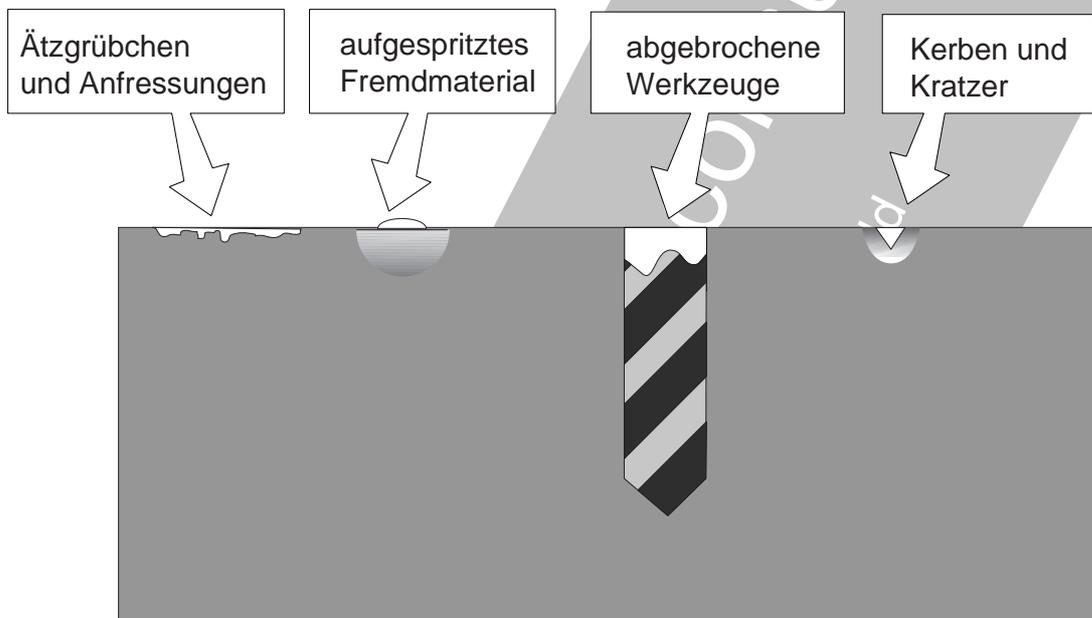


Bild 38

Dieses Bild zeigt typische **Beschädigungen und Veränderungen** der Bauteiloberfläche durch Fertigungseinflüsse. Bei den sehr wertvollen Triebwerksteilen muss in einem solchen Fall die Möglichkeit einer eventuellen Nacharbeit genutzt werden. Voraussetzung für eine **Nacharbeit** ist, dass das Bauteil nach dieser die selben positiven Betriebseigenschaften wie das unbeeinflusste Neuteil aufweist.

Grundsätzlich müssen die Verfahren vorher mit den zuständigen Fachabteilungen abgesprochen und von diesen schriftlich durch geeignete Dokumente angewiesen werden. Selbstverständlich hat ein OEM, der die Teile selbst ausgelegt und die Betriebstauglichkeit nachgewiesen hat, mehr Spielraum als ein Untertierlieferant. In einem solchen Fall muss sich der Untertierlieferant vom OEM immer vor der Reparatur die ausdrückliche Zustimmung einholen. Eigenmächtige Änderungen ohne ausreichende Dokumentationen sind absolut verboten.

Wichtig ist, dass der Schaden unverändert den Fachabteilungen zur Entscheidung vorgelegt wird. **Polieren oder Abarbeiten** verändert die Fehlstelle so, dass es auch für den Fachmann äußerst schwierig ist, die Schadensart, das Schadensausmaß und die Auswirkung auf das Bauteil ausreichend sicher abschätzen zu können.

Für die **Schädigungstiefe** ist z.B. von Bedeutung, ob aufgespritztes Material geschmolzen war und mit dem Grundwerkstoff reagierte. Die Zusammensetzung des aufgespritzten Materials und des Grundwerkstoffs sagt dem Fachmann etwas über die zu erwartende Tiefe der Reaktionszone und die Art der Schädigung. Bei Ätzgrübchen besteht immer auch der Verdacht auf eine Mikrorissbildung entlang den Kristallgrenzen. Um sicher zu stellen, dass solche Risse nicht vorhanden sind, sind besondere Verfahren notwendig. Ein **Verschmieren der Risse** durch Auspolierversuche erschwert diese Arbeit.

39. Eine „strahlende“ Zukunft (Mögliche Probleme bei unterschiedlichen Strahlverfahren)

Es gibt verschiedene **Strahlverfahren zur Oberflächenbehandlung**, z.B. zum Verfestigen, zur Aufräuhung und Aktivierung, zur abrasiven Reinigung und zur Entfernung von Schichten, um nur einige Anwendungen zu nennen. Diese Verfahren sind für die Qualität unserer Bauteile von besonderer Bedeutung. Ihre Vorzüge sind aber nur gewährleistet, wenn dieses scheinbar simple Verfahren selbst fehlerfrei durchgeführt wird.

Wie ich das Problem sehe:

Bei allen Strahlverfahren werden Partikel auf die Bauteiloberflächen „geschossen“. Das Trägermaterial kann dabei ein Luft- oder Wasserstrahl sein. Beim Kugelstrahlen wird nicht Material abgetragen, sondern es wird verfestigt. Dazu werden Kügelchen verwendet, die je nach Anwendungsfall aus Stahl, Keramik oder Glas bestehen können. Bei abrasiven Strahlverfahren wie dem Strahlen mit Aluminiumoxid zerspanen (bei zähen Metallen) oder zersplittern (bei spröden Schichten) kleine, harte Kristalle im Mikrobereich die Oberfläche.

Wenn z.B. die Kügelchen beim **Kugelstrahlen** bereits vom öfteren Auftreffen zerbrochen sind, können die harten Bruchstücke Kerben in die Oberfläche einschlagen und das Gegenteil vom erwünschten Effekt erzeugen. Statt einer Verfestigung entsteht eine Schwächung. Wird **Strahlgut verunreinigt**, z.B. durch abgetragene Verunreinigungen der Bauteile, durch abgestrahltes Schichtmaterial oder durch ungeeignete Abdeckmaterialien, kann dieses Strahlgut bei erneuter Anwendung und nicht ausreichender Reinigung die Bauteile verunreinigen. Wurde z.B. **Bleiband als Abdeckmaterial** verwendet, so können abgetragene Bleipartikel mit dem Strahlgut auf saubere Oberflächen gelangen, und hier bei Heißeilen im Betrieb oder bei einer Wärmebehandlung tiefgehende **Anschmelzungen** hervorrufen.

Auch das Strahlgut selbst kann sich auf der Metalloberfläche abreiben und hier zu unerwünschten Erscheinungen führen. Typisch ist z.B. das „**Rosten**“ von mit Stahlkugeln gestrahlten **Titan- und Nickellegierungen**. In diesem Fall rostet der Stahlkugelabrieb, was zumindest optisch für Neuteile nicht akzeptiert wird.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Das auf die Bauteiloberfläche auftreffende **Strahlgut muss sauber sein**.
- **Abdeckungen für Bohrungen** oder nicht zu strahlende Zonen dürfen nicht aus Werkstoffen bestehen deren **Abrieb** Heißeile schädigen können. Zu den ungeeigneten Werkstoffen in diesem Sinn gehören Abdeckungen aus Blei. **niedrig schmelzende Metalle**, wie sie zum Eingießen für die Handhabung der Teile verwendet werden, haben ebenfalls in den Strahlkabinen nichts zu suchen.
- **Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen** (z.B. Leichtmetalle und Nickellegierungen) sollten nur dann mit dem selben Strahlgut in der gleichen Anlage behandelt werden, wenn die Fachabteilung dies als unbedenklich erklärt hat.
- Der Strahlprozess und insbesondere das Strahlgut müssen auf ihre Veränderungen beim Gebrauch hin **überwacht** werden. Beim Strahlgut ist dies z.B. der Anteil von **Strahlgutbruch**, Veränderungen der Korngröße und **Verunreinigungen**.

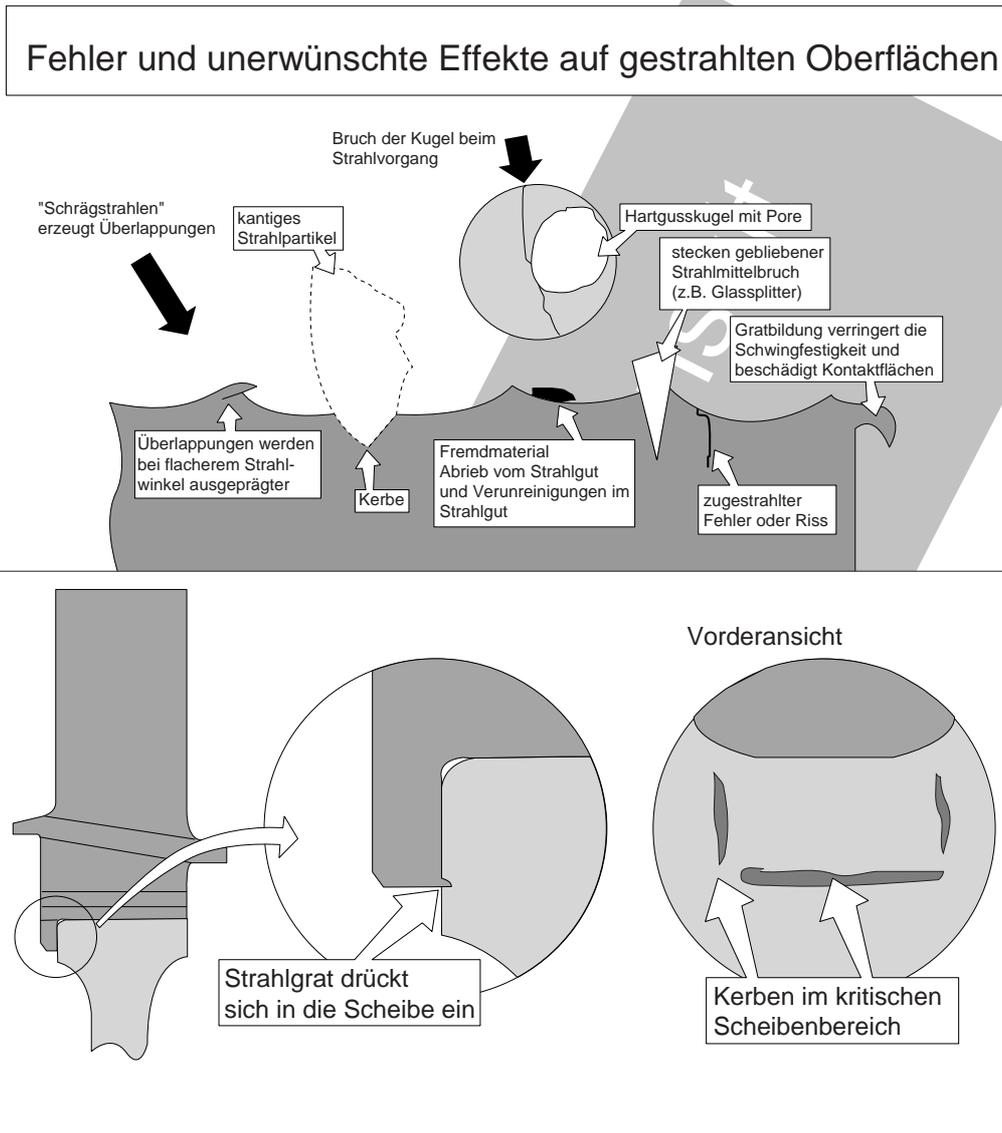


Bild 39

So hilf- und segensreich Strahlverfahren wirken können, gilt auch hier: „Wo Licht ist, ist auch Schatten“. Um ein optimales, wie vom Konstrukteur vorgesehenes Ergebnis zu erzielen, muss das Verfahren mit seinen Parametern stabil sein und richtig angewandt werden. Zersplittertes oder abgenutztes **Strahlgut muss rechtzeitig ausgetauscht** werden. Geschieht dies nicht, kann z.B. die Schutzwirkung der Kugelstrahlbehandlung nicht eintreten. Solche Bauteile sind im Betrieb unerwartet empfindlich gegen Kratzer, oder sie halten die üblichen, sonst harmlosen Schwingungen nicht aus. Strahlgutsplitter können gefährliche Kerben in die Bauteiloberfläche schneiden, in denen sich dann im Betrieb Risse bilden können.

Verunreinigungen im Strahlgut, z.B. von verschmutzten oder besonders beschichteten Teilen, können auf der Strahlfläche kleben bleiben. Es ist zu erwarten, dass sie dann bei nachfolgenden Wärmebehandlungen und/oder Beschichtungen große Probleme machen. Entstehen z.B. punktenartige Schichtfehler, kann an diesen später im Betrieb die Oxidation angreifen. Wird Blei oder Silber aufgeschmiert, und das Teil nachher geglüht, so kann es zu gefährlichen Anschmelzungen des Grundwerkstoffs kommen, was mit hoher Wahrscheinlichkeit zur Unbrauchbarkeit des Bauteils führt. Trifft der Partikelstrahl schräg, statt wie normalerweise erwünscht senkrecht auf die Oberfläche auf, kann es Überschmierungen und

Überlappungen geben, die wieder als Risse wirken.

Kanten sind gewöhnlich besonders hoch belastet. Beim Strahlen scharfer **Kanten** muss mit ausgeprägter **Gratbildung** („**Elephant tail**“) gerechnet werden. Solche Grate haben eine gefährliche Kerbwirkung am Bauteil selbst und auch an Auflageflächen zu anderen Bauteilen.

Das Bild zeigt einen Fall, bei dem die **Gratbildung an den Haltenasen von Turbinen-**

rotorschaukeln die Scheibe an einer lebensdauerbestimmenden kritischen Stelle durch die Bildung von Kerben beschädigte.

Ein Abarbeiten der Grate an Kanten nach dem Kugelstrahlen ist gefährlich, weil dadurch die erwünschte Wirkung des Kugelstrahlens mit entfernt werden kann. Die Kanten müssen vor dem Strahlen ausreichend gerundet und der Strahlprozess auf das Bauteil abgestimmt sein, um eine unzulässige Gratbildung zu vermeiden. Die Aufgabe des Konstrukteurs ist es die Kantenradien geeignet festzulegen.

40. Auf Werkzeugmaschinen sollte man nicht „pfeifen“. (Schädigung von Bauteilen durch Schwingungen bei der mechanischen Bearbeitung)

Im Volksmund „pfeift man nicht auf Dinge“, die einem wichtig sind. Man kann die Überschrift aber auch wörtlich nehmen, das heißt: Pfeifgeräusche bei Bearbeitungsvorgängen können eine Schädigung des Bauteils ankündigen.

Wie ich das Problem sehe:

Pfeifgeräusche entstehen, wenn Teile vibrieren. Wir kennen das vom Quietschen der Bremsen unseres Autos. In diesem Fall schwingen die Bremsscheiben. Hier ist vielleicht nur das Geräusch unangenehm. Pfeifen aber Bauteile bei der Zerspanung, so ist dies ein Zeichen dafür, dass sie gefährlich stark schwingen können. Diese Schwingungen bedeuten dann eine hohe Belastung des Bauteils. Dabei entstehen möglicherweise Risse, die mit einer anschließenden Eindringprüfung auffindbar sind. Es kann aber auch eine unsichtbare Schädigung auftreten, die wir erst an einer kürzeren Lebensdauer im Betrieb erkennen. Egal, ob das Teil durch Risse unbrauchbar wird oder im Betrieb versagt, beides muss unbedingt vermieden werden.

Besonders empfindlich für solche Schwingungen sind die Blätter von Verdichter- und Turbinenschaufeln. Sie schwingen wie eine Geigensaiten wenn der Bogen darüberstreicht. In unserem Fall ist die Schaufel die Saite, das Werkzeug beim **Bearbeitungsvorgang** der Bogen. Beschaukelte Scheiben werden beim **Überschleifen der Schaufelspitzen** angeregt. Beim Fräsen der Schaufeln an **Blisks** (Scheiben mit „angewachsenen“ Schaufeln) ist besondere Vorsicht geboten, weil diese Bauteile nicht durch eingeschobene Schaufelfüße gedämpft werden.

Wir sollten also bei der zerspanenden Bearbeitung besonders „hellhörig“ sein. Es gibt eine Reihe von praktikablen Maßnahmen solche Schwingungen zu vermeiden, wir müssen sie nur rechtzeitig anwenden.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Die Arbeitsvorbereitung erkennt **schwinggefährdete Bauteile** und sieht geeignete **Dämpfungmaßnahmen** vor. Bewährt haben sich Gummianlagen, Klebebänder, Eingießmassen usw.

- Vorgeschriebene Dämpfungen werden konsequent angewendet und ihr **funktionsfähiger Zustand** erhalten.
- Treten bei einem Arbeitsgang **intensive Pfeifgeräusche** auf, sprechen wir die zuständige Arbeitsvorbereitung daraufhin an. Bevor gezielte Maßnahmen ergriffen werden, ist von der Fachabteilung für Schwingungsprobleme zu ermitteln, ob die Pfeifgeräusche von einer für das Bauteil gefährlichen Schwingung herrühren.
- Bei der **Fertigungserprobung** von Zerspanungsvorgängen ist dafür zu sorgen, dass die Bauteile nicht zu gefährlichen Schwingungen angeregt werden können. Die Erprobung muss die **Abnutzung von Zerspanungswerkzeugen oder Schleifscheiben** mit umfassen.
- Falls bei Bauteilen der **Verdacht einer Schwingschädigung** durch den Fertigungsprozess besteht, sollte sofort eine geeignete Rissprüfung durchgeführt werden.

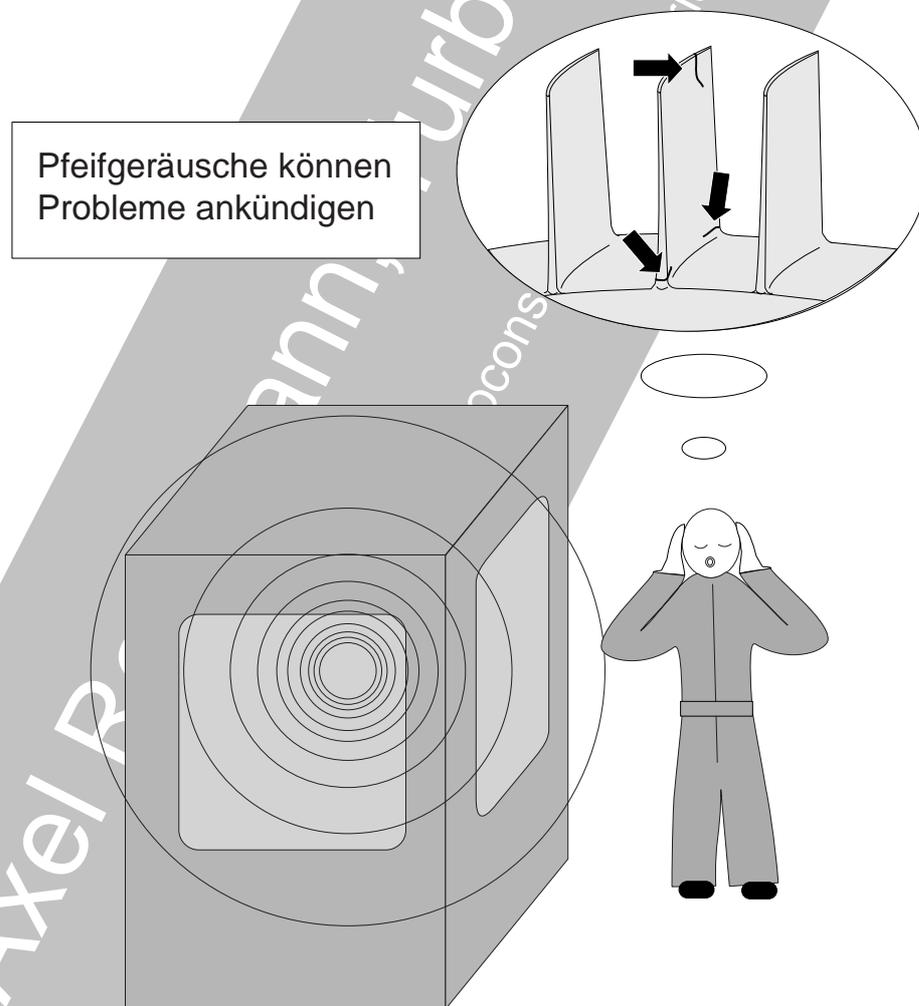


Bild 40

Zerspanende Verfahren wie Fräsen, Drehen und Schleifen können **dünnwandige Bauteile zu Schwingungen anregen**. Besonders gefährdet sind erfahrungsgemäß **Schaufeln**, die je nach Schwingungsform an unterschiedlichen Stellen **einreißen** können (Pfeile).

41. Gut aufgelegt, wenn nicht der Wurm drin sein soll. (Flanschbeschädigungen vermeiden!)

Flanschverbindungen sind gewöhnlich hoch beanspruchte Bauteilzonen. Beschädigungen können Rissbildung und ein Versagen der verschraubten Bauteile wie Rotoren oder Gehäuse auslösen. Die Fachliteratur berichtet z.B. über geborstene Brennkammergehäuse mit umfangreichen Folgeschäden durch den explosionsartigen Austritt heißer Gase. Es lohnt sich also, dass wir uns mit diesem Problem befassen, um unseren Beitrag zum Vermeiden solcher Schäden leisten zu können.

Wie ich das Problem sehe:

Flansche, die hoch belastete Bauteile wie Gehäuse, Verdichter-, Turbinen- oder Brennkammergehäuse, die unter hohem Innendruck stehen, oder Scheiben von Rotoren mit extremen Fliehkraftbelastungen verbinden, sind selbst entsprechend hoch belastet. Im Bereich der Bohrungen sind die Belastungen besonders hoch. Ähnliches gilt auch für Anlageflächen von Rotorscheiben. So sind solche Bereiche nicht selten lebensdauerbestimmende Zonen der Bauteile. Unachtsamkeiten bei Fertigung und Montage können zu unzulässigen Beschädigungen beitragen. Zwei typische Fälle sollen dies verdeutlichen:

Sind die **Anlageflächen der Flansche** nicht ausreichend sauber, befindet sich z.B. ein hartes Sandkörnchen oder ein kleiner Span beim Verschrauben zwischen diesen Flächen dann kann nach der Demontage eine Flanschfläche wie ein Baumstamm unter der Rinde aussehen, wenn der Borkenkäfer tätig war. Es handelt sich um Fremdpartikel zwischen den Flanschen, die sich unter den elastischen Mikrobewegungen der Flansche im Betrieb radial nach außen bewegen. Dabei hinterlassen sie die beschriebenen Spuren. Eine solche Spur ist natürlich wie eine Kerbe einzuschätzen und muss vermieden werden.

Weisen Turbinenschaufeln an den Nasen der Füße, die ein axiales Verschieben verhindern, **Grate** auf (z.B. durch zu sorgloses **Kugelstrahlen**), kann es gefährlich werden. Werden die Schaufeln in die Scheibe eingeführt, und die Nase für einen spielfreien Sitz fest gegen die Scheibe gedrückt, prägt sich der Grat ausgerechnet in eine besonders hoch belastete Scheibenzone ein (Kapitel 39). Dabei entstehen scharfe Kerben. Diese Schädigung kann durch Vibrationen der Schaufeln noch verstärkt werden, also ein bedenklicher Zustand.

Das bedeutet für unser Handeln:

- **Anlageflächen** wie Flanschflächen oder Schaufelanlagen müssen vor der Montage **sauber** sein. **Auf harte Partikel wie Strahlgut oder Bearbeitungsspäne ist besonders zu achten.**
- Zeigen sich **bei der Demontage „Wurmspuren“** auf Flanschen oder Anlageflächen, ist dies ein Zeichen dafür, dass Partikel zwischen die Flansche geraten sind. Ein Audit in der Montage kann dann nicht schaden.
- Sind „Wurmspuren“ auf Anlageflächen vorhanden, müssen für die **Beurteilung der Zuverlässigkeit** und einer möglichen **Nacharbeit** die zuständigen Fachabteilungen wie Qualitätssicherung und „Festigkeit“ hinzugezogen werden.

- **Grate an Auflageflächen** sind unbedingt zu vermeiden, weil sie in der Gegenfläche gefährliche Beschädigungen erzeugen können. Das gute, **zeichnungsgerechte Entgraten** unserer Bauteile ist deshalb sehr wichtig.
- Bei der **Montage** achten wir darauf, dass sich besonders im Bereich der Anlageflächen keine Grate befinden.

Wenn bei der Montage Partikel zwischen Flansche geraten können dort im Betrieb gefährliche Riefen entstehen.

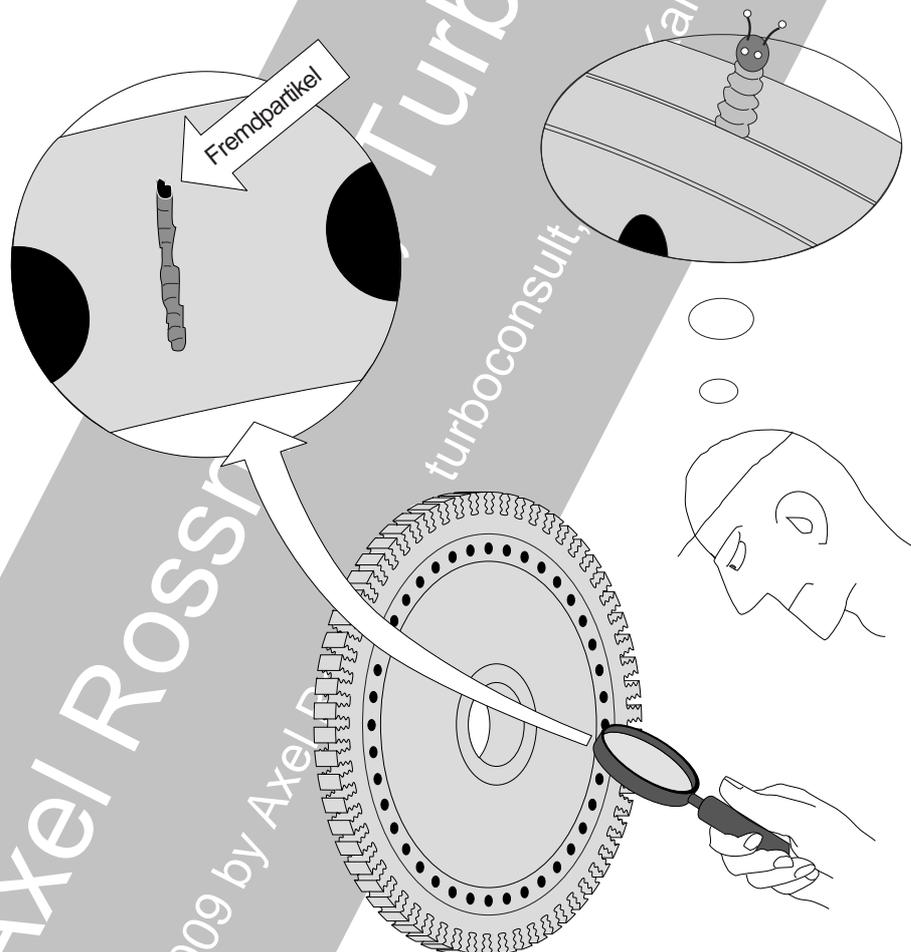


Bild 41

*Flansche können im Betrieb durch **eingeklemmte Partikel** beschädigt werden. Typisch für solche Beschädigungen sind vorzugsweise radial verlaufende Kerben. Betrachtet man diese linienartigen **Einprägungen**, die wie ein ge-*

*öffnetes Wurmloch oder eine winzige Spur eines Autoreifens aussehen (Man nennt ähnliche Erscheinungen auf Bruchflächen auch Reifenspuren, englisch „**tire tracks**“.), unter dem Mikroskop so erkennt man am Ende der Spur den **Fremdpartikel** (Pfeil).*

42. Eine „Bananenschale der Technik“. (Hochtemperatur-Schmiermittel als Verunreinigungen)

Wer schon einmal an seinem Auto einen alten Auspuff austauschen musste kennt das Problem aus leidvoller Erfahrung. Die Schrauben sind verzundert und verrostet. Sie wollen nicht mehr aufgehen und müssen mit Gewalt geöffnet werden, wobei sie gewöhnlich abbrechen. Die neuen Schrauben müssen dann geeignet beschichtet sein und/oder mit einem Fett behandelt werden, damit die Schraubkraft ausreicht. Im Triebwerksbau hat man es mit ähnlichen Problemen an Heißeilen aus Brennkammer und Turbine zu tun. Hier ist das kontrollierte Anziehen und schadensfreie Lösen von Verschraubungen vergleichbar. Hilfe bringt ein geeignetes Fett, das trotz der hohen Bauteiltemperaturen ein schädliches Festsitzen der Muttern verhindert. Auch im Fertigungsprozess kommen solche Hochtemperaturfette zur Anwendung. Beispiele sind das plastische Verformen heißer Bleche (Tiefziehen, Biegen, Drücken) um die Reibung zur Werkzeugfläche zu minimieren. Werkstücke können abrasiv und/oder in Bädern von Fettresten gereinigt werden. Dieser Schritt wird auf „hinterhältige“ Weise gefährlich. Schwimmen z.B. die abgelösten Reste auf dem Reinigungsbad besteht die Gefahr der Verschleppung auf andere Bauteile. Beim Herausziehen aus dem Bad bleiben Verunreinigungen haften. Auch Strahlgut kann Verunreinigungen übertragen. Wird mit Fett an Schrauben hantiert ist es denkbar, dass bei Handling andere Bauteile von Fetts Spuren verschmutzt werden.

Wie ich das Problem sehe:

Gerade die günstigen Eigenschaften eines **Hochtemperatur-Schmiermittels** kann dort, wo es nicht hingehört unerwünscht, ja sogar gefährlich sein. Medien wie **Bornitrid (BN)** und **Grafit** könnten die Reibung da, wo eben diese benötigt wird, herabzusetzen.

Ein Beispiel sind **Reibschweißungen**. Dieses Verfahren erzeugt hochfeste Verbindungen die besonders an entsprechend belasteten Bauteilen wie Rotortrommeln und Wellen zum Einsatz kommen. Das sogenannte Lineare Reibschweißen erweitert die Anwendung indem Schaufeln auf **Blisks** geschweißt werden.

Die Qualität bzw. Festigkeit einer solche Schweißung hängt nicht zuletzt von den Reibverhältnissen an der Schweißstelle ab. Verändern sich diese gegenüber den abgesicherten Parametern ist die Qualität der Verbindung potentiell betroffen. Dabei genügen an hochbelasteten Bauteilen auch scheinbar sehr kleine örtliche Fehlstellen in der Naht für ein Risswachstum im Betrieb. Besonders unangenehm, solche **Fehlstellen** sind nachträglich nur **sehr schwer zerstörungsfrei zu finden**.

Das bedeutet für unser Handeln:

- **Hochtemperaturschmiermittel nur für den vorgesehenen und abgesicherten Zweck verwenden. Eigenmächtige Anwendung solcher Stoffe ist unzulässig.** Als problematisch sind auch andere Verunreinigungen, z.B. auf **Silikonbasis** oder **Teflonbasis** zu sehen.
- **Vorsicht beim Reinigen von Bauteilen** mit Resten von Hochtemperaturschmiermittel. Das gilt besonders für abrasives Strahlen und Reinigungsbäder. Eine **Verschleppung** ist unbedingt zu vermeiden. Hierzu ist gegebenenfalls der Rat der zuständigen Fachabteilung einzuholen.
- Trennung der Reinigungsverfahren in der **Neuteilfertigung** von Verfahren für die **Überholung**.

Medien die den Reibbeiwert herabsetzen können dort, wo sie nicht hingehören, gefährlich werden.

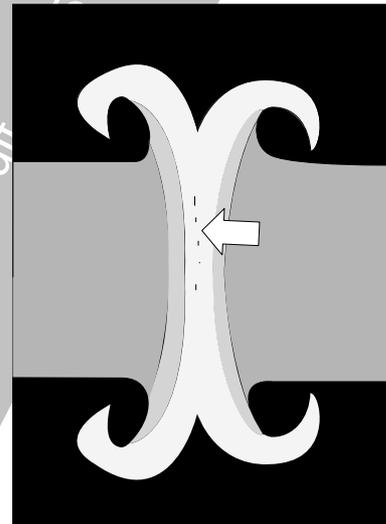
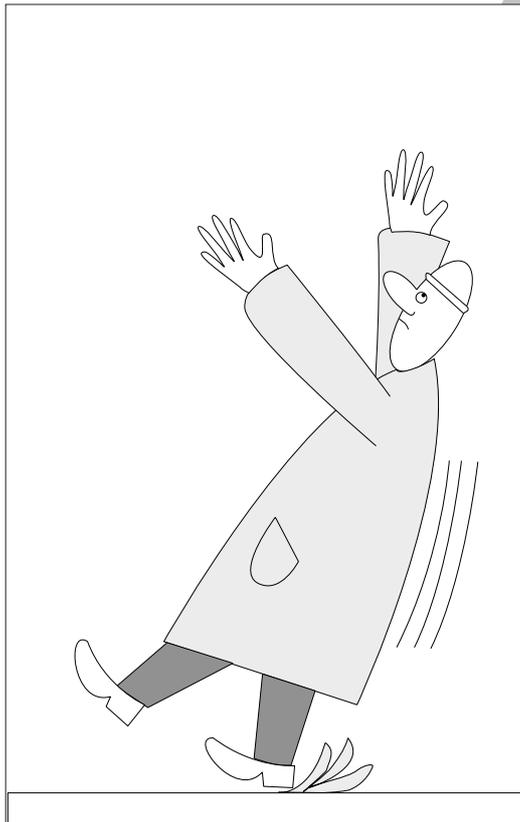


Bild 42

Das vorgesehene **Reibungsverhalten** ist für manche Fertigungsprozesse Voraussetzung eines stabilen Verfahrens und damit der erforderlichen Qualität. Besonders das **Reibschweißverfahren** ist auf gleichbleibende Reibverhältnisse angewiesen. Werden diese örtlich, z.B. von einem **Hochtemperatur-Schmiermittel** verändert, sind **Klebestellen** (engl. „**Kissing Bonds**“) in der Schweißnaht (Pfeil) zu befürchten. Die sind nicht mit ausreichender Sicherheit zerstörungsfrei aufzufinden. Im Betrieb besteht die Gefahr, dass von solchen Fehlstellen Risse ausgehen und die Bauteilsicherheit gefährden.

43. Vor Gebrauch Schütteln!

(Entmischte Stoffe können den Fertigungsprozess empfindlich stören)

Auf jeder Spraydose steht zumindest sinngemäß: „Vor Gebrauch gut schütteln“. Diese Anweisung hat ihren Grund. Wird nicht geschüttelt weicht das Resultat von unseren Erwartungen ab. Der Handwerker kennt es: Da werden beim Lackieren Farben flau, decken nicht und verschandeln mit Tränen die lackierte Fläche. Die Weiblichkeit weiß: Ein wirkungsloser Haarfestiger kann den Struwelkopf nicht verhindern.

Schon in den „Fertigungsprozessen“ des modernen Haushalts ist das Schütteln einer Spraydose Voraussetzung für ein befriedigendes Ergebnis. Wie viel wichtiger ist dies wohl für die anspruchsvollen Beschichtungsprozesse des Triebwerksbaus.

Wie ich das Problem sehe:

Warum werden eigentlich Sprühdosen geschüttelt? Sicher nicht um wie bei manchen Zeitgenossen die Aufmerksamkeit zu erzwingen. In der Sprühdose befindet sich zusammen mit dem Lack eine vergasende Trägerflüssigkeit. Beide Komponenten sind üblicherweise verschieden schwer und entmischen sich über längere Zeit. Wenn wir jetzt die Sprühdüse betätigen wird vom Ansaugrohr nur die Trägerflüssigkeit erwischt. Das Schütteln, meist unterstützt von einer klappernden Perle, sorgt für das richtige Beschichtungsgemisch in der Düse. Für Fertigungsprozesse können Vibrationen von Behältern abgesehen von dem „guten“ Schütteln unerwünschte Folgen haben.

Gerade im Gegensatz zum Schütteln kann es **bei Vibrationen zur Entmischung** kommen. Eine Entmischung beschränkt sich nicht nur auf Flüssigkeiten. **Auch Pulver neigen zur Entmischung** wenn Vibrationen einwirken. Dies ist beim Transport oder auf einem vibrierenden Hallenboden der Fall. Dichteunterschiede die auf kleinen Unterschieden in der Zusammensetzung verschiedener Pulverchargen beruhen, können dafür bereits ausreichen. Auch Größe, Form und Rauigkeit der Pulverkörner kann sich bemerkbar machen. Öffnet man z.B. eine Tonne mit **Spritz-, Lot- oder Sinterpulver** bevor man diese gut durchgemischt hat, kann es zu **unerwarteten Ergebnissen** kommen: Schichten sintern nicht, sondern schmelzen und zerstören die Bauteile. Lote binden nicht weil sie nicht ausreichend aufschmelzen. Diffusionsschichten sind zu spröde oder bieten keinen ausreichenden Oxidationsschutz. Spritzschichten sind zu weich oder zu hart und erweisen sich so für ihren Verwendungszweck als ungeeignet. Auch mit Pulvern aufgeschweißte Panzerungen können betroffen sein.

Bei der Herstellung von pulvermetallurgischen Bauteilen werden Blechkannen der Rohteilform mit Pulver gefüllt und dann im Vakuum verschweißt. Werden solche Kannen dann zur Sinterpresse (HIP) transportiert ist eine Entmischung möglich. Beispielsweise hat dann die Turbinenscheibe auf einer Seite ein vollkommen anderes Gefüge als im restlichen Querschnitt.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Gemische vor der Verarbeitung entsprechend den Vorschriften gut **durchmischen**.
- Besonders Pulver müssen vor der Verarbeitung gut durchgemischt werden. Dies hat nach

klaren **Vorgaben** zu erfolgen um nicht den gegenteiligen Effekt zu erzielen.

- Zeigen Beschichtungen **Abweichungen wie Anomalien** oder Zonen mit veränderten Betriebseigenschaften ist das Beschichtungspulver auf eine eventuelle Entmischung zu überprüfen.
- In den einschlägigen **Arbeitsanweisungen** ist auf einen notwendigen Mischvorgang hinzuweisen. Die Zeitabstände einer erneuten Durchmischung sind anzugeben.
- **Behälter** mit Pulverfüllungen sollten **nicht auf vibrierenden oder rüttelnden Böden** gelagert werden.

Auch Pulver müssen vor Gebrauch gut gemischt werden um Qualität zu gewährleisten. Das ist besonders bei Sintern, Lötten und thermischem Spritzen zu beachten.

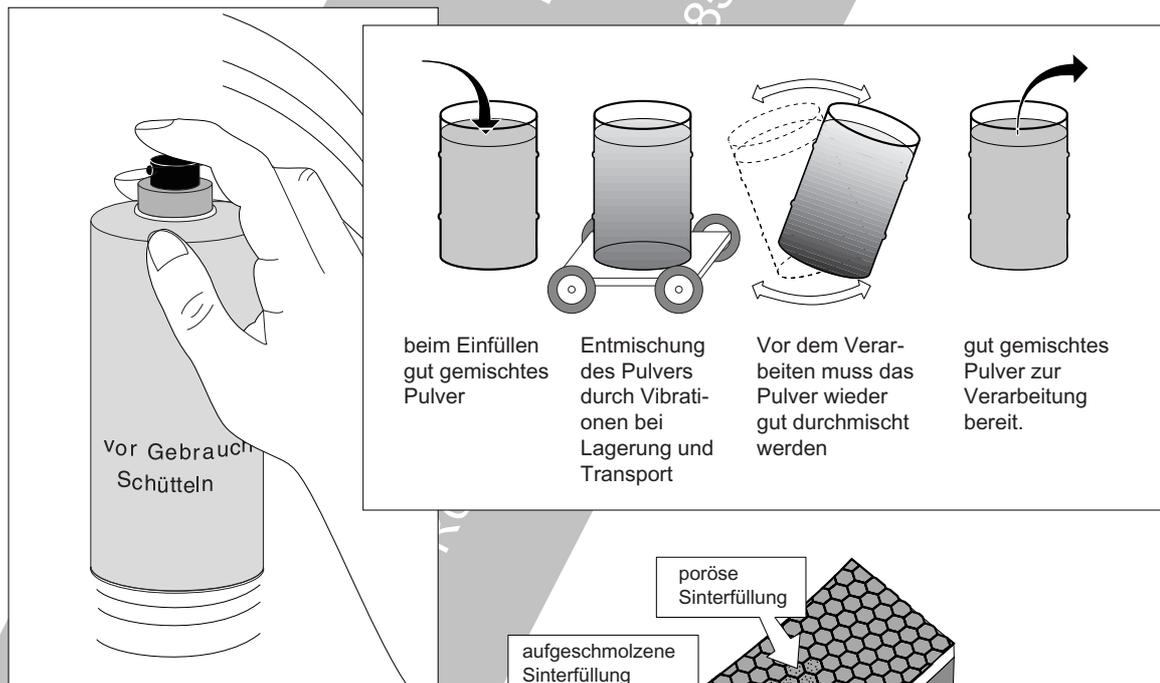
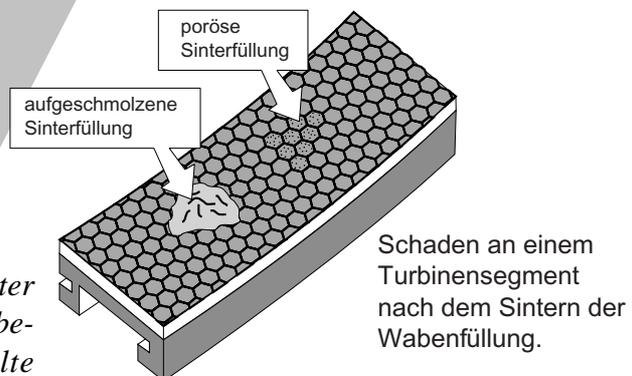


Bild 43

Die **Entmischung von Pulvern** erfolgt unter **Vibration bei Lagerung und Transport**. So besteht die Gefahr, dass daraus hergestellte Schichten, Schweißungen, Lötungen und pulvermetallurgische Werkstoffe unzulässige Eigenschaften erhalten. Um dies zu verhindern sind die **Pulver vor der Verwendung geeignet zu mischen**.



44. Nacharbeit ist eine Verantwortungsvolle Aufgabe. (Ungeeignete Nacharbeit kann das Betriebsverhalten eines Bauteils unzulässig verändern)

Eine kleine Unachtsamkeit und schon hat das Auto eine kleine Schramme. Ärgerlich, aber für uns als „Do-it-Yourself-erprobt“ kein ernstzunehmendes Problem. Ein wenig Schleifen, Spachteln und einige örtliche Lackierungen später ist das Problem behoben. Selbst die kritische Umwelt hat nichts gemerkt und Schadenfreude bleibt aus. Diese Vorgehensweise ist durchaus sinnvoll, wenn die Sicherheit offensichtlich nicht beeinflusst ist. Empiehltsich ein solches Vorgehen auch an Bauteilen von Triebwerken?

Wie ich das Problem sehe:

Bauteile von Triebwerken sind gewöhnlich äußerst wertvoll. Man wird also kein Teil wegen eines kleinen Schönheitsfehlers wegwerfen. Gehört dazu eine örtliche **Verfärbung** weil offenbar eine bearbeitete Zone etwas über das übliche Maß warm wurde? Zählt die kaum sichtbare **Einbrandkerbe**, weil ein Funke an einer elektrischen Kontaktierunsstelle entstand, zu den Schönheitsfehlern? Fast reflexartig wird zum feinen Schmirgelleinen und/oder Polierpapier gegriffen. Ein paar mal drüber und schon ist nichts Auffälliges zu sehen.

In diesem Moment haben wir die Situation möglicherweise bereits gravierend verschärft. Nun besteht die Wahrscheinlichkeit, dass diese Nacharbeit nicht mehr erkannt wird, möglicherweise aber doch sicherheitsrelevant ist.

Treten Bedenken auf, oder wird die Nacharbeit später wider Erwarten erkannt sind möglicherweise wichtige Indizien entfernt. Sie hätten Rückschlüsse auf Entstehungsursache und Risiko für dea Bauteilverhalten sowie gezielte Abhilfen ermöglicht. **Spontan nachgearbeitet ist eine Beurteilung unbefriedigend bis unmöglich.**

Wird die Nacharbeit nicht erkannt, steigt das Risiko. Das gilt besonders, wenn sie sich in einer hochbeanspruchten Zone des Bauteils befindet. Eine Schädigung muss jedoch oberflächlich nicht unbedingt erkennbar sein. Es ist durchaus möglich, dass sie deutlich **tiefer als die Nacharbeit** wirkt. Örtliche Erhitzungen können dann die Festigkeit des verbliebenen Werkstoffs abgesenkt haben. Zusätzlich ist mit bleibenden Zugspannungen zu rechnen welche die Schwingfestigkeit gefährlich absenken. Rückschlüsse auf solche schädigenden Einflüsse sind nur mit **Laboruntersuchungen** möglich. Sie müssen **nicht zerstörend** sein, sodass die Chance besteht, das wertvolle Stück zu retten. Dafür ist jedoch ein festgeschriebenes, möglicherweise auf den individuellen Fall abgestimmtes und **dokumentiertes Vorgehen** notwendig. Gegebenenfalls in Abstimmung mit dem Konstruktionsverantwortlichen.

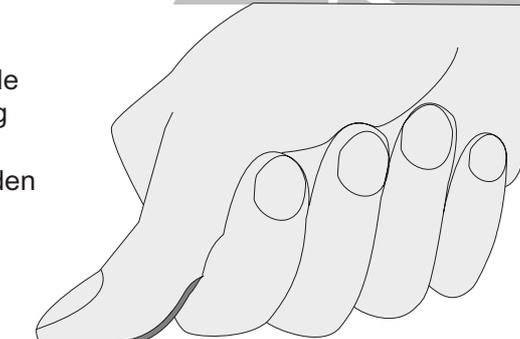
Das bedeutet für unser Handeln:

- **Keine, auch scheinbar harmlose „Ungäzen“ , ohne Rücksprache mit den zuständigen Fachabteilungen nacharbeiten.**
- Nacharbeiten an sicherheitsrelevanten Bauteilen sind von den zuständigen Fachabteilungen **festzuschreiben** und zu **dokumentieren**.

- Die **Schädigungszone muss nachgewiesen entfernt** sein.
- Gegebenenfalls **Zulassung der Nacharbeit** bei den zuständigen Stellen (Dienststellen, OEM).

Nacharbeit muss genau so abgesichert sein wie der Fertigungsprozess.
Eigenmächtiges Handeln birgt Gefahren.

Wichtige Merkmale für die Beurteilung und Erarbeitung einer Abhilfe werden entfernt.

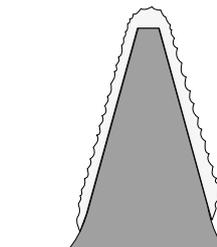


Die Beeinflussung des Werkstücks ist tiefer und bleibt.

Eine nur scheinbar harmlose Nacharbeit an Labyrinthspitzen

vorteilhaft!

- raue Schicht
- gepanzerte Spitze



problematisch!

- glatte Schicht
- freiliegende Spitze

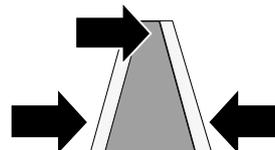


Bild 44

Ohne **Nacharbeit** ist Fertigung kaum möglich. Mit ihr lassen sich Kosten minimieren und Termine halten. Eine Nacharbeit sollte jedoch den gleichen Forderungen wie ein Fertigungsprozess unterliegen. Komplexe Betriebseinflüsse auf Triebwerksbauteile lassen Auswir-

kungen auch scheinbar „harmloser“ Nacharbeit nicht erkennen. So kann das **Glätten von Anstreifflächen** Überhitzungen mit schweren Schäden begünstigen.

Eine **nicht autorisierte Nacharbeit** führt zu einem undefinierten Bauteilzustand. Dieser lässt sich gegebenenfalls nicht rückverfolgen und kann so **zusätzlich Risiken** erhöhen.

45. „Erfahrung und Aufmerksamkeit sind auch ein Qualitätsmerkmal des Werkers.“

(Ungewöhnliche Veränderungen an Werkzeugen sind nicht selten Hinweise auf Abweichungen bzw. Instabilitäten des Fertigungsprozesses).

Oft kündigen sich kleine und große Katastrophen bereits früh mit leicht übersehbaren Veränderungen an. Das Problem ist diese zu erkennen und richtig einzuordnen. So hätte bereits der, wenn auch geringe, Kühlwasserverlust unseres PKWs den kapitalen Motorschaden erahnen lassen.

Wie ich das Problem sehe:

Am Ende des Herstellungsprozesses teurer Bauteile wurden im Bereich von **Schleifflächen Heißrisse** festgestellt. Diese konnten nur durch eine gravierende **Überhitzung** beim Schleifen entstanden sein. Da die Teile als nicht mehr betriebstauglich eingestuft wurden, war ein Schaden im Wert von mehreren schönen neuen Limousinen zu verzeichnen. Wie war das möglich, wo doch der Fertigungsprozess erprobt und genau festgeschrieben war?

Die Befragung des Personals an der Schleifmaschine ergab, dass alle Vorschriften penibel eingehalten wurden. Man erinnerte sich jedoch, dass seltsamerweise die **Schleifscheiben** nach dem Schleifen im Eingriffbereich eine leicht graue Farbe aufwiesen. Üblicherweise zeigten die Schleifscheiben eine dem **Scheibenmaterial** entsprechend weiße Farbe.

Diese Beobachtung führte zur Klärung der Schadensursache. Die graue Farbe zeigt an, dass die Schleifscheibe **vom Metallabrieb zugeschliffen** wurde. So entstand auch bei den vorgeschriebenen Zerspanungsparametern eine extreme Überhitzung der Schleiffläche. Dabei bildeten sich die später beobachteten Risse.

Für Abhilfemaßnahmen ist die Ursache für das Verschmieren der Scheibe zu klären. War die Qualität der Schleifscheibe, eine veränderte Kühlung oder abweichende Schleifparameter für diese Verhalten verantwortlich? Ist die Schleifscheibe ursächlich können beispielsweise gezielte Abhilfen mit dem Lieferanten der Schleifscheiben eingeleitet werden.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Alles was bei unserem Bearbeitungsverfahren als **ungewöhnlich** auffällt sollte den zuständigen Verantwortlichen und/oder Fachabteilungen gemeldet werden.
- Wenn Ungewöhnliches beobachtet wird sollte der **Fertigungsprozess frühestmöglich gestoppt** und erst nach Freigabe durch die zuständigen Stellen wieder aufgenommen werden. Je länger ein schädigender Fertigungsprozess weiter läuft um so größer wird der potentielle Schaden.
- **Erfahrenes Fachpersonal** ist die Voraussetzung für Qualität und Schadensminimierung. Bei kritischen Verfahren ist diese Erkenntnis zu berücksichtigen und entsprechend qualifiziertes Personal vorzuziehen.

Veränderungen an Werkzeugen können Schäden an den Werkstücken ankündigen.

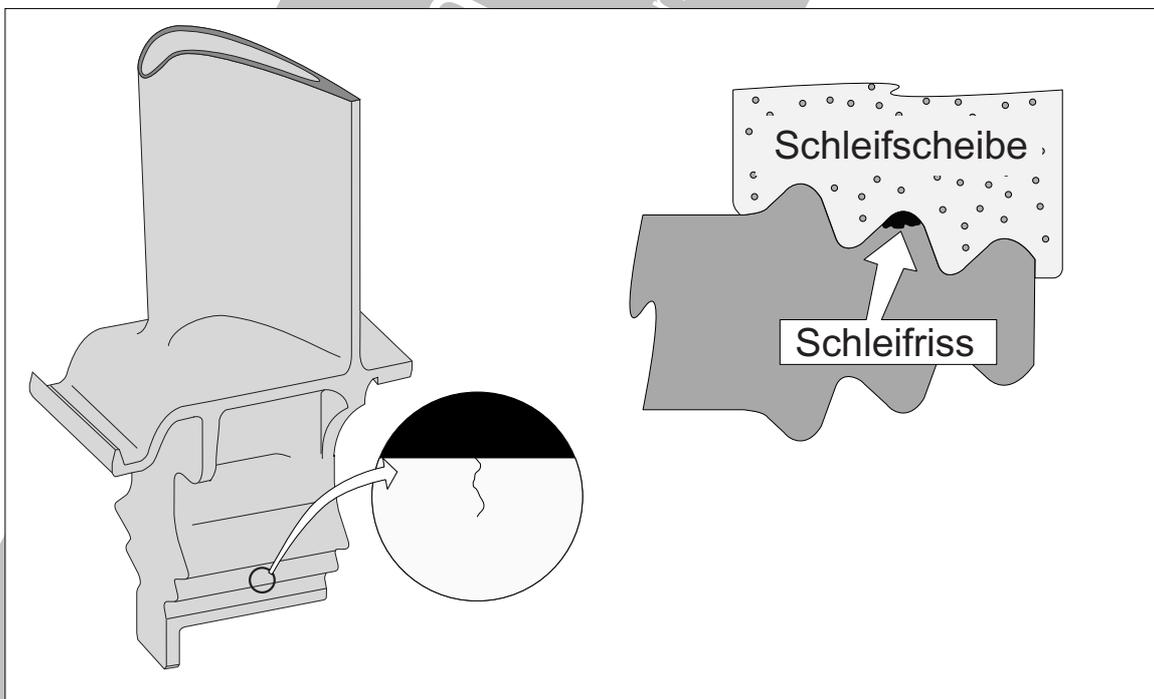
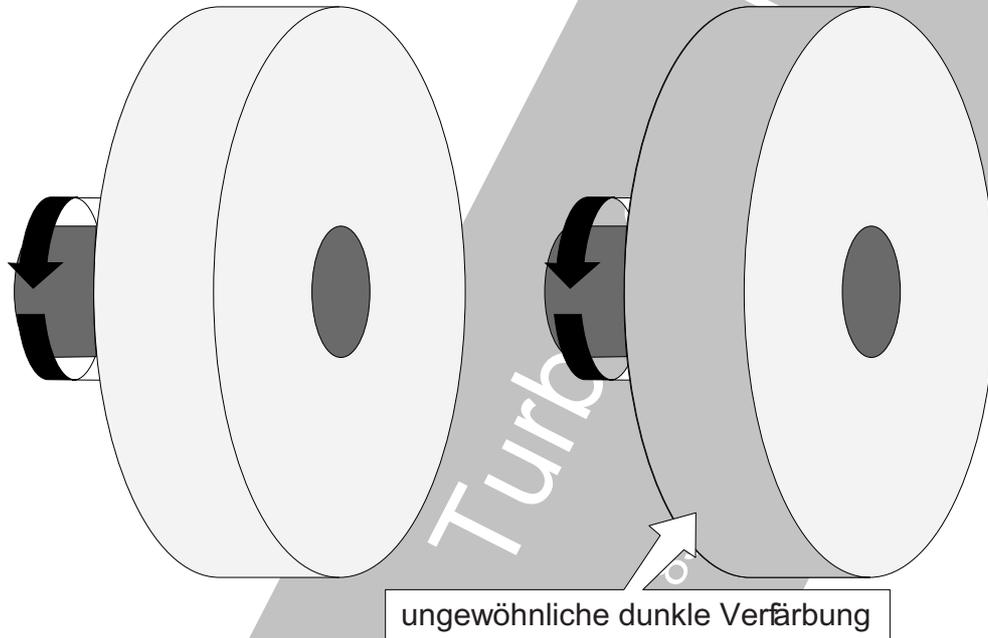


Bild 45

Die **Erfahrung des Bedienungspersonals** einer Bearbeitungsmaschine hat einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf Qualität und Kosten. **Veränderungen an Werkzeugen** können indirekt auf schädigende Einflüsse an den

Werkstücken hinweisen. Ein Beispiel ist die Überhitzung von Schleifflächen. Entsteht dabei Rissbildung wird diese oft erst festgestellt wenn eine größere Anzahl Bauteile mit einem hohen Kostenpotential betroffen ist.

46. „Und bist Du nicht willig so brauch ich Gewalt?“ (Beschädigung von Bauteilen beim Spannen in der Fertigung).

Dieser Satz von Goethe hat im Haushalt wie im Fertigungsprozess seine negative Bedeutung. Die folgende Szene kann uns das verdeutlichen. Stellt ein Staubsauger oder eine Küchenmaschine mit ungunstigen Geräuschen die Arbeit ein, schreitet der engagierte Hausmann zur Tat. Mit den Bordmitteln Schraubenzieher, Hammer und Zange wird versucht das äußere Kunststoffgehäuse zu öffnen um an die streikenden Innereien zu gelangen. Aber dem Hersteller ist es wieder einmal gelungen den Öffnungsmechanismus raffiniert zu verstecken. Notwendig sind komplexe, feinfühligere, gleichzeitige Eingriffe an mehreren Orten des Geräts. Mit der Zahl der Öffnungsversuche nimmt unsere Aggressivität zu. Plötzlich, Knack, es ist geschafft - nur nicht wie erwünscht. Einige kleine Kunststoffhaken konnten nicht mehr widerstehen und sind gebrochen. Damit ist das Gehäuse ruiniert, eine Neubeschaffung nicht mehr möglich oder teuer. Das Gerät ist nur noch für den Müll gut.

Wie ich das Problem sehe:

Triebwerksbauteile sind häufig filigran und weisen komplexe Geometrien auf. Andererseits erfordert die hohe Festigkeit der Werkstoffe entsprechend große Bearbeitungskräfte. Sie müssen vom **Werkstück in Haltevorrichtungen** übertragen werden. Dazu sind die Werkstücke ausreichend fest zu spannen, was zum Problem werden kann. Weist das Bauteil eine spröde Schicht auf, kann diese selbst bei elastischer Verformung des Grundwerkstoffs einreißen. Dabei ist das Teil vollkommen zurück gefedert und nicht bleibend verbogen. Werden die **Risse von der Rückfederung zuge-drückt**, sind sie kaum sichtbar und können den Befund der Eindringprüfung ebenfalls beeinträchtigen. Erst im Betrieb tritt der Schaden nach Risswachstum und Oxidation deutlich in Erscheinung.

Werden Bauteile beim Spannen plastisch verformt, d.h. bleibend verbogen, kann dies bei ausreichendem Aufmaß in den nächsten Folgen wieder ausgeglichen werden. Trotzdem können in dem Teil Spannungen verbleiben die sich in späteren Fertigungsschritten als Verzug zeigen oder den Betriebs-spannungen lebensdauerbeeinflussend überlagern.

Zentrierflächen mit großen Durchmessern **klemmen beim schiefen Aufschieben**. Wird dieser Widerstand überwunden ist mit Beschädigungen wie **Riefen und Materialübertragung durch Kaltverschweißen („Fressen“)** zu rechnen. Nicht immer kann ein leichtes Überarbeiten diese Schädigungen restlos entfernen.

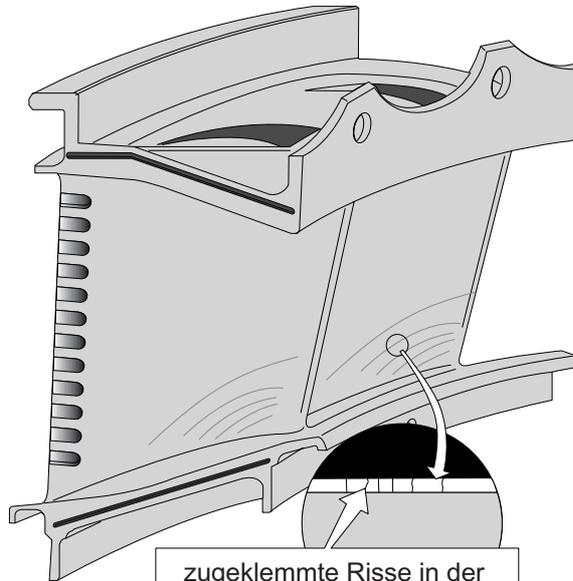
In die Anlageflächen gedrückte Verunreinigungen können Schäden wie Korrosion oder Oxidation begünstigen.

Das bedeutet für unser Handeln:

- **Vorrichtungen** sind bauteilspezifisch. **Konzeption und Konstruktion erfordern viel Erfahrung**. Ihre einwandfreie Funktion ist zu erproben.
- Ungewöhnliche **Spannkkräfte** dürfen nicht überwunden werden.
- Auf **Verschleiß** ist zu achten.
- **Auflageflächen** von Vorrichtungen müssen **sauber** sein.

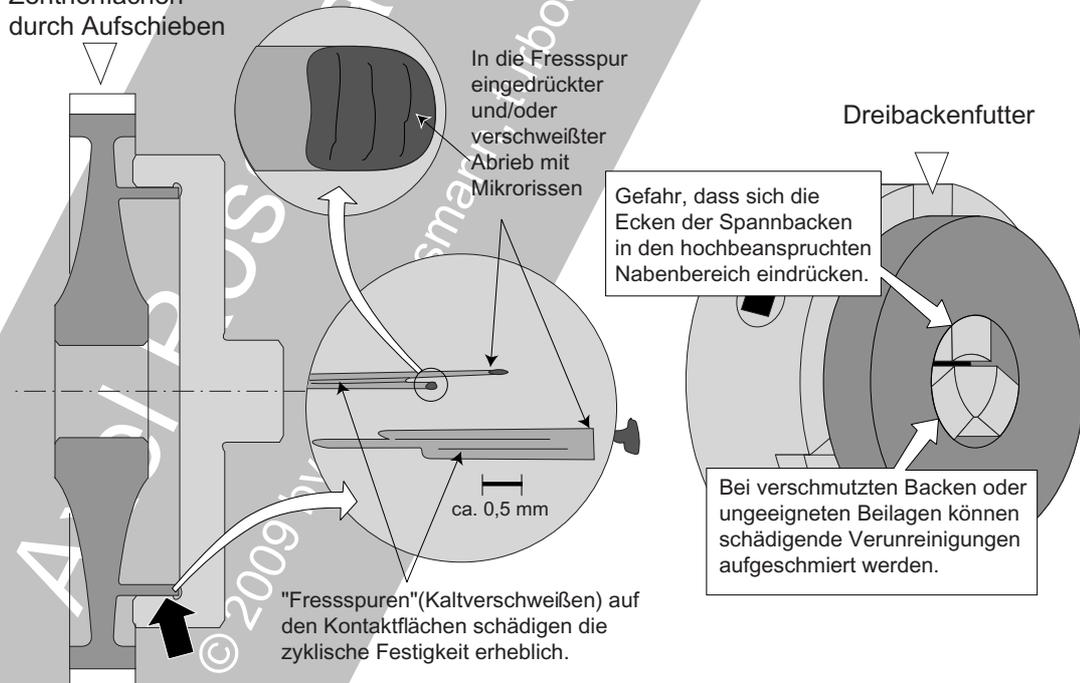
Beim Spannen von Werkstücken ist darauf zu achten, dass keine Überlastung bzw. Beschädigung erfolgt.

Spröde Beschichtungen reagieren mit Rissbildung auf plastische Verformungen des Grundmaterials.



zugeklemmte Risse in der spröden Diffusionsschicht

Halterung in Zentrierflächen durch Aufschieben



"Fressspuren" (Kaltverschweißen) auf den Kontaktflächen schädigen die zyklische Festigkeit erheblich.

Bild 46

Halten und Spannen von Werkstücken ist im Fertigungsprozess unerlässlich. Dabei können Probleme entstehen die ein Werker mit ausreichender Fachkenntnis und Aufmerksamkeit vermeiden kann.

Alarmierend sollten Veränderungen an Einspannungen sein, die mit der Zeit durch Verschleiß oder Verschmutzung entstehen.

47. „Nochmal hingebogen...“ (Nie deformierte Bauteile eigenhändig richten).

Das neue Mountain Bike musste sofort ausprobiert werden. Es kam wie es kommen musste. Ein kapitaler Sturz, gottseidank ohne Beschädigung wichtiger Körperteile, aber leider ist der Rahmen verbogen. Halb so schlimm, denkt sich der Betroffene und biegt den Rahmen wieder hin.

Eine ganze Weile ging alles gut. Doch dann erfolgte ein plötzlicher Rahmenbruch, gerade an der gerichteten Stelle... ein Zufall?

Wie ich das Problem sehe:

Ein teures und/oder dringend benötigtes Teil fällt uns aus der Hand oder stößt irgendwo heftig an. Metallische Werkstoffe haben den Vorteil, dass sie zäh sind. Sie brechen nicht sofort, sondern verformen sich zuerst plastisch. Die bleibende maßliche Veränderung verhindert vordergründig die Verwendung des Bauteils. Also konzentrieren sich gewöhnlich die Bemühungen darauf, das Teil wieder hinzubiegen. Selbst wenn dieses gelingt, können die Betriebseigenschaften unzulässig verändert sein.

Beim kalten **Verbiegen und Zurückbiegen** entstehen Gefügeveränderungen. Werkstoffe verfestigen sich und können dabei mit der Entstehung kleiner Risse verspröden. Zusätzlich entstehen in dem Bauteil unsichtbare Spannungen, sogenannte Eigenspannungen (Kapitel 22). Diese überlagern sich den späteren Betriebsspannungen. Das kann zu einer Überlastung und dem Versagen führen. Wir erkennen also, dass sich bei einem unfachmännisch **gerichteten Bauteil** das Risiko eines Versagens im Betrieb erhöht. Auch ein Richten mit Erwärmung ist nicht unproblematisch. Dabei besteht die Gefahr einer unzulässigen Veränderung des Werkstoffgefüges mit Festigkeitsabfall.

Nun erinnern wir uns wieder an unser Fahrrad. Der Rahmen wird durch das Treten schwingend belastet. Eine unsachgemäß gerichtete Bauteilzone ermüdet schneller, es entsteht ein gefährlicher Riss der zum Bruch führt.

Im Triebwerk können in einem vergleichbaren Fall normalerweise ertragene Schwingbelastungen zum **Brechen eines Bauteils** führen. Bei den typisch hohen Betriebstemperaturen in Brennkammer und Turbine verziehen sich gerichtete Teile unter den inneren Spannungen vom Richten. Verformte Gehäuse können gefährliche Anstreifvorgänge auslösen. Der Verzug einer Heißgasführung kann die Kühlluftströmung so beeinflussen, dass Überhitzungsschäden auftreten.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Unter bestimmten Bedingungen lässt sich mit **genau festgelegten Verfahren** ein verbogenes Teil richten. Über diese Möglichkeit können jedoch nur die Fachleute urteilen. Sie müssen gegebenenfalls den Richtvorgang erarbeiten und überwachen.
- Besondere **Vorkehrungen und Sorgfalt** sind darauf zu richten, dass Bauteile nicht verbogen werden. Dies gilt besonders für den Transport und das „handling“.
- Verbogene Bauteile **dürfen nicht selbstständig gerichtet** werden. In jedem Fall ist ein Fachmann hinzuzuziehen.
- **Richtvorgänge** benötigen genaue, schriftliche, **nachvollziehbare Anweisungen**. Sie sind in den **Fertigungsdokumenten** zu vermerken.

Wer hat schon einmal probiert eine Heftklammer aufzubiegen?

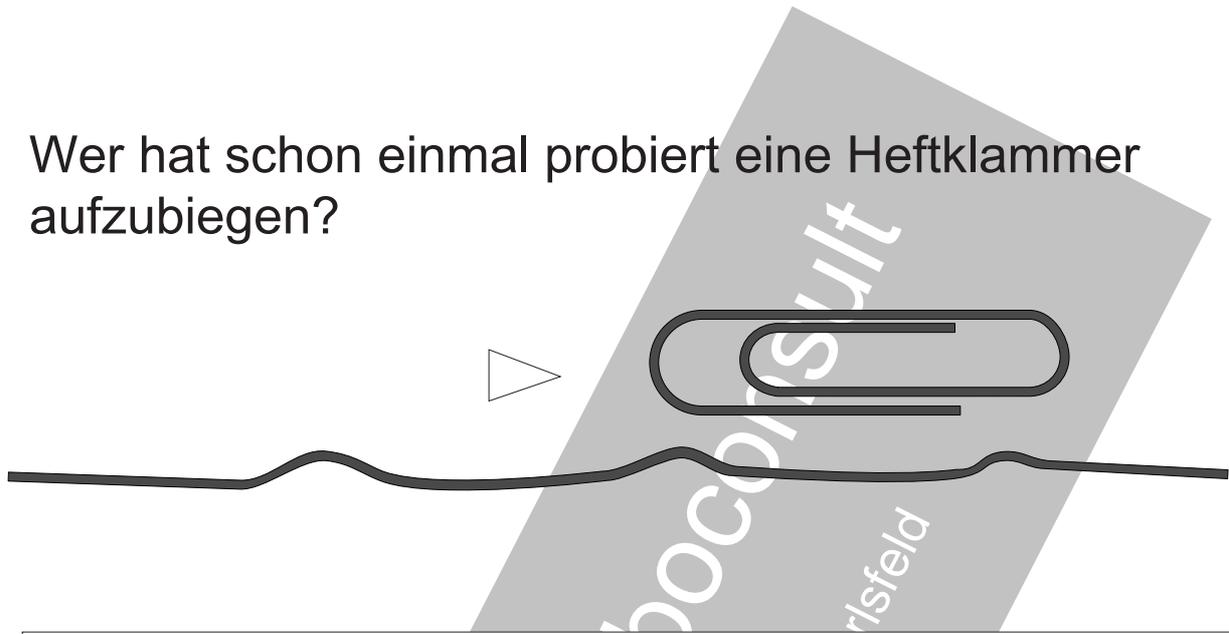


Bild 47

*Eine Büroklammer kann uns spielerisch zeigen, dass sich ein Werkstück zwar relativ leicht verbiegen lässt, das Rückbiegen mit der Hand jedoch deutlich schwerer ist. Die Biegeradien bleiben erkennbar. Dies liegt an der **Werkstoffveränderung bei der Verformung**. Der Werkstoff wird dabei **fester und spröder**. Er setzt dem*

*Richten einen größeren Widerstand als ursprünglich entgegen. Die Gefahr von **Rissbildung und Bruch** steigt.*

48. „Bitte nicht hochstapeln!“

(Transport und Versand von Bauteilen ist eine anspruchsvolle Aufgabe).

Die moderne **Lagerhaltung und der Transport** in der industriellen Fertigung sind seit Langem nicht mehr ohne **Stapler** denkbar. Wir bewundern die präzisen Manöver und manchmal auch die akrobatischen Gleichgewichtsübungen um die Bauteilstapel an ihren Bestimmungsort zu bringen. Je faszinierender die „Transportkunst“ um so problematischer kann sie sein.

Wie ich das Problem sehe:

Wenn Artisten auf Stöcken rotierende Teller balancieren ist im Versagensfall mit Bruch zu rechnen. Klar ist, diese Teller sind dann nicht mehr brauchbar. Es treten jedoch keine Sicherheitsrisiken und nennenswerten Kosten auf.

Anders verhält es sich wenn empfindliche, äußerst wertvolle Bauteile oder gar ganze Triebwerke von der Gabel eines Staplers bzw. der transportierten **Palette** fallen.

Die entstehenden **Beschädigungen** können auf vielfältige Weise ein Bauteil ruinieren. Scharfe Kanten oder kleine Steinchen erzeugen gefährliche Kerben. Bauteile verbiegen, dünne Querschnitte wie Bleche knicken. Verschieben sich die Komponenten gefügter Bauteile gegeneinander, führt das z.B. zu Montageproblemen und/oder später im Triebwerk zu Unwuchten.

Nicht selten sind geschädigte Teile nicht mehr verwendbar. Um die reparierbaren Teile wieder betriebsfähig zu machen sind oft **umfangreiche Nachweise und teure Arbeiten** notwendig.

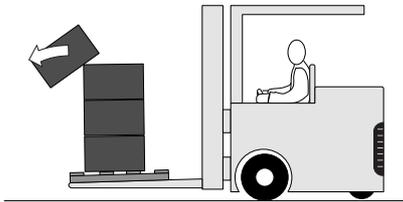
Besonders problematisch wird es wenn sich typisch menschliche **Verhaltensweisen** durchsetzen. So werden Teile weiter im Ablauf belassen, in der Hoffnung, dass schon nichts passiert ist.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Keine instabil hohen Stapel aufbauen.
- Sichere, ausreichend tragfähige **Paletten und Transportverpackungen** verwenden. Diese dürfen z.B. nicht unter dem Druck des Stapels nachgeben.
- Ein Malör ist den zuständigen Stellen zu **melden**. Die Vorgesetzten sollten sich in einem solchen Fall daran erinnern, dass zuerst die Qualität zu sichern ist. Der Verursacher ist im Einzelfall so zu behandeln, dass die positive Motivation im Vordergrund steht und nicht eine Bestrafung.
- Die **Empfänger von Lieferungen** sollten auf Anzeichen der Verpackung und den Bauteilen achten, die auf Gewalteinwirkung bzw. einen Aufschlag hinweisen.
- **Unterrichtung des Transportpersonals** über den Sicherheitsaspekt und den **Wert des Transportguts**.

Einen Gabelstapler zu bedienen ist eine durchaus anspruchsvolle und verantwortungsvolle Aufgabe.

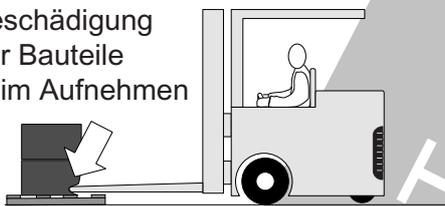
ungünstiger Aufbau der Lasten



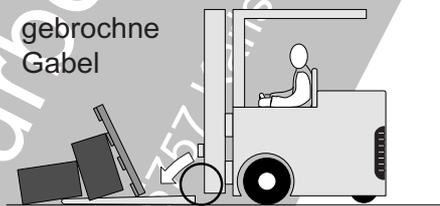
versehentliche Beschädigung anderer Bauteile beim Rangieren



Beschädigung der Bauteile beim Aufnehmen



gebrochene Gabel



starke Vibrationen:
Brinellinggefahr

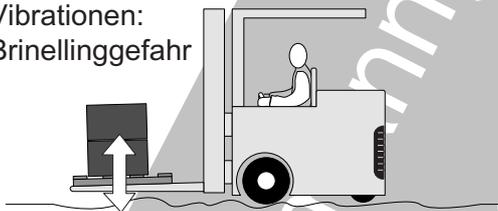


Bild 48

Staplerfahrer sollten in der Lage sein, eventuelle Vorkommnisse richtig einzuschätzen und geeignete Maßnahmen zu ergreifen. Eine Voraussetzung ist, dass relevante Eigenschaften der zu transportierenden Werkstücke und Bauteile bekannt und auch bewusst sind. Hierzu gehört die Empfindlichkeit gegen transportbedingte Überlastungen filigraner Strukturen, hohe Masshaltigkeit und sprödes Verhalten. Ein weiteres Merkmal ist die Sicherheitsrelevanz (z.B. von Rotorteilen) mit der Vorstellung über mögliche Auswirkungen von Beschädigungen. Nicht zuletzt ist der Wert eines Bauteils wichtig. Er sollte einschätzbar (z.B. relativ zu dem Preis eines Mittelklassewagens) bekannt sein. Behälter die sich nicht sicher stapeln lassen sollten frühzeitig erkannt werden. Kippgefährliches Stapeln ist zu unterlassen. Auf Beschädigungen beim Rangieren oder der Aufnahme eines Behälters lässt sich in vielen

Fällen aus dessen äußerem Zustand rückzuschließen. Ist das nicht gewährleistet muss ein solches Ereignis den zuständigen Stellen gemeldet werden. Ein solches Vorgehen ist für den Verursacher durchaus keine Selbstverständlichkeit. Es erfordert eine geinete **Firmenkultur**, kann es doch mit persönlichen Nachteilen verbunden sein.

Vibrationen wie auf unebenen Transportwegen (Querrillen, Schotter) können bei sich **berührenden Bauteilen in ungeeigneten Verpackungen** zu Verschleiß und Kratzern führen. An Baugruppen mit Wälzlagern wie vormontierte **Triebwerksmodule**, besteht in nicht ausreichend gedämpft gelagerten Behältern die Gefahr einer Schädigung der Lagerlaufbahnen. Die Folge sind schwere Schäden im Betrieb. Auch die Möglichkeit eines Schadens am Gabelstapler selbst ist zu beachten. Hier handelt es sich in erster Linie um den **Bruch der Gabel** und das Herabfallen des Behälters. Aus diesem Grund müssen die **Gabeln in regelmäßigen Abständen geeignet (Eindring-) rissgeprüft** werden. Besonderes Augenmerk ist auf die Innenecke am Übergang zum Schlitten für die Vertikalbewegung zu richten.

49. „Spritzer auf weißer Weste“

(Treffen Funken und Metallspritzer auf eine Oberfläche können sie diese gefährlich schädigen)

Spaghetti mit Tomatensauce! Wer schwärmt nicht von dieser Köstlichkeit. Diejenigen, welche die Hemden nachher von hartnäckigen Saucenspritzern befreien müssen, sind weniger begeistert. Eine intensive Reinigung ist unvermeidlich. Der Volksmund sagt es: Bereits ein kleiner Spritzer auf einer weißen Weste kann den gesamten Eindruck ruinieren. Es lässt sich als Hinweis auf Mängel in Sauberkeit und Lebensart deuten. Bauteile unterliegen ähnlichen Einschätzungsmerkmalen.

Wie ich das Problem sehe:

Bei einigen Fertigungsprozessen, insbesondere **Schweißverfahren aber auch der Zerspanung** mit hohen Schnittgeschwindigkeiten, entstehen metallische **Schmelztropfen**. Wenn diese auf ungeschützte Metalloberflächen fallen, kann es zu gravierenden **Schädigungen** kommen. Die geringe Größe der heißen Partikel und ihre Unscheinbarkeit macht sie besonders gefährlich.

Ein typisches Beispiel ist das **Elektronenstrahlschweißen**. Es erfolgt im Vakuum an Neuteiloberflächen. Das heißt, es gibt keine vor der **Reaktion mit Metallspritzern schützende „natürliche“ Oxidschicht**. **Mit Aufheizung und Reaktionen im Grundmaterial können Spritzer zu gefährlichen Gefügeänderungen und inneren Spannungen führen. Die Folgen sind Festigkeitsverlust und Versprödung**. Entstanden Zugeigenspannungen können diese zusätzlich die Belastbarkeit für sich beanspruchen (Kapitel 22). Selbst wenn die erstarrten Tropfen abgefallen sind oder entfernt wurden, ist eine bleibende Schädigung möglich. Ob eine Gefahr besteht erfordert die Beurteilung der zuständigen Fachabteilung.

Eine weitere Gefahr geht von einem **Verstopfen der Kühlluftkanäle** an Turbinenschaufeln aus. Die Folge sind Überhitzungsschäden im Betrieb. Deshalb werden hier beim **Laserbohren** besondere Vorsichtsmaßnahmen ergriffen.

In der Literatur wird als typischer Problemfall von Elektronenstrahl geschweißten Verdichterschaufeln aus einer **Titanlegierung** berichtet. Die Erfahrung zeigt, dass sie gegen solche Spritzer besonders empfindlich sind und zu Schwingbrüchen neigen.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Alle Metalloberflächen die sich im Bereich von Metallspritzern befinden sind mit geeigneten Methoden **abzudecken**.
- Keine Lagerung ungeschützter Bauteile in der Nähe von **Funkenflug**. Hierzu gehören Schweißverfahren, Schleif- und Trennverfahren und hohtouriges Fräsen.
- Werden Anzeichen für **Metallspritzer** festgestellt (z.B. verfärbte raue Pünktchen, anhaftende Schmelzperlen) ist die Fachabteilung hinzuzuziehen um die **geeignete Nacharbeit** festzulegen und nachzuweisen.
- Wurden Schädigungen durch Spritzer festgestellt ist die **Ursache bzw. Spritzerquelle** zu ermitteln und **gezielte Gegenmaßnahmen** zu ergreifen.

- Eine **eigenmächtige Nacharbeit ist unzulässig**; weil eine gefährliche tiefer gehende Schädigung allein durch Augenschein nicht auszuschließen ist. Eine vorschnelle Nacharbeit mindert zusätzlich die Chance gezielter Abhilfemaßnahmen.

Spritzer aus flüssigem Metall treten häufig auf und können Bauteile unzulässig schädigen.

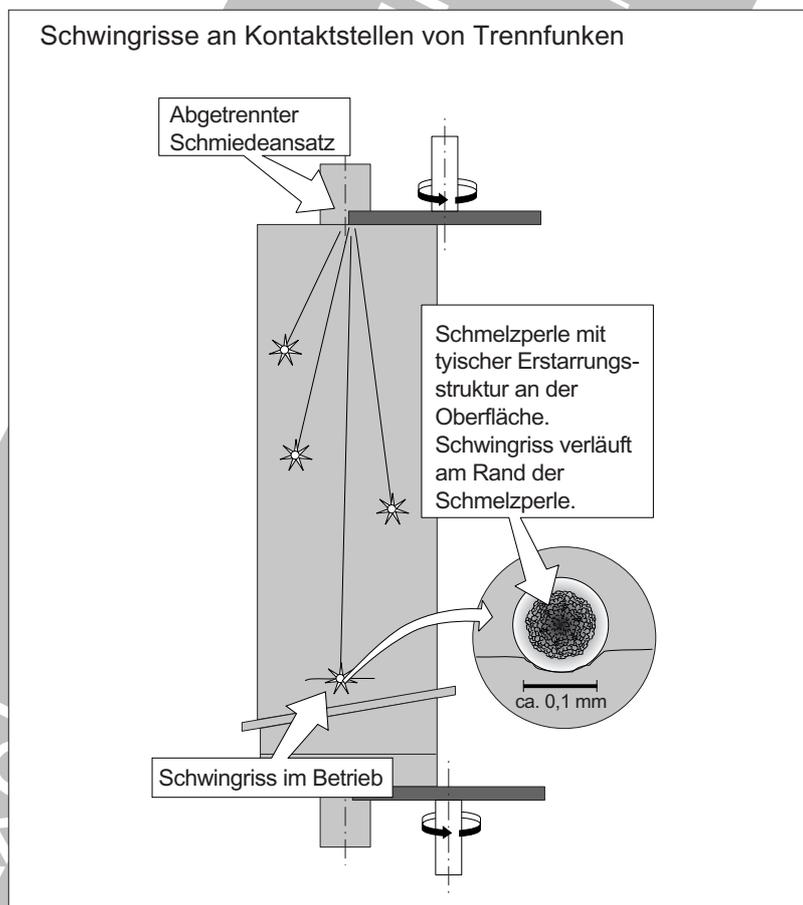
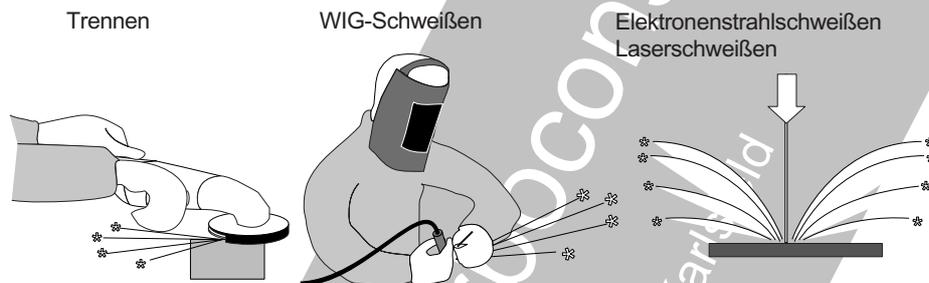


Bild 49

Hinter einem fliegenden **Funken** verbirgt sich ein aufgeheiztes, glühendes, brennendes und/oder geschmolzenes Partikel. Besonders die tyisch weiß leuchtenden **Titanfunken** bestehen bei genauerem Hinsehen aus brennenden

winzigen Tröpfchen. Funken sind so heiß, dass sie **mit Metalloberflächen beim Aufprall verschmelzen** können. Zumindest ist mit einer örtlich starken Erwärmung zu rechnen. So sind gefährliche, schwer erkennbare **Schädigungen** möglich.

50. „Wenn Ihr's nicht fühlt, Ihr werdet's nicht erjagen...“ (Mit Abtasten lassen sich Anzeichen für gefährliche Schädigungen finden).

Den Satz der Überschrift spricht Faust im gleichnamigen berühmten Drama des Dichters Goethe. Zwar ist der Zusammenhang ein anderer, doch kann der Sinn auch für uns im Fertigungsprozess gelten.

Wie ich das Problem sehe:

Unsere **Fingerspitzen sind sehr empfindliche Sensoren**. Selbst wenn wir **Baumwollhandschuhe** anhaben wie beim Handling von Werkstücken aus Titanlegierungen, bleibt diese Eigenschaft noch nutzbar.

Streicht man sanft über eine ausreichend glatte Fläche, wie sie für Oberflächen von Schaufeln und Rotoren üblich sind, kann man bereits kleine Rauigkeitsspitzen, Grate oder anhaftende Partikel ertasten. Bleiben feine Baumwollhandschuhe daran hängen macht sich das dem Aufmerksamen mit einem sanften Rupfen bemerkbar.

Auch die **Fingernägel können als Prüfinstrumente** nützliche Dienste verrichten. Besonders wenn kein Grat vorhanden ist kann der Fingernagel noch ein Problem registrieren. Das gilt in erster Linie für Kratzer und Grübchen. Auch sagt der Widerstand in Größe und Richtung dem erfahrenen Prüfer etwas über die Fehlstelle.

Selbst kleine Grate an Kanten und Riefen/Kratzern können die Lebensdauer eines hochbelasteten Bauteils unzulässig verkürzen.

Eine weitere Möglichkeit sind anhaftende Metallspritzer und Tröpfchen. Sie haben möglicherweise den Werkstoff geschädigt und gefährliche **Zugeigenspannungen** erzeugt. Das gilt auch, wenn die Partikel scheinbar nur leicht anhaften und abfallen. In einem solchen Fall sollte einem solchen Befund genauer auf den Grund gegangen werden

Selbst wenn die beschriebenen Anzeichen nicht auftraten, zeigen die Fingerspitzen bzw. der Handschuh anhaftenden Abrieb wie Staub, Flüssigkeiten und Fette. Diese Verunreinigungen können in nachfolgenden Fertigungsschritten, wie einer Wärmebehandlung, Schäden auslösen. Diese effektive Methode können wir in Filmen sehen, wo beim Militär der Vorgesetzte die Staubfreiheit schlecht einsichtiger Flächen kontrolliert. Genau so haben wir auf diese Weise die Chance auch **schlecht einsichtige aber abtastbare Bauteilzonen** zu kontrollieren.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Bemerken wir beim Handling von Bauteilen **Rauigkeitsspitzen** ist deren Ursache und mögliche Beeinflussung der Bauteileigenschaften zu klären. Dazu empfiehlt es sich die zuständige Fachabteilung zu konsultieren.
- Auch **leicht anhaftende Partikel** können ein Indiz für eine Schädigung sein. Dies ist von der zuständigen Fachabteilung zu klären.
- Haften beim Handling eines Werkstücks ungewöhnliche **Verunreinigungen an den Händen** ist deren Unbedenklichkeit zu überprüfen. Dies gilt besonders für Verunreinigungen unmittelbar vor einem „**empfindlichen**“ **Fertigungsprozess**, d.h. wenn kein Reinigungsvorgang mehr erfolgt.

- Anhaftende **Metallspritzer** sind immer ein Anzeichen ungenügender Abdeckungen. Diese sind auf ihre Anwendung und Wirksamkeit zu überprüfen.

Unsere Hände sind ein sehr sensibles Prüfinstrument.
Wir sollten es nutzen und auf seine Anzeigen reagieren.

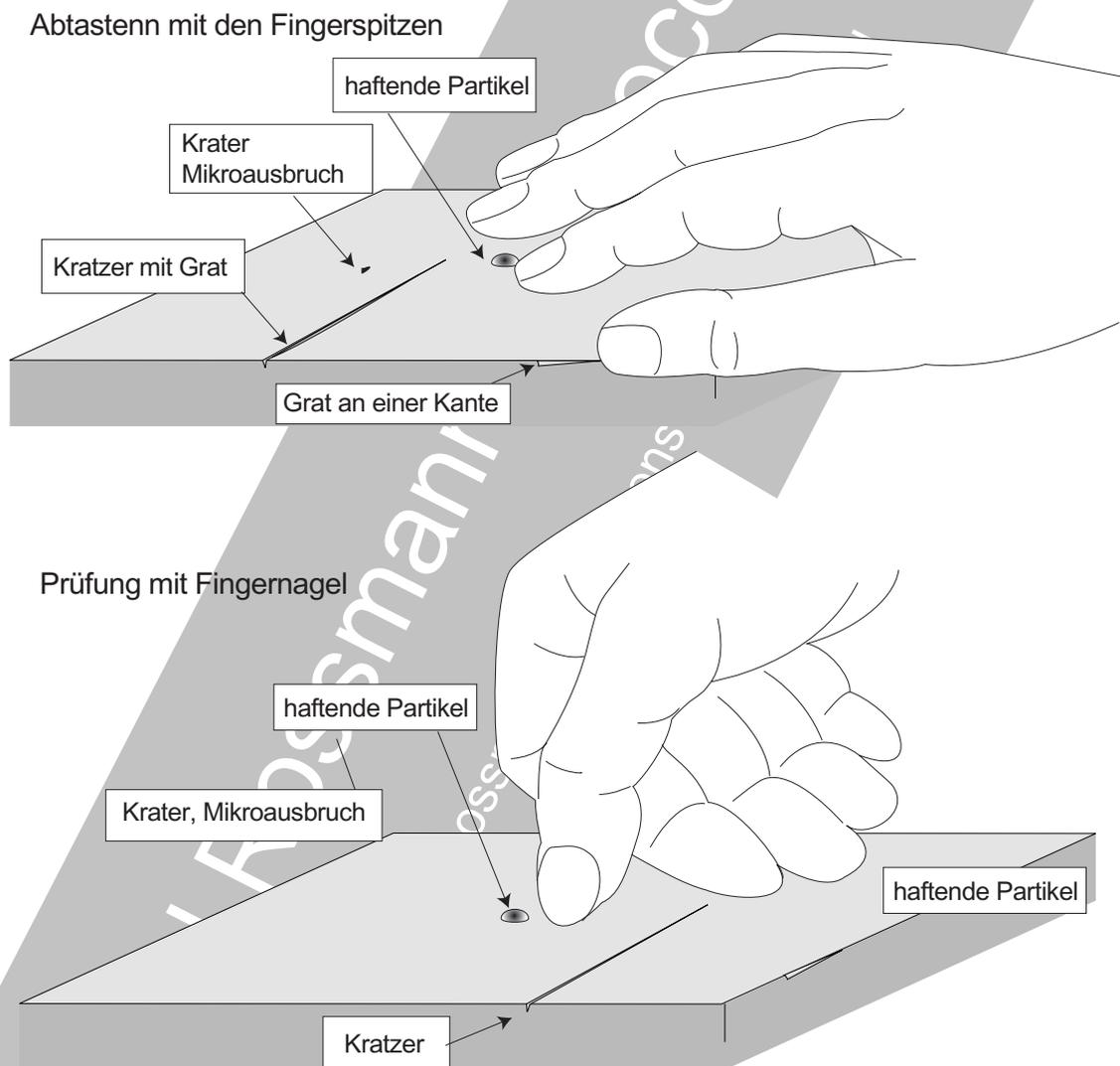


Bild 50

Hände sind sensible Sensoren die auch genutzt werden können um unerwünschte Fertigungseinflüsse aufzuspüren. So kann das Handling der Werkstücke auch der Qualitätssicherung dienen. **Bei Titanteilen ist darauf zu achten, dass diese nicht mit bloßen Händen berührt werden dürfen (Handschweiß) wenn sie nachträglich Temperaturen über 450°C ausgesetzt**

werden. In einem solchen Fall sind geeignete Handschuhe zu tragen.

51. „Auge sei wachsam!“

(Die visuelle Prüfung kann uns zur Beeinflussung einer Oberfläche wichtige Hinweise geben).

Es ist eine frustrierende Erfahrung vieler Autofahrer, dass sich oft kleine Dellen im Karosserieblech so schwer entfernen lassen. Man beult aus, spachtelt und schleift viele Male, nur um nach der Lackierung festzustellen, dass die Delle sich noch immer abzeichnet. Die glänzende Lackoberfläche bringt es im wahrsten Sinn des Wortes „an den Tag“. Feine Schatten bei Schräglicht und/oder eine geeignete Blickrichtung machen winzigste Abweichungen unangenehm deutlich. Auch geringste Abweichungen der Rauigkeit lassen örtliche Nacharbeiten erahnen.

Wie ich das Problem sehe:

Auf großen und komplexen Oberflächen lassen sich **mit dem Auge** schnell äußerst feine örtliche **Abweichungen erkennen**. Damit ist unser Auge in seiner Universalität anderen zerstörungsfreien Prüfmethoden überlegen. Es sollte also nahe liegen, sich dieses Prüfmittels zu bedienen.

Natürlich ist das Auge weniger ein quantitatives Prüfgerät. Kann es doch nur die Oberfläche **vergleichend prüfen** obwohl Einflüsse auf die Oberfläche auch eine beachtliche **Tiefenwirkung** haben. Das gilt besonders für örtliche Überhitzungen (Kapitel 49). Sichtbare Fehlstellen wie Seigerungen oder Risse können sich ebenfalls weit in das Bauteil erstrecken. Das Wichtigste ist, dass Augen örtliche **Änderungen der Oberfläche** erkennen. Diese lassen sich dann mit den typischen zerstörungsfreien Prüfverfahren und mikroskopischen Untersuchungen genauer untersuchen.

Damit kommt dem aufmerksamen und möglichst auch **erfahrenen Werker eine wichtige Aufgabe** der Qualitätssicherung zu.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Ungewöhnliche örtliche **Oberflächenveränderungen** sollten unsere Aufmerksamkeit und Argwohn erregen.
- Im Zweifelsfall ist die zuständige Fachabteilung für eine genauere **Beurteilung** zu informieren.
- **Kein Verändern oder Abarbeitungsversuche** vor der Untersuchung durch die Fachabteilung.

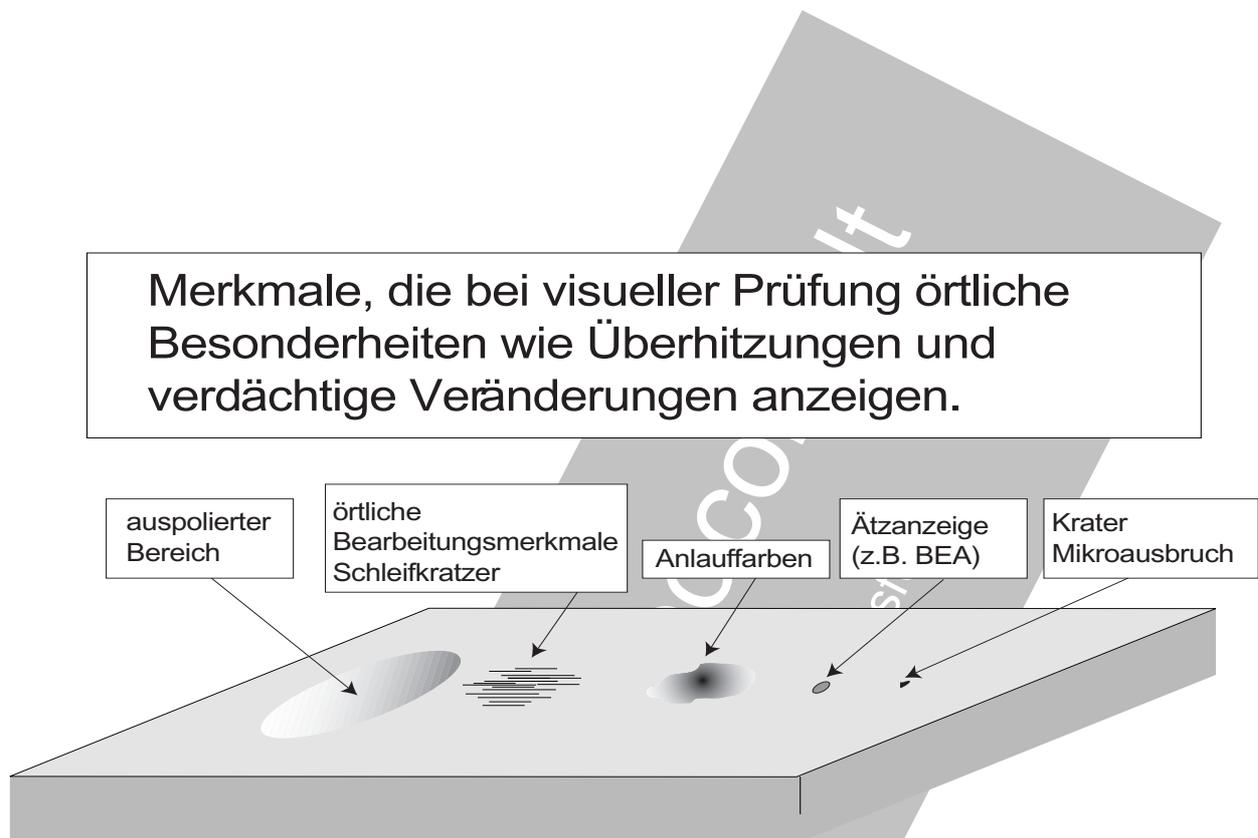


Bild 51

*Dem aufmerksamen Beobachter entgehen viele **Oberflächenbesonderheiten** nicht. Es kann sich um Hinweise auf problematische Einflüsse wie unzulässige Erwärmung, Beschädigungen, Werkstofffehler und korrosive Schädigungen handeln. Im Zweifelsfall ist der zuständige Fachmann für die **Bewertung** anzufordern..*

Axel Rossmann,
© 2009 by Axel Rossmann, turboconsult,

52. „Reinigen ist nicht alles, aber ohne Reinigen ist alles nichts, gerade deshalb ist Vorsicht geboten.“

(Reinigungsbäder sind nicht so harmlos wie sie erscheinen mögen).

Der Normalbürger opfert Zeit und treibt Aufwand für seine Reinigung und die Reinhaltung seiner Umwelt. Manchmal hat man sogar das Gefühl, dass es Zeitgenossen gibt, für die Reinigen den Lebenssinn bedeutet. Trotzdem bleibt die Anerkennung dieser als selbstverständlich empfundenen Aktivitäten in den meisten Fällen versagt. Das ist ungerecht.

Wie ich das Problem sehe:

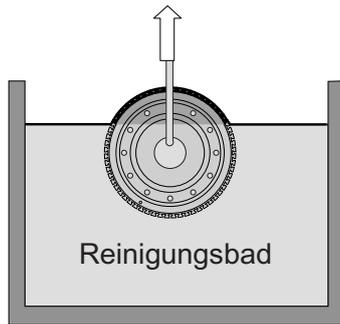
Aristoteles sagte: „Man gebe mir einen festen Punkt und ich hebe die Welt aus den Angeln“... oder so ähnlich. Er benötigte also eine feste Basis. Eine ähnliche Basis bieten saubere **Oberflächen für Beschichtungsprozesse**. Ohne eine zuverlässig saubere Oberfläche kann die Qualität vieler Beschichtungen nicht gewährleistet werden. Die Oberflächenreinheit beeinflusst z.B. die Haftfestigkeit gespritzter oder geklebter Schichten. Auch die Wirksamkeit von Oxidationsschutzschichten wird davon bestimmt. Eine saubere Oberfläche ist Voraussetzung für die Effektivität der **Eindringprüfung**. Bei der **Wärmebehandlung** gewährleistet eine saubere Oberfläche, dass die Bauteile nicht von Reaktionen geschädigt werden. Vorbedingung für fehlerfreie Schweißungen (z.B. EB-Schweißen, Reibschweißen) sind saubere Schweißzonen.

Ein besonderes Problem ist, dass die ungenügende Wirksamkeit einer Reinigung erst erkannt wird, wenn es zum Schaden kommt, z.B. zum Abblättern einer Schicht. Vorher ist es sehr schwierig, ohne die Oberfläche unzulässig zu beeinflussen, die Reinigungsgüte zuverlässig auf der gesamten Fläche zu prüfen.

Doch Reinigungsverfahren sind manchmal nicht unproblematisch. Aggressive **Reinigungsbäder** können Bauteile auch angreifen und schädigen. Es ist deshalb eine sehr anspruchsvolle Aufgabe sichere Vorschriften für Reinigungsverfahren zu erstellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass im Rahmen der Überholung fertige und deshalb teure Bauteile mit unterschiedlichen Werkstoffen und Beschichtungen zu reinigen sind.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Die Reinigung von Bauteilen ist eine besonders wichtige Aufgabe und ist **genau nach Vorschrift** durchzuführen.
- An gereinigte Teile muss der **folgende Fertigungsprozess so schnell anschließen**, dass eine erneute Verschmutzung sicher vermieden wird.
- Gereinigte Teile sind **vor Verschmutzung geschützt** aufzubewahren.
- Bei Reinigungsbädern und Reinigungsmedien ist der **Anwendungszeitraum** zu beachten.
- Auf **in einem Reinigungsbad schwebende** oder an der Oberfläche **schwimmende Verunreinigungen**, die zu reinigende Teile verschmutzen können, ist zu achten.



Auf der Badoberfläche schwimmende Verunreinigungen haften beim Herausnehmen des Bauteils wieder an.

Über Reinigungsbäder verschleppte Medien können den weiteren Fertigungsablauf oder das Betriebsverhalten negativ beeinflussen.

Das Aussehen eines Reinigungsbads sollte sich deutlich von dem einer fetten Suppe unterscheiden!



Keine Schlieren,
keine Partikel auf
der Badoberfläche!

Bild 52

Reinigungs- und Entfettungsbäder werden von vielen Werkstücken durchlaufen. Abgelöste **Verunreinigungen** die an der Badoberfläche schwimmen, können auf andere Bauteile beim Herausnehmen übertragen werden. Deshalb sind Anzeichen von Verunreinigungen auf der Badoberfläche ernst zu nehmen. Gegebenenfalls sind geeignete Hilfemaßnahmen einzuleiten.

53. „Alles abgedeckt?“

(Abdecken erscheint „harmlos“, ist jedoch eine anspruchsvolle Aufgabe mit erheblichem Schadenspotential).

Es ist wieder einmal so weit: Das Wohnzimmer muss geweißelt werden. Die neuen Farben decken hervorragend und haften gut. Leider auch dort wo sie nicht sollen. Also wird Alles, auf das keine Farbe kommen darf, abgedeckt. Wer es da nicht so genau nimmt, muss päter fürchterlich büßen. Wenn der Bezug des antiquarischen Sessels etwas abbekommen hat, ist das nicht nur ein Schönheitsfehler. Das kann sich auch empfindlich auf den Geldbeutel auswirken. Auch falsches Abdeckmaterial hat es in sich. Intensiv haftende Klebestreifen auf empfindlichen Gegenständen können „vernichtend“ wirken. Eine Problematik großer Abdeckbahnen zeigt sich erst nach glücklich vollbrachter Arbeit. Wohin mit dem Zeug? Die Entsorgung wird nicht ohne Grund immer schwieriger. Das steigert den Aufwand merklich.

Wenn solche Probleme schon im Haushalt auftauchen, wie viel größer dürften sie sein, wenn es sich um wertvolle, hochbelastete Triebwerksteile handelt. Wir sollten uns deshalb die Problematik etwas genauer ansehen.

Wie ich das Problem sehe:

Abdeckungen werden im Triebwerksbau für unterschiedlichste Teile, Werkstoffe und gegen vielfältige Einflüsse benötigt. Natürlich wird eine Abdeckung gegen Strahlgut anders aussehen, als gegen ein **Ätzbad** oder gegen **Schweißspritzer**. Ein Thema ist das Unterwandern von Abdeckungen durch Ätzflüssigkeit. Ungenügende Abdeckschichten können von Schweißspritzern durchdrungen werden. Strahlgut kann Abdeckbänder durchschlagen und in **Kühlluftkanäle von Heißeilen** geraten.

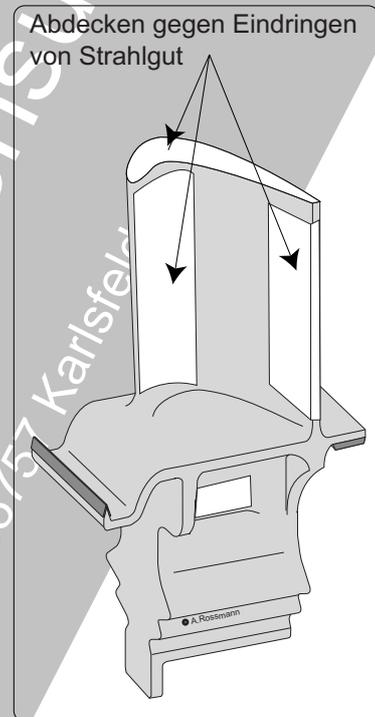
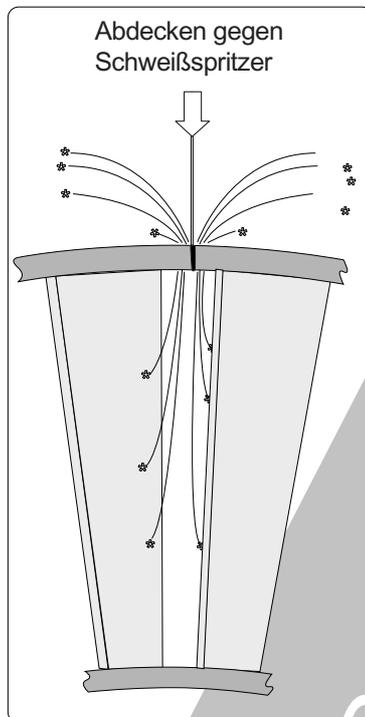
Wenn Bauteile mit der Abdeckung merkliche Temperaturen erreichen, muss diese ausreichende Warmfestigkeit aufweisen. Beispiele sind Abdeckungen gegen Diffusionsbeschichtungen oder Lot. Dabei handelt es sich nicht nur um Bänder oder Metallfolien bzw. Bleche. Auch lackartige Beschichtungen (Abdecklacke) kommen zur Anwendung.

Nicht nur das einfache und sichere Aufbringen der Abdeckung ist wichtig. Die Funktion während des gesamten Prozesses muss gewährleistet sein. Nicht zu vergessen, die unproblematische und **kostengünstige Entfernung**. Das gilt natürlich besonders für Abdeckungen an Hohlteilen. Eine besondere Aufgabe ist die Verhütung von Schädigungen (Grate, Verstopfung) durch Laserstrahlen beim Bohren der Luftführungen zu den Kühlluftkanälen.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Abdeckungen sind von der zuständigen **Fachabteilung zu Konzipieren und die Funktion nachzuweisen.**
- Abdeckungen sind mit zugelassenen und erprobten Hilfsmitteln bzw. Vorrichtungen durchzuführen
- **Beschädigte Abdeckungen** (Verschleiß, Alterung usw.) sind rechtzeitig zu erneuern.
- Auf bedenklichen **Abrieb von Abdeckungen** (z.B. Bleiband, Lack) ist zu achten.

Abdecken ist eine verantwortungsvolle und nicht unproblematische Aufgabe.



Reste von Abdeckungen können bei nachfolgenden Fertigungsschritten wie einer Wärmebehandlung ein Bauteil gefährlich schädigen.



Bild 53

In der Fertigung müssen Werkstücke aus unterschiedlichen Gründen abgedeckt werden. Dafür werden meist einmal verwendbare Hilfsstoffe wie **Klebebänder** und **lackartige Beschichtungen** verwendet. Verbleiben davon **Reste** auf dem Teil, können diese in nachfolgenden Fertigungsschritten schädigend wirken. Sie können **schmelzen** oder über **Bäder** und **Strahlverfahren** auf andere Bauteile übertragen werden.

Niedrig schmelzende Metalle wie **Blei** können bei Glühtemperaturen auch höher schmelzende Werkstoffe wie **Titan- und Nickellegierungen** **anschmelzen** und **tief schädigen**. Im Betrieb können **Heißeile** wie **Turbinenschaufeln**, in die solche Verunreinigungen eingedrungen sind, durch **Rissbildung** frühzeitig versagen.

54. „Uneinsichtig“ (Schlecht visuell kontrollierbare Bauteilzonen erhöhen das Risiko).

Wenn wir von einer uneinsichtigen Person sprechen, denken wir an Jemanden der sein Problem einfach nicht erkennen will oder kann.

Es gibt auch uneinsichtige Bauteile. Für deren „Uneinsichtigkeit“ sind gewöhnlich wir selbst verantwortlich. In solchen Fällen haben wir für die notwendige Einsicht zu sorgen.

Wie ich das Problem sehe:

Auf dem Bildschirm des Konstrukteurs sah alles so einfach aus. Der Fertigungsprozess lässt sich wunderbar durchführen. Die gewünschten Maße und Eigenschaften werden eingehalten. Nach dem Verschweißen ist der Zugang ins Innere des Bauteils kaum mehr möglich, aber warum auch? Selbst die Fertigung wurde, wenn auch gegen Widerstand, zur Zustimmung bekehrt.

Nun wird das Bauteil, hier als Beispiel eine Rotortrommel, aus mehreren Ringen zusammengesweißt. Alles läuft problemlos bis zur **Fertigteilkontrolle**. Diese erfolgt notwendigerweise ganz zum Schluss. Das Problem der schlechten Zugänglichkeit erkennt einer der von berufswegen ganz Genauen, als er mit einem Spiegel den uneinsichtigen Innenteil des Rotors prüft. Gefährliche **Schweißspritzer** haften auf den nahezu unzugänglichen Rotorscheiben. Diese Spritzer können die Lebensdauer der Scheiben entscheidend verkürzen.

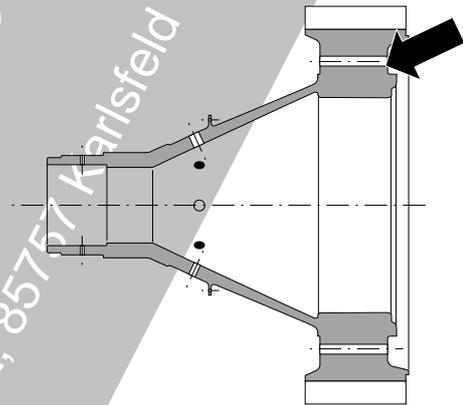
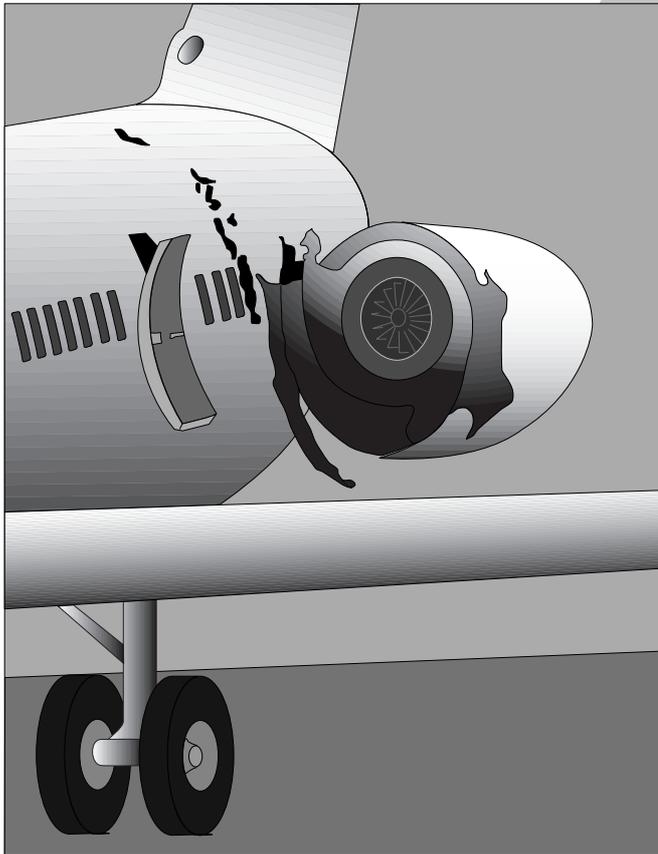
Eine **Nacharbeit** mit der notwendigen abschließenden metallografischen Kontrolle ist wegen der **schlechten Zugänglichkeit** nicht mehr möglich. Da ist, im wahrsten Sinn des Wortes, guter Rat teuer.

Wir erkennen daran, dass ein entscheidendes Kriterium der Machbarkeit eines Bauteils die ausreichende Zugänglichkeit ist. Sie wird für die notwendigen Prüfungen und gegebenenfalls für Nacharbeiten benötigt. Dies ist leicht gesagt, aber für den Konstrukteur eine große Herausforderung. Doch, der Mensch wächst an den Herausforderungen. Im übrigen sind wir fest davon überzeugt, dass...“dem Konstruktor ist nichts zu schwören“ ist.

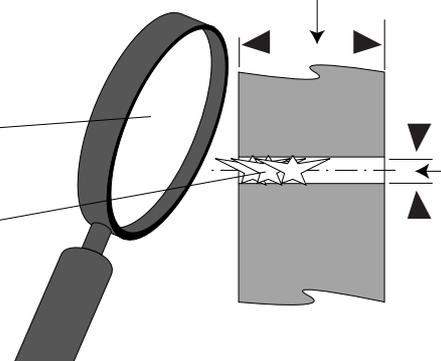
Das bedeutet für unser Handeln:

- Ausreichende **Zugänglichkeit** nicht nur für die Fertigungsprozesse sondern auch für erkennbar notwendige Nacharbeiten und die Prüfung der Lebensdauer beeinflussender Zonen an den Bauteilen gewährleisten.
- Gerade schlecht zugängliche Bauteilzonen sollten die Aufmerksamkeit des Prüfers besonders anziehen.
- **Rieseln Partikel** aus einem Hohlteil, ist deren Herkunft und Ursache zu ermitteln und gegebenenfalls das Bauteil auf Schädigungen zu prüfen.
- Ein gutes Werkzeug zum Auffinden anhaftender Spritzer ist die **feinfühlig Hand des Prüfers**. Er sollte deshalb nach Möglichkeit uneinsehbare Bauteizonen im Bereich von Schweißungen abtasten. Doch, **Vorsicht bei Titanteilen die Temperaturen oberhalb 450°C** erfahren können (siehe Kapitel 36).

Eine ausreichende visuelle Prüfmöglichkeit ist immer anzustreben. Hier ist besonders der Konstrukteur gefordert. Geeignete Hilfsmittel sind bereit zu stellen.



- schlechte Einsicht bei dünnen und/oder langen Bohrungen.
- Zu geringe Brennweite
- Spiegelung in der Bohrung verhindert das Erkennen von Details.



Probleme der visuellen Prüfung:

Bild 54

Bohrungen sind wegen ihrer sog. Kerbwirkung besonders hoch beanspruchte Bauteilzonen. Sie bestimmen häufig die **Betriebslebensdauer des Bauteils**. Leider sind sie nicht einfach zu prüfen wenn die Auswertung visuell erfolgt.

Im dargestellten Fall begünstigte eine fertigungsbedingte Schädigung in einer Bohrung einen **Scheibenbruch**.

55. „Vertrauen ist gut, Kontrolle ist besser“

(Wenn die Qualitätssicherung über eine Prozessüberwachung erfolgen muss, ist der Werker besonders gefordert).

Wir würden ja gerne beim Metzger etwas mehr für das Bio-Schnitzel zahlen. Wäre da nicht im Hinterkopf immer ein Verdacht. Ist da wo Bio drauf steht auch wirklich nur Bio drin? Wir können dem Schnitzel eine unverdächtige Vorgeschichte nicht ansehen. Es muss also beim Glauben bleiben. Um diesen Glauben zur Gewissheit werden zu lassen muss die Qualität nachvollziehbar sein. Dafür werden lückenlose Herkunftsnachweise dokumentiert.

Wie ich das Problem sehe:

Im Triebwerkbau werden bekannterweise, abgesehen von der Kantine, keine Schnitzel produziert. Wenn doch, stände sicher wegen der Priorität niedrigen Kraftstoffverbrauchs und sauberer Abgase Bio drauf. Die angesprochene Problematik ist jedoch in anderer Form durchaus vorhanden.

Üblicherweise wird die Qualität unsere Bauteile mit Prüfungen und Kontrollen nachgewiesen und gesichert. Das erfordert jedoch das ausreichend sichere Auffinden des Prüfmerkmals. Nun gibt es aber unverzichtbare Fertigungsschritte wo der Prüfnachweis nicht möglich ist. Der Grund ist das fehlende, ausreichend sichere, serieneignete Prüfverfahren. Eine solche Situation stellen „**Klebestellen**“ in **Schweißungen** dar. Es handelt sich um **flächige Bindefehler**. Ähnlich wie bei unserem anfangs erwähnten Schnitzel, bleibt zur Qualitätssicherung hier nur die lückenlose Überwachung und Dokumentation. Sie umfasst alle relevanten, erprobten und ausreichend genau festgelegten Fertigungsparameter. Die Erfahrung zeigt, dass sich auch so, z.B. bei **Reibschweißungen** und **Diffusionsschweißungen** eine triebwerksgeeignete Qualität gewährleisten lässt. Voraussetzung ist die Zuverlässigkeit der Maschinen, der Überwachungssysteme und des Fachpersonals. Dabei sind **Abweichungen der spezifizierten Prozessparameter** wichtige Hinweise auf eventuelle Qualitätsmängel. Das gilt bereits für den Anlieferungszustand und erstreckt sich auf den gesamten Fertigungsprozess. Wo dies nicht gelingt, lässt sich die notwendige Bauteilsicherheit nicht gewährleisten. Solche Verfahren können nicht mit gutem Gewissen angewendet werden.

Das bedeutet für unser Handeln:

Soweit es möglich ist wird man Fertigungstechnologien bevorzugen, deren Ergebnisse in ihren relevanten **Qualitätsmerkmalen durch anerkannte Prüfverfahren kontrollierbar** bzw. nachweisbar sind. Ist es jedoch notwendig, die Qualität durch Verfahrensüberwachung zu gewährleisten, gelten die folgenden Forderungen:

- Das **Verfahren muss ausreichend erprobt sein** und die bauteilspezifischen Verfahrensparameter und Vorrichtungen sind festgeschrieben.
- Eigenmächtiges Abweichen vom vorgeschriebenen Fertigungsablauf, hierzu gehören auch Vorarbeiten wie Reinigen oder Änderungen an den Vorrichtungen, ist unzulässig.
- Die Funktionen der Fertigungsmaschinen, Dokumentations- und Überwachungssysteme sind in geeigneten **regelmäßigen Überprüfungen** sicher zu stellen.

- Das für den Fertigungsprozess verantwortliche Fachpersonal muss **ausreichend Erfahrung** besitzen um z.B. Anzeichen für bedenkliche Veränderungen an Maschine und Bauteilen rechtzeitig zu erkennen.

Eine ausreichend sichere zerstörungsfreie Prüfung ist der indirekten Qualitätssicherung in Form einer Überwachung der Prozessparameter vorzuziehen.

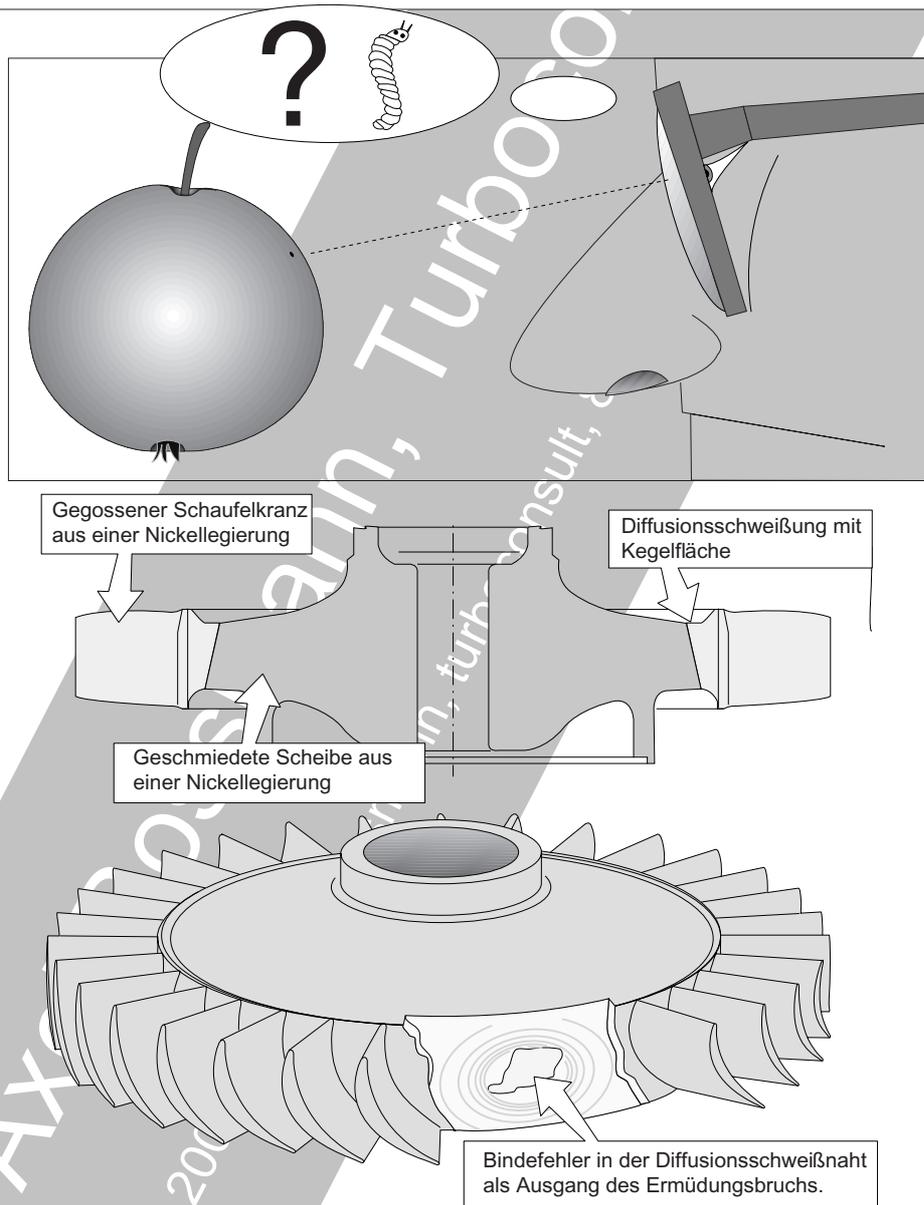


Bild 55

Bindefehler oder Klebstellen (Kissing Bonds) sind gefährliche **Fehlstellen in Schweißungen**. Hier ist nur eine teilweise Bindung vorhanden. Das verhindert eine ausreichend sichere Auffindbarkeit mit serieneigneten, zerstörungsfreien Prüfverfahren. Die **Qualitätssicherung muss deshalb über Prozess-**

parameter erfolgen. Weichen diese unbemerkt ab und/oder kommen weitere nicht überwachte Einflüsse ins Spiel wird diese Form der Qualitätssicherung unterlaufen. Daran scheiterte beispielsweise ein Einsatz diffusionsgeschweißter Turbinenräder.

56. „Wetterföhlig“

(Klebstoffe und Beschichtungen können sehr empfindlich auf ihre Umgebung reagieren).

Wer nicht wetterföhlig ist hat Voraussetzungen für einen glöcklichen Menschen. Leider sind das nur die Wenigsten. Wir, in einer ausgeprägten Föngegend, können da nur aufseufzen. Hier schmerzt der Kopf, dort wird nach Luft geschnappt, das Herz, der Kreislauf... ja gibt es etwas, das nicht vom Wetter beeinflusst wird? Da ist die unbelebte Natur zu beneiden. Hier gibt es keine Wetterföhligkeit...oder doch?

Wie ich das Problem sehe:

Welche Eigenschaften des Wetters bewirken eigentlich die Wetterföhligkeit. Als Techniker geht man von den handfesten Dingen wie Luftdruck, Luftfeuchtigkeit und Temperatur aus. Der Physiker wird wohl weniger offensichtliche Dinge wie die elektromagnetische Strahlung beisteuern.

Und da sollen die komplexen Vorgänge moderner Fertigungsmethoden nicht beeinflusst sein? Das gilt besonders für die **Beschichtungstechnik** mit viel Chemie und Physik. Wir ahnen es schon, auch hier ist nicht die Insel der Seeligen, was die Wetterföhligkeit anbetrifft.

Dass **Lacke**, abhängig von der Atmosphäre langsamer oder schneller trocknen, haben wir alle schon beobachtet. Dass aber ein moderner Kunststofflack oder **Kleber**, wenn er längere Zeit in einer offenen Dose an der Luft steht, seine Klebwirkung verliert ist weniger gegenwärtig. Ein Grund ist, er hat **Feuchtigkeit aus der Luft** angezogen oder wichtige Bestandteile haben sich verflüchtigt. Besonders **Silikon gummi** reagiert auf **Luftfeuchtigkeit** empfindlich. Hohe Temperaturen führen gewöhnlich zu schnellem Abbinden und Aushärten. Zu niedrige Temperaturen strapazieren dagegen unsere Geduld. Aber auch zwei nebeneinander stehende **offene Dosen** eines Zweikomponentensystems können miteinander über Dämpfe „kommunizieren“ und sich zur Unbrauchbarkeit verschwören.

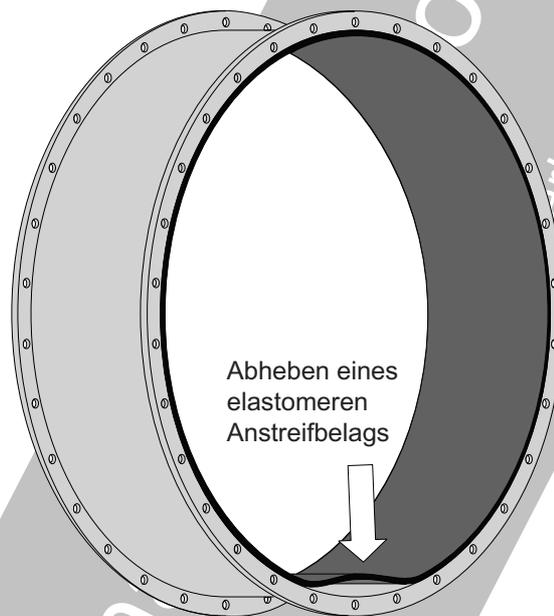
Wir sehen also, dass in unseren Fertigungsprozessen eine Art Wetterföhligkeit die Qualität entscheidend beeinflussen kann. Diese Empfindlichkeit ist genau so wenig wie vom Arzt als „Pipifax“ abzutun.

Das bedeutet für unser Handeln:

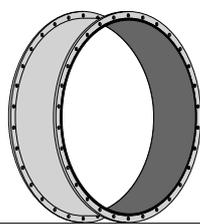
- **Dosen** von Klebern und Beschichtungskomponenten nur für den Gebrauch **kurzzeitig öffnen**.
- Keine geöffneten **Dosen nebeneinander** stehen lassen.
- **In Räumen mit sensiblen Beschichtungsprozessen** dürfen keine möglicherweise schädigende andere Prozesse durchgeführt werden.
- **Haltbarkeitsdatum** einhalten bzw. beachten.
- Vorschriftsmäßige **Lagerung** (z.B. Temperaturen beachten)
- **Reste** vorschriftsmäßig entsorgen, keine Wiederverwendung.

- **Anmischen** in sauberen Gefäßen ohne Rückstände von Reinigungs- und Lösungsmitteln oder Schichtresten.
- **Vorbereitung der Oberfläche** die beschichtet oder verklebt werden soll in geeigneten, kontrollierten (z.B. Temperatur, Luftfeuchtigkeit) Räumen.

Lacke, Kleber und Kunststoffe reagieren sehr sensibel auf Umwelteinflüsse bei der Verarbeitung.



Umwelteinflüsse bei der Verarbeitung:
Luftfeuchtigkeit
Luftverunreinigungen
Temperatur



Bindefläche:
Verunreinigungen
Korrosion
Feuchtigkeit

Einige Einflüsse vor der Verarbeitung:

- Lagerzeit
- Topfzeit
- Ablauftermin
- Angebrochene Behälter
- Zumischung von Resten
- Lagertemperatur



Bild 56

Wichtige Eigenschaften wie Festigkeit, Zähigkeit und **Haftung eines Belags** werden von **Umwelteinflüssen bei Lagerung und Verarbeitung** bestimmt. Dies ist besonders problematisch weil es häufig keine zerstörungsfreie Prüfmethode gibt um diese Eigenschaften am

Bauteilnachzuweisen. So wird das Problem oft erst erkannt wenn es zur deutlichen Ablösung, eventuell mit Folgeschäden kommt. Das können bei Anstreifbelägen schwere Labyrinth-schäden oder Schaufelschäden sein.

57. „Man muss sich nur zu helfen wissen....?“

(In Fertigung und Montage nur zugelassene Vorrichtungen und Hilfsmittel verwenden).

Die Waschmaschine macht ungute Geräusche. Da ist die „Axt im Hause“, sprich der praktisch veranlagte Hausherr gefordert. Der zerlegt die kränkelnde Maschine. Leider ist Spezialwerkzeug notwendig. Aber man besitzt ja einen robusten Schraubenzieher. Mit diesem Universalwerkzeug haben wir schon jede Maschine klein gekriegt. Leider ist dies wörtlich zu nehmen.

Wie ich das Problem sehe:

In einer Fachzeitschrift war zu lesen, dass eine **Turbinenscheibe** eines großen Triebwerks während eines Abnahmelaufs im Rahmen der Wartung brach. Ein ca. 20 kg schweres Bruchstück erzeugte verheerende Schäden am Flugzeug. Die Untersuchungen ergaben folgende Anrissursache:

Von einer Nut die zur Schaufelaufnahme dient, lief ein Ermüdungsriss in die Scheibe. Dieser Riss ging von einer **Beschädigung der Nutoberfläche** aus. Die Beschädigung entstand offenbar weil bei der Überholung, zum Abdrücken eines festsitzenden Rings mit einem Hilfsmittel gearbeitet wurde. Dieses **ungeeignete Werkzeug** kerbte die Scheibe ein. An der so entstandenen Schädigung konnten nun die normalerweise sicher ertragenen zyklischen Beanspruchungen zum Risswachstum führen.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Nur für die jeweilige spezielle Anwendung **vorgesehene und bereitgestellte Werkzeuge** und Vorrichtungen verwenden.
- Der **vorschriftsmäßige Zustand von Werkzeugen und Vorrichtungen** ist zu erhalten. Verschleiß und Beschädigungen sind geeignet zu reparieren.
- Keine nicht vorgesehenen „Universalwerkzeuge“ verwenden.
- **Keine nicht vorgesehenen Hilfswerkzeuge** wie Durchschläge, Beilagen und Keile verwenden. Hier ist auch der Werkstoff des Werkzeugs von Bedeutung um unzulässige schädigende **Aufschmierungen** auszuschließen.

die Beschädigung einer Turbinenscheibe mit einem ungeeigneten Demontagewerkzeug führte zum Scheibenbruch mit schweren Folgeschäden.

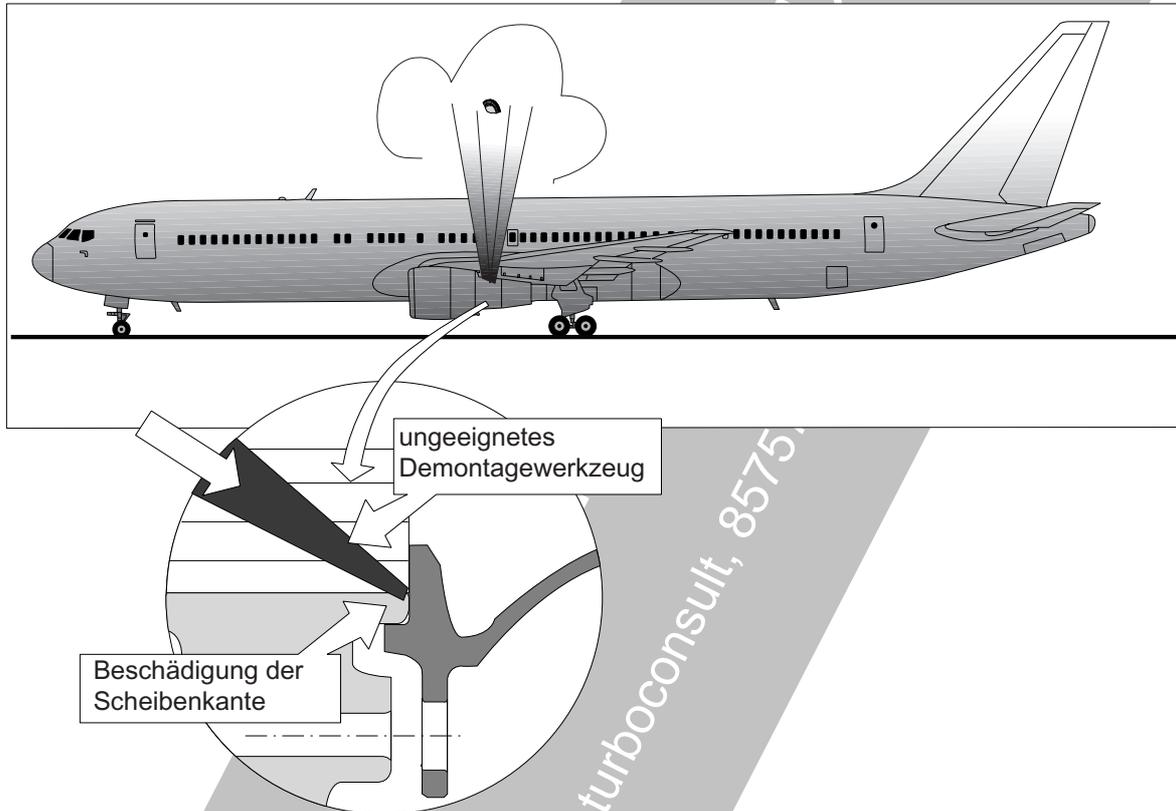


Bild 57

Ungeeignete Fertigungs- und Montagehilfen können Bauteile gefährlich beschädigen. An scheinbar kleinen Kerben können Ermüdungsrisse entstehen und katastrophale Schäden auslösen. Im dargestellten Fall wurde ein Hilfsmittel als Demontagewerkzeug zweckentfremdet.

ANGROSSI
© 2009 by Dr. Ingrid Bressmann, turboconsult, 85751

58. „Ein Einzelfall?“

(Von einem Einzelfall kann nur in den aller wenigsten Fällen ausgegangen werden).

Nimmt man den Begriff Einzelfall ernst, heißt das: Dieser Fall ist weder schon einmal aufgetreten, noch ist mit ihm in Zukunft zu rechnen. Nach dieser Definition müssen selbst sehr seltene Ereignissen noch längst kein Einzelfall sein.

Nehmen wir die Möglichkeit von einem Blitz erschlagen oder einem Hai gebissen zu werden. Sicher nicht alltägliche Ereignisse. So selten, dass man einen weiteren Fall ausschließen kann, sind sie aber doch nicht. Solche Fälle werden immer wieder bekannt. Von einem Einzelfall kann also wohl doch nicht gesprochen werden. Deshalb sind Vorsichtsmaßnahmen, wie bei Gewitter nicht unter einem Baum Schutz zu suchen oder nicht im „haifischverseuchten“ Wasser zu baden durchaus sinnvoll. Wir beherzigen sie in eigenem Interesse. Im Anblick eines vom Hai Gebissenen kommen wir kaum zu dem Schluss eines Einzelfalls. Danach wird sich unser Badeverhalten richten.

Wie ich das Problem sehe:

Handelt es sich bei einem Schaden um einen **Einzelfall** ist mit einer Wiederholung nicht zu rechnen. Das bedeutet, dass eigentlich keine Maßnahmen wie Abhilfen, Nacharbeit oder Sonderaktionen erforderlich sind. In einem solchen Fall treten also dafür keine Kosten auf. Prestigeschädigende Austauschaktionen sind nicht notwendig. Deshalb liegt es menschlich nahe, ein Problem zum Einzelfall zu erklären.

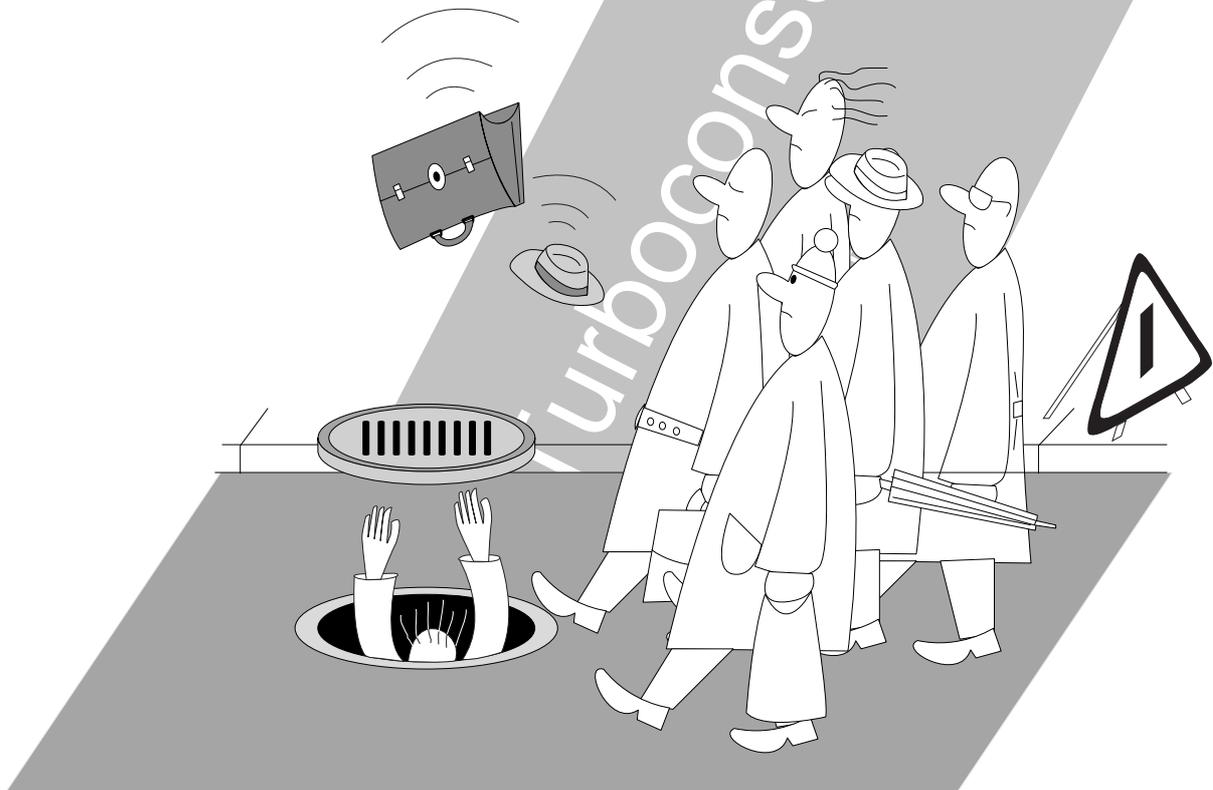
Die Erfahrung zeigt, dass eine solche Situation dann auftritt, wenn ein besonders unangenehmer Schaden vorliegt. Die Motivation nach möglichen **Parallelfällen** zu suchen oder frühere Vorkommnisse im Zweifelsfall dafür zu erklären, hält sich in Grenzen. Was die Zukunft anbetrifft kann man beobachten, dass gerade Probleme deren ursächliche Zusammenhänge unklar sind als Einzelfall eingestuft werden. Das ist der Augenblick einer schweren Fehleinschätzung mit dem Potential gravierender Folgen.

Wie bereits anfangs erwähnt, liegt ein Einzelfall nur dann vor, wenn ein weiterer Schaden sicher auszuschließen ist. Dafür ist es erforderlich die gesamten relevanten Einflüsse und Schadensmechanismen mit ausreichender Sicherheit zu kennen und verstanden zu haben. Gerade das ist aber wie beschrieben häufig nicht der Fall. Weil die Technik sich von Fehleinschätzungen nicht beeindrucken lässt, ist mit dem Gegenbeweis in Form eines Parallelfalls zu rechnen. Auf Grund der verlorenen Zeit und eines weiter angestiegenen Risikos ist die Situation dann noch ernster.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Die **Einstufung als Einzelfall** ist von den zugständigen Fachabteilungen vorzunehmen.
- **Voraussetzung** ist das lückenlose Verständnis der Schadensmechanismen und ursächlichen Einflüsse
- **Frühere Fälle** in ähnlichem Zusammenhang wie bei gleichen Fertigungsverfahren sind genauestens auf die Möglichkeit von Parallelfällen zu überprüfen. Im Zweifelsfall ist bis zum Gegenbeweis von einem Parallelfall auszugehen.
- Wir befinden uns auf der sicheren Seite wenn wir die Einstufung als **Einzelfall generell ausschließen**.

Der "Einzelfall" bedeutet für Viele:
Man braucht nichts machen



Voraussetzung für die Einstufung "Einzelfall"
ist die genaue Kenntnis der Ursache!

"Ausreisser": Entspricht nicht den Eigenschaften der Mehrheit

"Sonderfall": Entsteht durch eine unzulässige Eigenschaft

Verwandte Probleme: Ausschließen einzelner "unpassender"
Messwerte einer Messreihe

Bild 58

*Ein Schaden lässt sich nur sehr selten berechtigt zum **Einzelfall** erklären. **Voraussetzung wäre die lückenlose Klärung** der Entstehungsursache. Das ist jedoch meist nicht der Fall. Erfahrungsgemäß werden sogar offensichtlich **ähnliche Fälle** zu Einzelfällen erklärt. Diese*

Einstufung wird jedesmal mit einer anderen Kombination ursächlicher Einflüsse erklärt. Dies ist ein typisches Problem komplexer Schadensmechanismen.

59. „Unterm Erwartungshorizont“

(Oft sind es gerade große gut erkennbare Fehlstellen, die wir auf scheinbar unerklärliche Weise nicht registrieren).

Beim Suchen mache ich immer wieder eine überraschende Erfahrung. Angenommen, meine Frau schickt mich eine Packung bestimmter Nudeln aus dem Vorrat im Keller zu holen. Bei mir besteht die fixe Vorstellung, das Paket ist länglich und blau. Also suche ich im Keller in dem durchaus nicht großen Regal. Komisch, ein solches Paket ist offenbar nichts mehr vorhanden. Ich bin überzeugt alles mit ausreichender Sorgfalt überprüft zu haben. Also zurück zur Auftraggeberin mit der Nachricht: Nichts mehr da. Du mit Deinen Malwurfsaugen antwortet „die Gute“ und geht selbst in den Keller. Ich gehe mit, denn das will ich nicht auf mir sitzen lassen das eigentlich deutlich erkennbare Paket übersehen zu haben. Aber, peinlich, peinlich. Ein Griff und meine Frau hat ein großes, in der ersten Reihe stehendes Paket mit den gewünschten Nudeln. Die Schachtel ist im Gegensatz zu meiner Vorstellung grün und würfelförmig. Groß ist die gewünschte Nudelsorte aufgedruckt. Ich war anders programmiert. Die Nudelpackung befand sich außerhalb meines Erwartungshorizonts. Ähnliche Beispiele gibt es zu Hauf. So gibt es Bilder, die gleichzeitig verschiedene Szenen darstellen. Vom Betrachter werden durchaus nicht beide spontan erkannt. Dass ich da nicht der Einzige bin zeigt mir auch die Erfahrung im Berufsleben.

Wie ich das Problem sehe:

Unter einem individuellen **Erfahrungshorizont** verstehe ich alle Dinge die wir erwarten bzw. die unser Weltbild prägen. Dazu gehört auch unsere individuelle Sichtweise, die in erster Linie subjektiv ist. Ein Beispiel sind häufig signifikant voneinander abweichende Zeugenaussagen zum gleichen Vorgang.

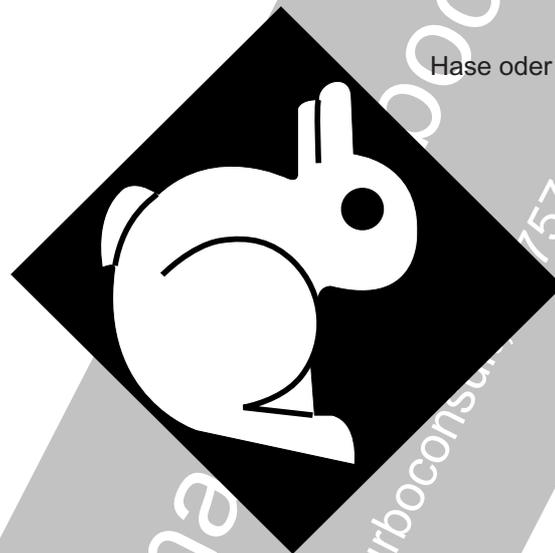
Ein typisches Beispiel sind **Anzeigen der Eindringprüfung**. An einem Bauteil wird in einem Versuchstriebswerk nach einer Unwucht ein ca. 20 cm langer Riss in einer Turbinenscheibe gefunden. Die Laboruntersuchung weist auf einen Werkstofffehler hin. Das wird von der zuständigen Prüfungsabteilung kategorisch mit dem Argument ausgeschlossen: Einen so großen Fehler hätten wir mit absoluter Sicherheit gefunden. An diesen Bauteilen wurde seit Jahren ohne Erfolg nach Fehlern um 1 Millimeter im unteren Grenzbereich der Prüfung gesucht. So fehlen auch **Erfolgslebnisse** in Form einer gefundenen Fehlstelle. Tritt nun ein unerwartet großer Fehler auf, besteht die Gefahr, dass dieser nicht wahrgenommen wird. Vielleicht wird er auch als Wasserfleck eingestuft. Frei nach Wilhelm Busch „weil nicht sein kann, was nicht sein darf“. Solche Vorkommnisse sind zwar selten aber durchaus keine Einzelfälle. Das Argument, der **Fehler ist so groß**, dass er sicher gefunden wird, gilt also nicht von vorneherein. Für die Ermittlung der Fehlerursache kann es trotzdem von entscheidender Bedeutung sein, scheinbar unwahrscheinlichen Möglichkeiten der Fehlerentstehung nachzugehen.

Das bedeutet für unser Handeln:

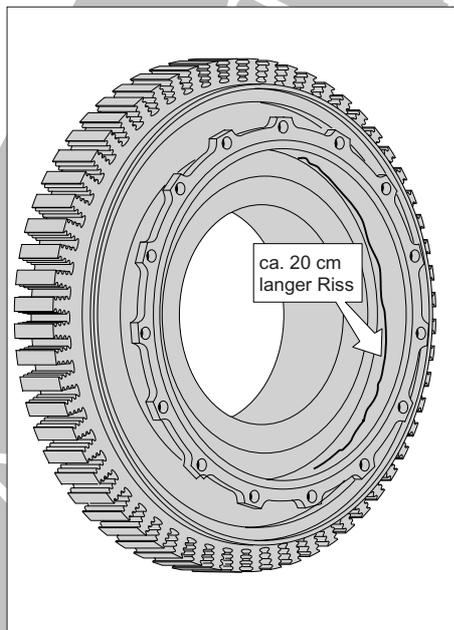
- Eine **ungewöhnliche Fehlergröße** ist nicht automatisch der Beweis, dass der Fehler nicht vor einer zerstörungsfreien Prüfung vorhanden war.
- Die Fehlergröße darf nicht bestimmte Untersuchungsrichtungen ausschließen.

- **Erfolgslebnisse und Motivation des Prüfpersonals** sind ein wichtiger Faktor in deren Effektivität. Hierfür gibt es Abhilfemöglichkeiten wie das **Einschleusen von Bauteilen** mit Fehlern. Natürlich ist sicher zu stellen, dass diese nicht zum Einbau kommen können.
- Den Mitarbeitern ist diese **menschliche Fehlermöglichkeit bewusst zu machen**.

Der Mensch erkennt, was er erwartet. Er registriert deshalb Dinge außerhalb seines Erwartungshorizonts nicht.



Hase oder Ente?



Wider Erwarten ist die Wahrscheinlichkeit durchaus gegeben, dass ein so großer Riss übersehen wird.

*Das Bild oben zeigt dem Betrachter zwei unterschiedliche Tiere. Welches er beim ersten Blick sieht ist subjektiv. Erwartet er eines der Tiere, wird er wohl dieses auch sofort erkennen. Ist er unkritisch, wird es wohl bei dem Befund bleiben. Ganz ähnliche Situationen treten erfahrungsgemäß auch in der Technik auf. Man sieht oft nur das, was man sehen will oder zu sehen gewöhnt ist, kurzum erwartet. Gerade bei **ungewöhnlich großen Rissprüfungen** außerhalb des „Erwartungshorizonts“ kann es zu einem solchen Effekt kommen. Die extreme Größe eines Risses der nach einer Eindringprüfung entdeckt wird, ist deshalb noch längst kein Beweis für eine Entstehung nach der Rissprüfung.*

Bild 59

60. „Wo gehobelt wird da fallen Späne“ (Späne können die Bauteilfestigkeit gefährlich absenken).

Wohl jeder von uns hat schon einmal mit Holz hantiert. Wir sind in vollem Schaffensrausch. Unsere Arbeit soll heute noch fertig werden. Plötzlich, ein leichter Stich an einem Finger, ein winziger Splitter ist in die Haut gedrungen. Nicht so schlimm. Mit spitzen Fingern wird gegebenenfalls ein herausragendes Stückchen gepackt und entfernt. Dann geht die Arbeit weiter. Manchmal sticht es vielleicht auch weiterhin ein Wenig, aber das wird sich wohl bald geben. Am Abend, im Bett fängt der Finger an sich mit einem leichten Schmerz zu melden. Also, die Allheilsalbe aus der Hausapotheke drauf. Trotzdem beginnt es mit der Zeit zu pochen. Am Morgen ist der Finger bereits rot, geschwollen und schmerzt unangenehm. Nun also zum Arzt. Nachdem er sich die „Schadensstelle“ angesehen hat, wiegt er bedenklich den Kopf: Ausschließlich für Salben scheint es zu spät zu sein. Wenn das nicht sofort richtig behandelt wird besteht die Gefahr einer Blutvergiftung und die kann lebensbedrohlich werden. Da werden wir wohl der Genesung etwas nachhelfen müssen. Eine örtliche Betäubung und ein kleiner Schnitt. Dann ein Verband und die Situation ist unter Kontrolle. Man sieht, ein kleiner eingedrungener Span kann ohne Spezialisten äußerst gefährlich werden.

Wie ich das Problem sehe:

Die beschriebene Situation hat durchaus ihre Parallelen in der **Zerspanung**, diesmal jedoch für das Bauteil. Wird ein Span vom stehenden Werkzeug gegen die sich schnell bewegende Bauteiloberfläche gepresst, heizt er sich von der Reibung stark auf. Es entstehen frische Metalloberflächen an Span und Bauteil die dazu neigen **miteinander zu verschweißen** (Kaltverschweißen, „**Fressen**“). Eine solche örtliche Aufheizung und Verschweißung bedeutet eine merkliche Werkstoffschädigung. Mit Festigkeitsabfall als Folge von Gefügeveränderungen und Kerbwirkung sowie gefährlichen Zugeigenspannungen ist zu rechnen. Gerade in Hohlräumen die einen **Spanabfluss behindern** und schlecht einsehbar sind besteht die Gefahr, dass sich ein **Span in die Bauteiloberfläche eindrückt** und mit dieser verschweißt. Das muss sich nicht in einem leicht erkennbaren Aufwurf zeigen. Die Oberfläche erscheint unbeeinflusst. Ein Hinweis könnten gegebenenfalls Anlauffarben sein. Werden diese nicht beachtet ist auch diese Chance einer rechtzeitigen Erkennung vergeblich.

Leider sind gerade **Hohlräume wie sie von Wellenansätzen und Bohrungen** in Rotorscheiben gebildet werden, zyklisch hochbelastet und dann für das Bauteil **lebensdauerbestimmend**. Wird eine beschriebene Schädigung nicht vermieden oder zumindest vorschriftsmäßig und von den zuständigen Fachabteilungen nachgearbeitet kann es zu einem katastrophalen Triebwerksschaden kommen (siehe Kapitel 54).

Das bedeutet für unser Handeln:

- Wir achten auf Anzeichen von **Spänestau** wie **besondere Geräusche, Anlauffarben, Spanaussehen**.
- Bei **Verdacht einer Schädigung** durch **eingedrückte Späne** sind unverzüglich die zuständigen Fachabteilungen zu konsultieren.

- Bereits die **Arbeitsvorbereitung** hat dafür zu sorgen, dass gefährlicher Spänestau nicht auftritt.
- **Nacharbeit** ist nach einem dokumentierten zugelassenen Verfahren durchzuführen. Eine **Überprüfung des Erfolgs** ist mit Hilfe geeigneter ZfP vorzunehmen und von der Festigkeitsabteilung zu bewerten.

Eingedrückte und/oder verschweißte Späne können die Schwingfestigkeit des Bauteils unzulässig beeinflussen.

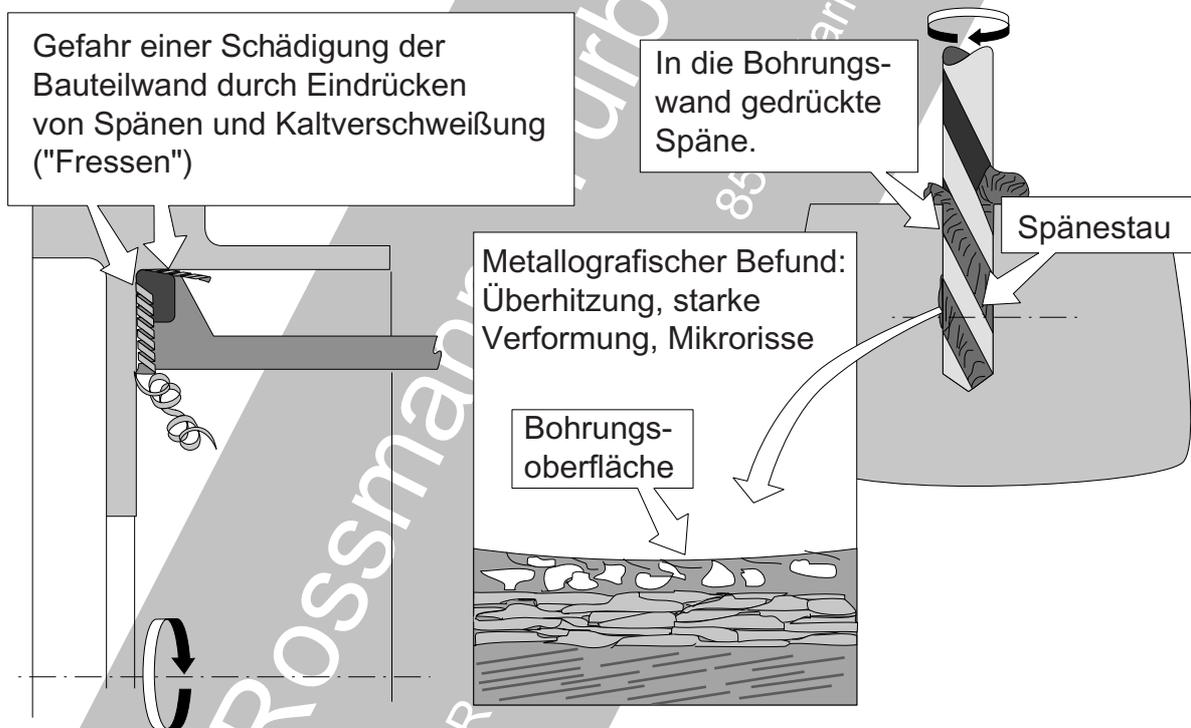


Bild 60

*Können Späne nicht ausreichend leicht abfließen und/oder die Zerspanungsbedingungen ungünstig kann es zum **Spänestau** oder zum Einklemmen von Spänen zwischen Werkzeug und Werkstück kommen. Das ist nicht nur lästig. Er kann die Sicherheit des betroffenen Bauteils und damit des gesamten Triebwerks beeinflussen. Die **Schädigung kann durchaus tiefer gehen**. Aus diesem Grund ist der **Erfolg einer eventuellen Nacharbeit nachzuweisen**.*

61. „Verschleppung, ein heimtückisches Problem der Fertigung“

(Verunreinigungen können im Fertigungsprozess verschleppt werden und so das Problem erheblich vergrößern).

So ein Stück Schokolade ist was Feines. Abends vorm Fernseher bei angenehmem Schimmerlicht muss es ja nicht immer Pop Corn sein. Ein Stückchen abbrechen und genüsslich auf der Zunge zergehen lassen. Leider ist dabei eine Schokoladenkrümel unbemerkt abgebrochen und in die Falte zwischen Hose und dem hellen Sitzkissen gefallen. Dort ist es schön warm. Die Schokolade zerfließt und es entsteht ein bemerkenswert brauner Fleck auf Hose und Kissen. Noch schlimmer, im Fernsehen ist wieder mal ein unerträgliches Programm. Also ein gutes Buch zur Hand und auf der Kautsch gemächlich relaxen. Die nächste Katastrophe naht in Form eines weiteren Flecks diesmal auf hellem Leder. Inzwischen haben die Kinder auf dem Fernsehsessel Platz genommen. Noch ist genügend Schokolade auf dem Fleck, um sich auch auf deren Hosen abzudrücken. Damit sind weitere „Stempelvorgänge vorprogrammiert.“ Auf diese Weise lässt sich unbemerkt und auf einfache Weise eine Wohnungseinrichtung ruinieren. Am nächsten Morgen im hellen Tageslicht wird die „Schokoladenverschleppung“ entdeckt und das ganze Ausmaß deutlich.

Wie ich das Problem sehe:

Die **Verschleppung von Verunreinigungen** im Fertigungsprozess ist heimtückisch. Wird sie erkannt sind meistens schon eine größere Anzahl Teile betroffen. Verunreinigungen können auf sehr unterschiedliche Weise verschleppt werden. Das kann über ein Bad erfolgen auf dem abgelöste Verunreinigungen schwimmen und bei der Herausnahme anderer Teile haften bleiben. Sie können über **Dämpfe** permanent oder mit einer beladenen Luftströmung transportiert werden. Typische Beispiele sind aggressive Dämpfe oder die Abluft einer **Galvanik**. Schlagen sich diese z.B. in Transportkisten oder auf Transportpaletten aus „saugfähigem“ Material nieder wird das nächste Bauteil wie von einem Stempel verunreinigt. So transportiert es seinerseits die Verunreinigung weiter. In einem **Vakuufofen** können Verunreinigungen verdampfen und sich auf andere Werkstücke niederschlagen. Wird vom Abrieb **verunreinigtes Strahlgut** verwendet, besteht die Gefahr, dass diese Verunreinigungen auf anderen, zu strahlende Bauteilen, haften bleiben. Ein ähnlicher Effekt ist von Bearbeitungswerkzeugen zum Schleifen und Glätten zu erwarten. Tritt **Pulver** aus einem unachtsam geöffneten Behälter in die Umgebung aus wird es ungeschützte Teile in der Nähe beaufschlagen. Selbst wenn verschüttetes Pulver mit einem **Staubsauger** gesammelt wird kann gerade dies zur weiträumigen Verteilung des Pulvers führen. Der Übeltäter ist ein ungeeigneter Staubsauger, der feine Staubpartikel mit der Abluft ausbläst.

Verschleppte Verunreinigungen lassen auf unterschiedliche Weise Probleme entstehen und/oder wirken schädigend. Typisches Beispiel ist die Beeinträchtigung der Eindringprüfung durch **Silikonverbindungen** (siehe Kapitel 32). Auch die Haftfestigkeit nachträglich aufgebrachtter Beschichtungen (z.B. galvanische Schichten) oder **Rissbildung und Versprödung bei einer Wärmebehandlung** (siehe Kapitel 17) oder bei Schweißungen ist möglich.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Wir achten auf **ungewöhnliches Aussehen der Werkstücke** vor und nach jedem Fertigungsschritt.
- Dem Fachmann auffällige **Veränderungen der Prozessmedien** sind ernst zu nehmen. Ursache, Art und Auswirkungen sind unverzüglich zu ermitteln.
- Bei Verschleppungsverdacht sind alle möglicherweise betroffenen **Bauteile zu ermitteln und zu überprüfen**.

Die Verschleppung unerwünschter Stoffe in der Fertigung gefährdet die Sicherheit und erhöht die Kosten der Bauteile.

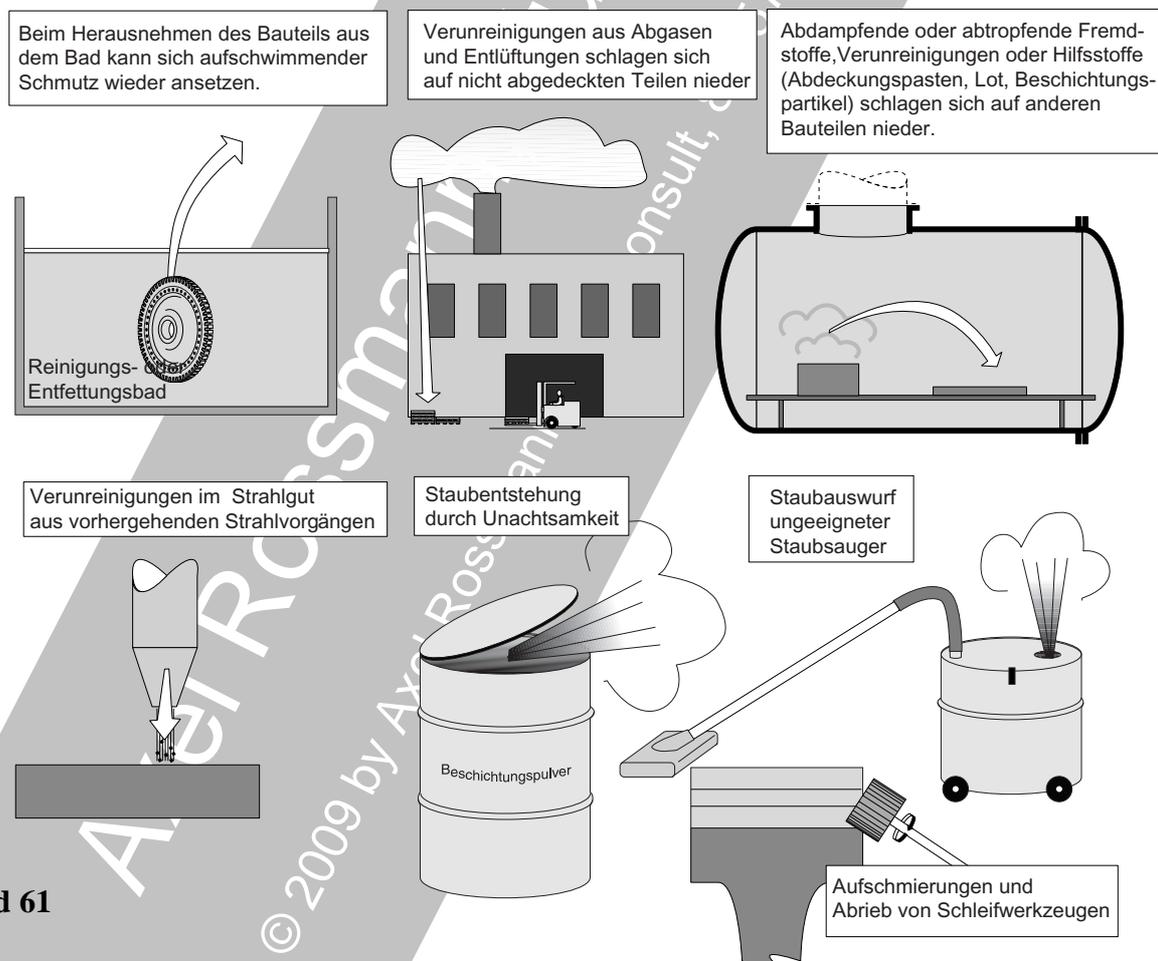


Bild 61

Einige typische Möglichkeiten der Übertragung und Verschleppung von Verunreinigungen im Fertigungsprozess.

62. „Unerwünschte Tatroo's.“

(Ungeeignete Farben und Stifte können Zusatzkosten erfordern und im Extremfall das Betriebsverhalten des Bauteils beeinträchtigen).

So ein Tatroo kann für jungen Menschen durchaus erstrebenswert sein. Es ist eine Art Kennzeichnung die auch etwas über die Eigenschaften des Trägers verraten kann. Wenn dann im reiferen Alter Seriosität die Karriere unterstützen soll und das Tatroo auf der etwas weniger ansehnlichen Haut an Form verliert, kommt der Tag an dem man sich sehnlichst wünscht, es nie gehabt zu haben. Aber wie es ohne Beeinträchtigung der Haut wieder los werden? Ohne ein gewisses Risiko, ganz abgesehen von Schmerzen, Aufwand und Kosten, wird es wohl nicht abgehen. Da sind Spezialisten gefragt. Wie viel einfacher wäre es doch gewesen einen geeigneten Aufkleber oder eine Farbe zu verwenden. Sie lassen sich später ohne Probleme wieder entfernen.

Wie ich das Problem sehe:

Eine ähnliche Situation können wir auch bei der **Kennzeichnungen** von Bauteilen erleben. Werden keine dauerhaften **Beschriftungen** benötigt, etwa zur Materialkennzeichnung auf Blechen oder Stempel nach einen Prüfprozess, genügen Farben und Stifte. Sie enthalten Farbpigmente und ein Trägermedium. Mit zugelassenen Farben ist auch während nachfolgender Fertigungsprozesse wie einer Wärmebehandlung nicht mit einer unliebsamen Überraschung zu rechnen. Kommt jedoch eine nicht zugelassene Kennzeichnung zur Anwendung besteht die Gefahr, dass sich während eines späteren Fertigungsschritts oder im Betrieb (z.B. bei einem Heißteil) die Farbe in den Werkstoff „einbrennt“. Im harmloseren Fall handelt es sich lediglich um Verfärbungen oder Abweichungen in der Rauigkeit auf Grund eines veränderten Oxidationsverhaltens. Doch bereits diese scheinbare Nebensächlichkei kann für den kritischen Kunden ein Grund der Zurückweisung sein. Das ist nicht ganz unberechtigt, denn er kann ja nicht wissen wie sich dieses Merkmal im Betrieb auf die Bauteillebensdauer, z.B. durch verstärkte örtliche **Oxidation**, auswirkt. Muss nun die gekennzeichnete Stelle nachgearbeitet werden ist dies zumindest kostenträchtig. Selbst wenn wir bereits vor der Auslieferung diese Nacharbeit durchgeführt haben, kann die Nacharbeitsstelle den Kunden misstrauisch machen und unangenehme Rückfragen mit Dokumentationen auslösen. Auch eine Beeinträchtigung der Haftfestigkeit oder des Aufbaus einer galvanischen Beschichtung ist nicht von der Hand zu weisen und kann zumindest eine kostenintensive Nacharbeit erfordern. Äußerst bedenklich wird es jedoch, wenn Farbrückstände mit dem Werkstoff reagieren und beispielsweise die Kristallgrenzen, wenn auch nur oberflächlich, verändern. In einem solchen Fall können im Betrieb Risse begünstigt werden.

Das bedeutet für unser Handeln:

- Wir verwenden nur **explizit zugelassene** erkennbar identifizierbare Stifte und Farben.
- Im Zweifelsfall ist beim zuständigen Fachmann rückzufragen.
- Treten Anzeichen für „eingebrennte“ zeitbegrenzte Beschriftungen auf ist dies den zuständigen Fachabteilungen zu melden.
- Eventuelle **Nacharbeit ist geeignet abzusichern**.

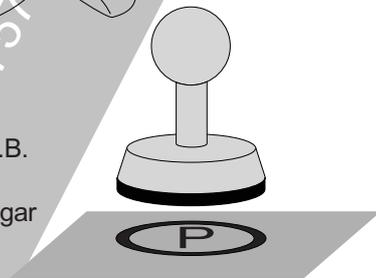
Ungeeignete Farben und Stifte insbesondere zur Kennzeichnung von Heiteilen, beeinflussen den Fertigungsprozess und das spätere Betriebsverhalten.

Typische, von einer ungeeigneten Kennzeichnung beeinflusste Anwendungen:

- **Heiteile:** Reaktionen, Oxidation
- **Beschichtungen:** Haftfestigkeit, Struktur
- **tzungen:** kein gewünschter Effekt (schlechte Benetzung).
- **Fügungen** wie Löten, Diff-, EB-Schweißen, Reibschweißen: Bindefehler durch Rückstände ausgelöst durch Reibbeiwertsnderung, Benetzung, Oxidation.



Stempel sind eine häufig vorgeschriebene Kennzeichnungsart, z.B. bei der Qualitätssicherung. Stempelfarbe kann nachfolgende Fertigungsprozesse beeinflussen. Falsche Stempelfarbe kann sogar Werkstoffe schädigen.



Ungeeignete Kennzeichnung auf metallisch blanker Oberfläche

Ungleichmäßige Oxidation im Bereich der Kennzeichnung nach einer Wärmebehandlung an Luft

Nach einer Ätzbehandlung zur Entfernung der Oxide bleiben Oxidreste und eine örtliche Versprödung (Gefahr von Rissbildung) im Bereich der Kennzeichnung

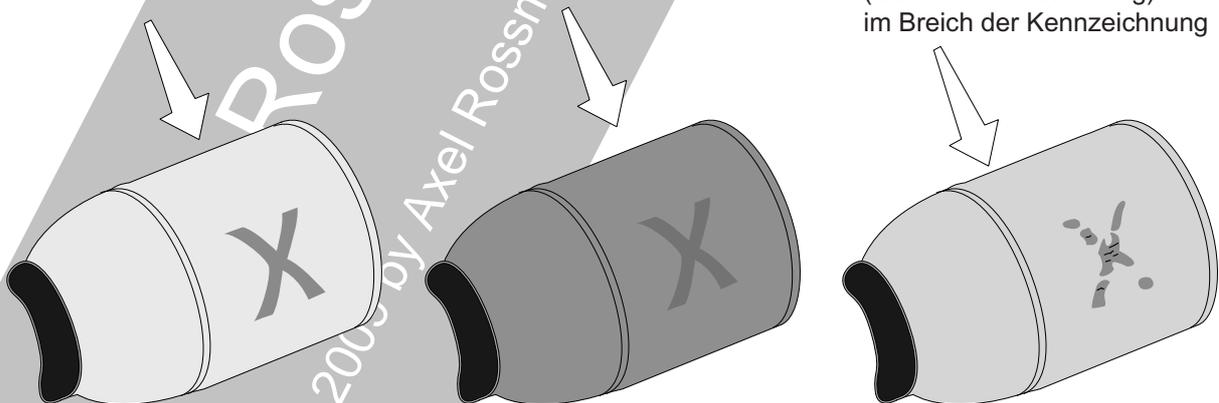


Bild 62

Auch scheinbar harmlose zeitbegrenzte Beschriftungen können von nachfolgenden Fertigungsschritten und im Betrieb zumindest das Aussehen eines Bauteils unerwünscht verändern.

63. „Umbau in der Wohnung, eine Horrorvorstellung der Hausfrau.“

(Bauarbeiten sind in einer Fertigung häufig notwendig. Sie können die Werkstücke schädigen).

Nach einigem Planen fiel die Entscheidung. Das Bad muss umgestaltet werden. Badewanne und Waschbecken werden erneuert und umgesetzt. Das erfordert die Änderung der Anschlüsse und die neue Verlegung von Leitungen. Ohne Aufstemmen der Wände und des Bodens geht das nicht. Also raus mit dem alten, ein neuer Boden muss her. Die alten Fliesen passen nun auch nicht mehr dazu, das ist die Gelegenheit für neues Design. Maurer-, Maler- und Installationsarbeiten werden notwendig und setzen unterschiedlichste Medien frei. Es bedarf wenig Erklärungen um der erfahrenen Hausfrau den kalten Schauer über den Rücken laufen zu lassen. Staub und Spritzer von Beton, Gips, Kleber, Dichtmasse und Farbe sind eine Herausforderung. Da geben selbst umfangreiche Abdeckungen nur begrenzten Schutz. Der Staub wird sich nicht auf die Baustelle eingrenzen lassen. Im Gegenteil, es ist damit zu rechnen, dass die gesamte Wohnung von einer Staubschicht überzogen wird. Die Schuhabdrücke der Handwerker tun ihr Übriges. Umfangreiche Säuberungsarbeiten kündigen sich an.

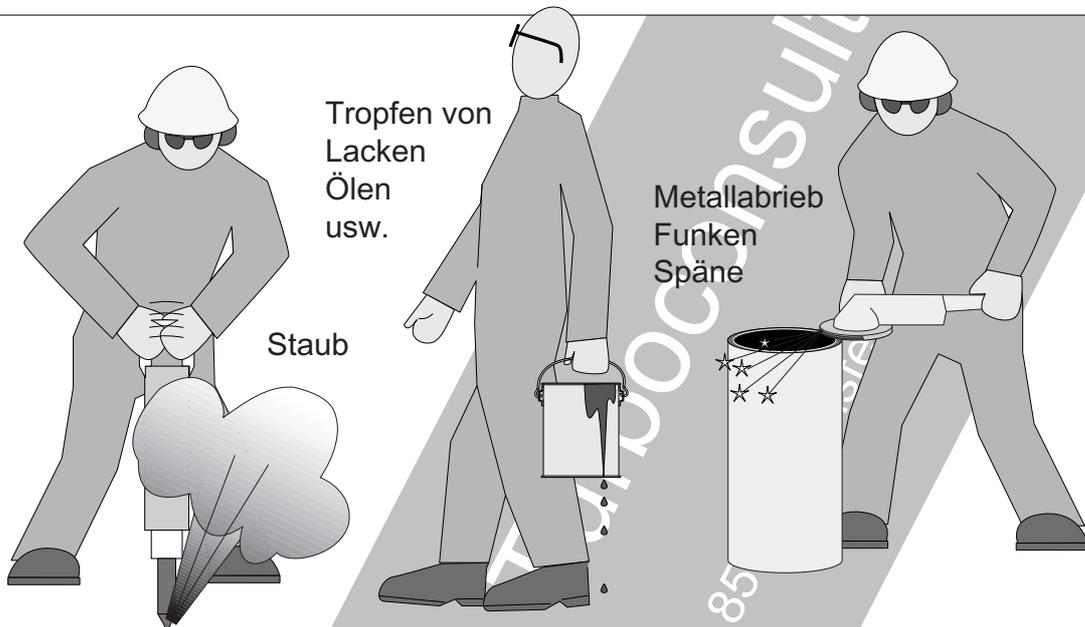
Wie ich das Problem sehe:

In einer Fertigung ist häufig mit **Umbauten** zu rechnen. Es handelt sich um Modernisierung, Neuinstallation und **Umsetzen von Maschinen** oder neue Versorgungsleitungen, um nur einige Gründe für solche Arbeiten zu nennen. Natürlich wird versucht Bereiche der Bautätigkeit gegen die weiter laufende Fertigung abzudichten. Umfangreiche Folienvorhänge sind ein probates Mittel. Trotzdem, der feine Staub findet einen Weg. Plötzlich weisen zwischengelagerte Werkstücke eine feine Staubschicht auf die ein Fingerstrich enttarnt. Vielleicht hat sich Staub auf Prozessbädern niedergelassen und diese unzulässig verändert. Bei Unachtsamkeit gefährden **Metallfunken** von Trenn- und Schweißarbeiten die Festigkeit der Werkstücke (siehe Kapitel 49). **Farbnebel** kann da, wo er nicht hin gehört Probleme auslösen (siehe Kapitel 62).

Das bedeutet für unser Handeln:

- **Bauarbeiten im Bereich der Fertigung** sind besonders auch unter dem Gesichtspunkt der Vermeidung einer **Verschmutzung von Werkstücken** zu planen.
- Vor einem Prozessschritt die Werkstücke auf **Staubablagerungen** und **Spritzer** kontrollieren. Gegebenenfalls ist die Fachabteilung für eine zwischengeschaltete geeignete Reinigung zu konsultieren.

"Externe" Quellen von Oberflächenverunreinigungen an empfindlichen Bauteilen im Fertigungsprozess.



Baumaßnahmen wie Umbau, Reparatur, Maschinen umstellen und Boden erneuern sind Quellen von Oberflächenverunreinigungen aus Bauteilen in der Fertigung.

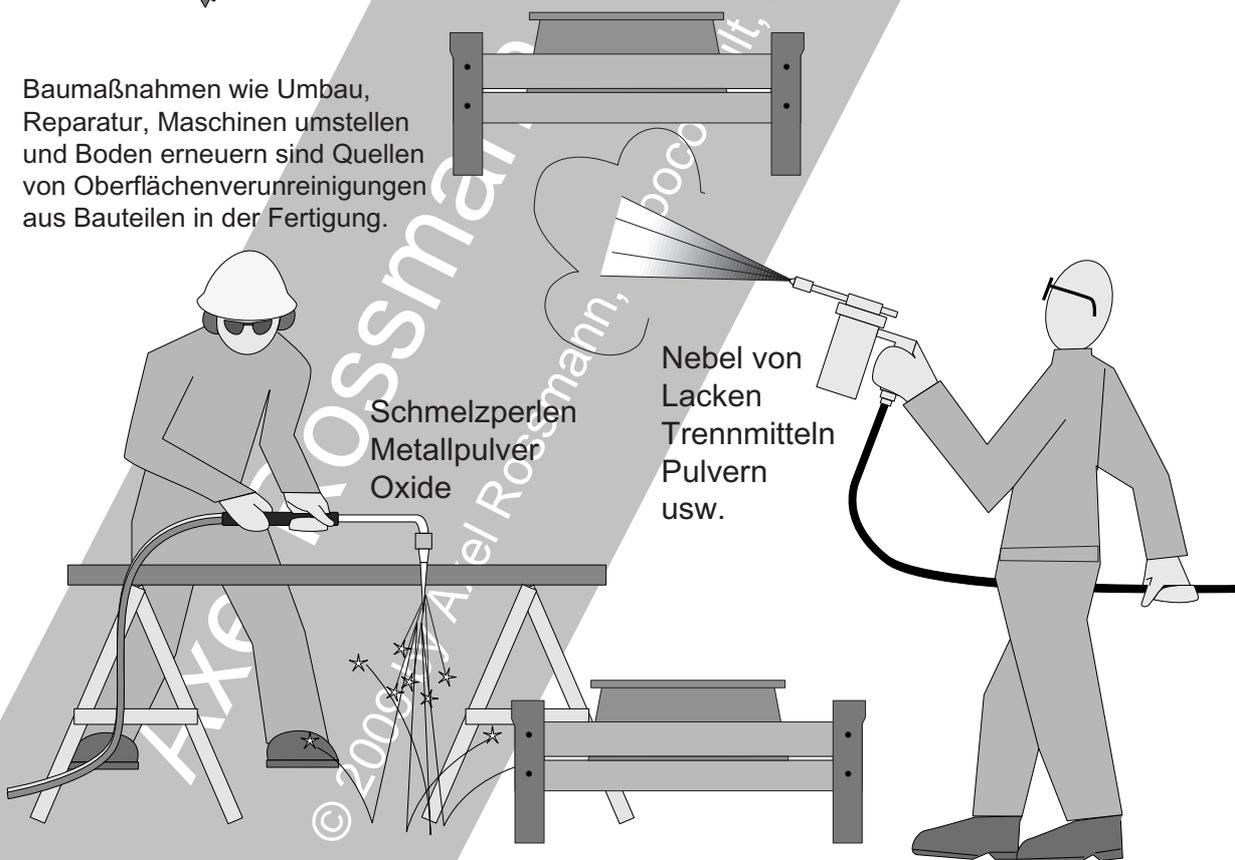


Bild 63

Bauarbeiten im Bereich der Fertigung haben ein Schädigungspotential für die Werkstücke.

64. „Null Toleranz!“

(Die Schadensverhütung in der Fertigung erfordert auch das rechtzeitige erkennen bedenklicher Verunreinigungen.)

Die Verschmutzung New York's muss früher atemberaubend gewesen sein. Fliegende Zeitungen und Verpackungen in den Verkehrsmitteln, insbesondere den U-Bahnen. Gleichzeitig waren dies auch Orte besonders hoher Kriminalität. Hier schien ein Zusammenhang zu bestehen. Apelle und Maßnahmen gegen besondere Auswüchse der wilden Müllentsorgung blieben erfolglos. Ein Bürgermeister sagte diesem unwürdigen Zustand den Kampf an. Sein Konzept „Null Toleranz“. Er zog aus der Lebenserfahrung: Wo eine Kippe liegt kommen bald andere Verunreinigungen hinzu eine Lehre. Anscheinend geht eine äußere Verwahrlosung auch auf die innere der Menschen über. Offenbar signalisieren bereits erste Verunreinigungen dem potentiellen Sünder, dass es hier mit der Sauberkeit nicht so genau genommen wird. Damit sinkt sein Unrechtsempfinden. Sie dient geradezu als Einladung sich seiner Abfälle zu entledigen. Die Polizei wurde deshalb angewiesen, bereits geringfügige Verstöße gegen das Verbot, Abfälle wegzwerfen, mit aller Härte zu bestrafen. Schon das Wegwerfen einer Kippe hatte äußerst unangenehme Folgen. Das schien sich schnell herumzusprechen. Wider allen Unkenrufen hatte dieses Vorgehen Erfolg. Die Stadt, vorher als hoffnungsloser Fall betrachtet, wurde ein Muster an Sauberkeit. Stadtväter aus der ganzen Welt kamen um dieses „Wunder“ persönlich in Augenschein zu nehmen. Hier hatten sie ein Vorbild zur Lösung ihrer ähnlichen Probleme.

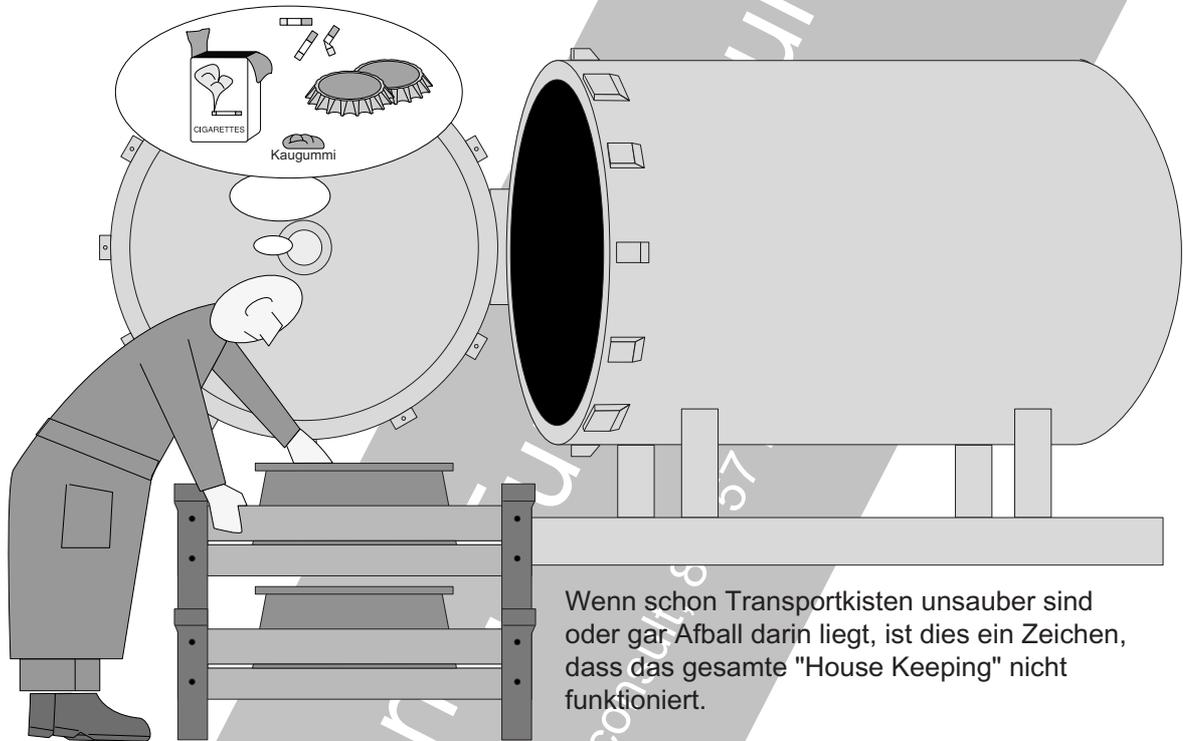
Wie ich das Problem sehe:

Verunreinigungen können in einer Fertigung Werkstücke gefährlich schädigen (siehe Kapitel 18). Aus diesem Grund ist **Sauberkeit** Pflicht. Bereits ein erster Blick beim Gang durch eine Fertigung zeigt dem Fachmann wie ernst diese Forderung hier genommen wird. Dabei muss es sich gar nicht um eine Verschmutzung der Werkstücke handeln. Es genügen scheinbar harmlose herumliegende **Abfälle** wie Kronkorken, Zigarettenschachteln und Kippen. Sie lassen erkennen, dass es hier offenbar mit der Sauberkeit nicht so genau genommen wird. Sofort wird auf die gesamte Einstellung zur Qualität rückgeschlossen. So wird in einem Augenblick mühsam erarbeitetes Vertrauen verspielt. Das kann beispielsweise zu verschärften und/oder häufigeren Audits durch Behörden oder Kunden führen. Dafür muss ein Grund nicht explizit genannt werden. Selbst wenn keine Mängel an den Werkstücken nachgewiesen werden, kann dieses Vorgehen sehr unangenehm und kostenintensiv sein. So hat sich auch in der Fertigung „**Null Toleranz**“ bei Verunreinigungen bewährt. Das beeinflusst die Einstellung zur Sauberkeit und ist damit die Voraussetzung für überzeugtes und nachhaltiges Handeln.

Das bedeutet für unser Handeln:

- „Null Toleranz“ auch gegen scheinbar kleine Verletzungen der Sauberkeit. Das gilt nicht nur für die Werkstücke selbst, sondern für den gesamten Fertigungsbereich.
- **Wiederholte Schulungen** und einsichtige Begründungen für den hohen Sauberkeitsstandard.
- Auf **typische Anzeichen und das Aussehen von Verunreinigungen** auf Werkstücken ist zu achten.

Ein entscheidender Schritt zur Abhilfe von Oberflächenverunreinigungen ist, diese zu erkennen.



Einige typische Verschmutzungsmerkmale an Bauteilen

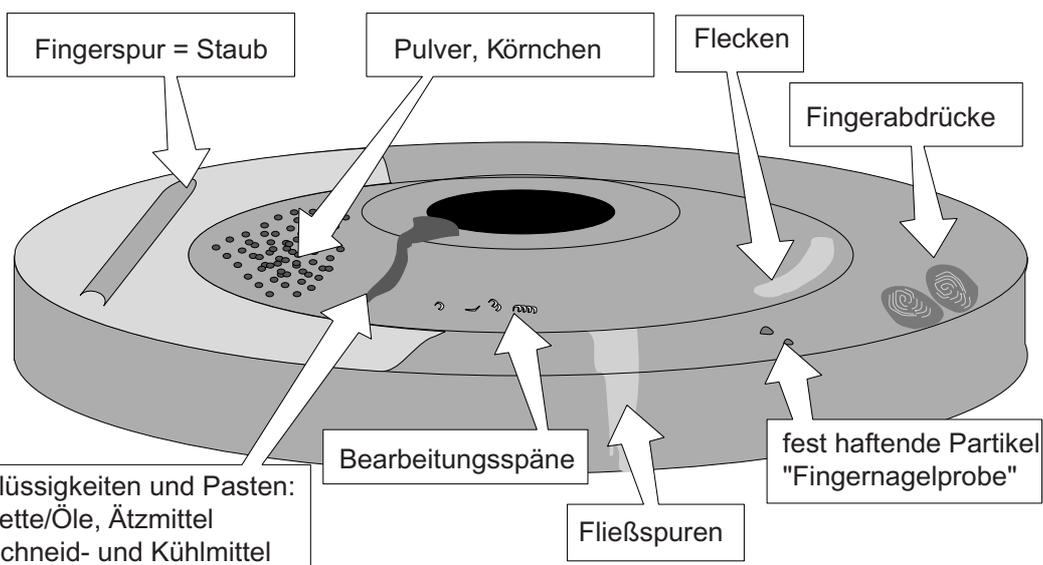


Bild 64

*Bereits **erste Anzeichen** vernachlässigter Sauberkeit lassen am gesamten Qualitätsdenken zweifeln.*

Axel Rossmann, Turboconsult

© 2009 by Axel Rossmann, turboconsult, 85757 Karlsfeld

Sachregister

A

Abätzen einer Oxidschicht 86
 Abblättern eine Spritzschicht 82
 Abdeckhauben 38
 Abdeckung
 an Bauteilen 118
 beim Spritzen 82
 Entfernung 118
 geeignetes Material 90
 gegen Schweißspritzer 118
 verbliebene Reste 119
 Abfälle in der Fertigung 140
 Abhilfemaßnahmen, Voraussetzung 39
 Abnahmelauf 28
 Strahlgut im Öl 68
 Abweichungen 32
 im Fertigungsprozess 70
 Anlagefläche 94
 Anlauffarben 18, 74
 Anschmelzung 119
 Anstreifschicht
 abplatzen 83
 ätzen 86
 glätten 101
 Anzeigen bei Eindringprüfung 130
 Arbeitsmethoden, moderne 64
 Arbeitsplatzgestaltung 31
 Ätzbad
 Blasenbildung 74
 Erprobung 87
 Verunreinigung 86
 Wasserstoffversprödung 86
 Ättschaden 87
 Ätzung 22
 Ätzverfahren, Schädigungen 86
 Aufbewahrungsbehälter, Vibration 98
 Auffindwahrscheinlichkeit, Fehlergröße 130
 Ausbildung, beruflich 30
 Ausbrechen von Schichten 83
 Ausfallraten 62
 Ausfallsicherheit 62, 63

B

Bad
 falsches Ätzen 87
 Verschleppung von Verunreinigungen 134
 Verunreinigung 117
 Badewannenkurve 28
 Baumaßnahmen, Staubentstehung 138
 Baumwollhandschuhe 112
 Bauteile Klasse A bearbeiten 16
 Blisk 92

Bearbeitung, Pfeifgeräusche 92
 Bearbeitungsmaschine, Einstellung 15
 Bearbeitungsspannungen 56
 Benetzung 76
 Beobachtungen bei Veränderungen 74
 Beschädigung 89
 Flansche 94
 in einer Schaufelnut 126
 Ursache, Ermittlung 35
 Beschichtungspulver, Entmischung 98
 Beschriftung 136, 137
 Oxidation 136
 Bestrafung von Personal 13
 Betriebsverhalten von Bauteilen 44
 Beurteilung
 einer Nacharbeit 100
 einer Überhitzung 58
 Bildschirmarbeit 64, 65
 Bindefehler in einer Schweißung 123. *Siehe auch*
 Klebestelle in einer Schweißung
 Blei, Schädigung durch 119
 Blisk 92
 Bogus parts 60
 Bohrung 17
 als Ausgang eines Scheibenbruchs 121
 als Schwachstelle 121
 geeignet abdecken 90
 Herstellung 19
 Schädigung durch die Fertigung 88
 Boroskopinspektion 28

C

Chipdetektor 28

D

Dämpfe, Galvanik 134
 Dämpfung bei der Bearbeitung 92
 Demontage als Kontrollfunktion 80
 Dichtmittel 36, 37
 Diffusionsschweißung 122, 123
 Dokumentation 32
 Dosen, Problem bei offenem Zustand 124

E

Eigenspannungen 56
 Auswirkung im Betrieb 57
 bei Fertigungsverfahren 56
 Messung 57
 Einarbeitungsplan 30
 Eindringprüfung 17, 116
 Anzeigen 130
 Eingedrücktes Material 19
 Eingießmassen 37

Einzelfall 128, 129
Elektronenstrahlschweißen, Schmelztropfen 110
Einschäumungsmittel 76
Entfernen
 einer Fehlstelle 18
 von Abdeckungen 118
Entfettungsbäder 117
Entgraten 41
Entsprödung, Wärmebehandlung 86
Entwicklung 45
 Aufwand 44
Erfahrung der Werker 103
Erfahrungshorizont 130
Erfolgslebnisse 130
Ermüdungsanriss 34
Erprobung 52
 Ätzen 87
 Fertigung 71
Erprobungsteile 15
Ersatzteile
 nicht zugelassene 60
 typischen Abweichungen 61
Erwartungshaltung bei Problemerkennung 131
Erwartungshorizont 131

F

Facharbeiter 31
Fachbegriffe 58
Fachdiskussion 64
Falsches Bad, Ätzen 87
Farbnebel 138
Fehlbeurteilungen 58
Fehler
 Art ermitteln 20
 Auffindbarkeit 17, 20, 21
 Beschreibung 59
 Bewertungsmaßstab 20
 frei von 21
 Grenzen 59
 Größe, Auffindwahrscheinlichkeit 130
 melden 13
Fertigteilkontrolle 120
Fertigung 15
 Abweichungen 70
 Prozess beobachten 74
 Prozessschritt weglassen 57
 Verfahrensänderung 56
Feuchtigkeit, Einfluss beim Schweißen 78
Filter
 Öl, Kraftstoff, Kontrolle 28
 Rückstände untersuchen 69
Fingerabdruck, Rissbildung 84, 85
Fingernagel als Prüfgerät 112
Fingerspitzen als Prüfgerät 112
Firmenkultur 109
Flansche, Beschädigungen 94
Forschung 45
Fremdkörper 38, 68

Herausschütteln 38
Herkunft 69
Identifikation 39
 Massnahmen gegen 69
Fremdmaterial 49
Fressen. *Siehe* Kaltverschweißen
 Späne mit Werkstückoberfläche 132
Funken
 Bildung 24
 Elektrisch 24
 Schädigung 25, 111
Funkenerosion 22

G

Gabelstapler
 Prüfung 109
 Transport mit 108
Galvanik, Dämpfe 134
Galvanische Beschichtung
 Einfluss einer Beschriftung 136
Galvanischen Bäder 22
Gefährlichkeit eines Fehlers 17
Gefügeveränderungen 19
Gewalteinwirkung 73
Gewinde 66
Glätten einer Anstreifschicht 101
Glühen, spannungsarm 56
Grat 41, 94
 abarbeiten 92
 Ausbrechen 40
 Bearbeitung 40
 Bildung 18
 beim Kugelstrahlen 92
 ungewöhnliche 40
Ermüdungsrisse 40
Kerbwirkung 40
 an Auflagen 92
Luftdurchsatz Beeinflussung 40
Schwachstelle 41

H

Haftfestigkeit, Einfluss einer Beschriftung 136
Haltevorrichtungen 104
Handhabung (handling) von Bauteilen 35
 von Titanteilen 113
Handschweiss als Ursache für Rissbildung 84
"Harmloser" Fertigungsschritt 15
Härtespannungen 56
Heißrisse 102
 Entstehung, Einfluss der Schleifscheibe 102
Hilfsstoffe
 Anwendung 37
 Einfluss auf die Qualität 76
 Identifikation 36
 Vorschriften 67
 Zulassung 77
Hintergrundfluoreszenz 76
Hitzeentwicklung beim Zerspanen erkennen 74

Hochtemperaturschmiermittel 96

I

Innere Spannungen. *Siehe* Eigenspannungen
 Interpretation und Umsetzung von Vorschriften 58

J

Jahreszeitenabhängigkeit einer Rissbildung 78

K

Kaltverschweißen („Fressen“) 104
 Kanten 41
 Kugelstrahlen 92
 runden 92
 Kennzeichnen von Bauteilen 22, 23, 33, 136
 vorgeschriebene Methoden 23
 Kerbwirkung 22
 Kernrückstände 50
 “Kissing Bond“. *Siehe* Klebstellen an Schweißung
 Klasse A Bauteile 16
 Klebestelle an Schweißung 122, 123
 Kleinteile 80, 81
 Klemmen von Zentrierdurchmessern 104
 Know How Weitergabe, Notwendigkeit 64
 Kommunikation 65
 Konservieren 37
 Kontaktflächen, Stromdurchgang 24
 Kontaktprobleme bei Stromanschluss 24
 Kontrolle
 auf Schweißspritzer 120
 Kontrolle von Fertigteilen 120
 Korrosionsrisse in Titanlegierungen 85
 Kostenminimierung bei der Entwicklung 70
 Kratzer 34
 Kügelchenproblem 82
 Kugelstrahlen 54, 55, 90
 Gratbildung 92
 Schwingfestigkeit 55
 Überlappungen 92
 Kühlluftdurchsatzmessung 51
 Kühlluftkanal, Verstopfung 50, 73, 110
 Kühlmittelmangel 17
 Kühlschneidmittel 37
 Kühlung von Heißeilen 50
 Kunststoffe, Verarbeitung und Lagerung 125
 Kurzschluss 24

L

Lagerhaltung 108
 Lagerung von Pulvern, Entmischung durch Vibration 99
 Laserbohren 110
 Lebensdauer von Heißeilen 50
 Lizenzprodukte 43
 Lötrissigkeit 46
 Lotspritzer 47
 Luftfeuchtigkeit

Einfluss auf eine Schweißung 79
 Einfluss auf die Haftfestigkeit einer Beschichtung 124
 Einfluss auf Silikongummi 124

M

Maschineneinstellung, Änderung 17
 Massfehler, Schraube 67
 Maßsysteme 66
 Metallabrieb, Schäden durch 46
 Metallfunken 138
 Metallschmelze 47
 Auswirkung 46
 niedrig schmelzende 46
 Metallspritzer 110
 Zugeigenspannungen als Folge 112
 Missverständnisse bei Fremdmaßen 67
 Montage 28, 38
 als Kontrollfunktion 80, 81
 Arbeiten 39
 Beschädigung in Schaufelnut 126
 Hilfe, ungeeignete 127
 Werkzeuge 46
 Motivation 30
 Murphy's Gesetz 17
 Mustertafeln als Kontrollhilfe 58

N

Nabenbereich 34
 Nacharbeit 88
 Einfluss der Zugänglichkeit 120
 von Schweißspritzern 120
 Vorgehensweise 89, 100
 Negative Motivation 13
 Neue Serie, Prüfungen 71
 Niedrig schmelzende Metalle 90
 Null Toleranz-Konzept 140
 Nullfehlerkonzept 88

O

Oberfläche
 Aussehen 18, 74
 Beschädigung 34
 Möglichkeiten 35
 Besonderheiten erkennen 115
 Reinigen 116
 Verfestigen 54
 Ölkreislauf, Fremdkörper 68
 Originalunterlagen 67
 Oxidation durch Beschriftung 136
 Oxidschicht abätzen 86

P

Panzerung von Labyrinthspitzen 83
 Parallellfall, Definition 128
 Partikel zwischen Flanschen 95
 Personalabbau 30

- Pfeifgeräusche bei spanender Bearbeitung 92
Pfeiligartikel 80
Plausible Zusammenhänge 65
Polieren von Beschädigungen 89
Positive Motivation 13
ppm, Erklärung 63
Prinzip Hoffnung 70
Problemerkennung, abhängig von der Erwartungshaltung 131
Prüfen mit den Fingerspitzen 112
Prüflauf 28
Prüfung
 mit dem Auge 114
 mit Fingernagel 112
Prüfverfahren
 Anpassung 53
 Wahrscheinlichkeit Fehler zu finden 17
Pulver, Entmischung 98
Pulver als Verunreinigung 134
- Q**
- Qualitätsmerkmal, Sauberkeit 141
Qualitätssicherung, Beobachtung des Fertigungsprozesses 74
- R**
- Reibschweißen 96, 122
 Probleme 97
Reinigen von Oberflächen 116
Reinigungsbäder 116
 Verunreinigung von Bädern 77
Reinigungsmittel 37
Richten von Bauteilen 106
Riefen 19
Riss 56
 Härteriss 56
 Schleiffriss 56
 Schweißriss 56
Rissbildung
 durch Fingerabdrücke 85
 Korrosion bei Titan 84, 85
 Schweißen 79
 Spannen von Bauteilen 104
 Wasserstoffeinfluss 78
Rissprüfer, Fachkunde 53
Rückverfolgbarkeit 22
- S**
- Sauberkeit 48, 140
 als Qualitätsmerkmal 141
 In der Montage 39
Schaden
 durch Ätzen 87
 durch Schmiermittel 96
 durch Stoßbelastung 72
 Häufigkeit 28, 29
 am Neuteil 28
 Potential 11
Schädigung
 durch Funkenbildung 25, 111
 durch Schmelztropfen 110
 durch Späne 48
 durch Staub 48
 durch Werkzeugausbruch 27
 Tiefe 89
Schaufelnut, Montagebeschädigung 126
Scheibenbruch 126
 von Bohrung ausgehend 121
Scheinbar unnötige Besonderheiten 43
Schichten
 Ausbrechen 83
 Umgebungseinfluss auf die Haftfestigkeit 124
Schlagzahlen 22
Schleiffrisse 102
Schleifscheibe, Einfluss auf die Heißrissentstehung 102
Schmelzkrater 24
Schmelztropfen 110
 vom Elektronenstrahlschweißen 110
Schmiermittel 36
 Schäden durch 96
Schneidenbruch 27
Schnittdaten ändern 19
Schraube
 Brüche in Montage und Demontage 81
 Gewinde 36
 Massfehler 67
Schutzgas, Einfluss von Feuchtigkeit 79
Schweißen
 Abweichungen der Parameter 74
 Einfluss der Luftfeuchtigkeit 79
Fehler
 Bindefehler 123
 Klebestelle 122
 Klebstellen 123
Rissbildung 79
Spannungen 56
Spritzer
 Abdeckung gegen 118
 Kontrolle 120
 Nacharbeit 120
 Wasserstoffeinfluss 78
Schwingbruch 38
Schwingfestigkeit, Einflusds des Kugelstrahlens 55
Schwinggefährdete Bauteile 92
Schwingungen beim Zerspanen 93
Seriennummer 32
Sicherungsdraht als Fremdkörper 38
Sigma als Statistische Größe 62
Silikongummi, Einfluss der Luftfeuchtigkeit 124
Silikonverbindungen als Verunreinigung 134
 Einfluss auf die Rissprüfung 76
Spanbildung, Besonderheiten 75
Späne 19
 Abfließen 133

Eindrücken 132
 Schädigung durch 48
 Stau 17, 133
 Spannen von Werkstücken 105
 Rissbildung 104
 Spritzpulver, Entmischung 98
 Spritzschichten, Abblättern 82
 Stabile Prozesse 42
 Staub
 Gefährlichkeit 48
 Schädigung durch 48
 von Baumaßnahmen 138
 Beeinflussung der Haftfestigkeit von Schichten 82
 Stifte 22
 Zulassung 77
 Stoßbelastung, Schaden durch 72
 Strahlgut
 als Fremdkörper 68
 Bruch 90
 Qualität des 91
 verunreinigtes 134
 Strahlkabinen 90
 Strahlverfahren
 Reinigungsstrahlen 90
 Verfestigungsstrahlen 90
 Stumpfes Werkzeug 19

T

Temperaturanstieg, Schädigung 51
 Test von Bauteilen 52
 Tire tracks 95
 Titan, -legierung
 Funken 111
 Risse durch Handschweiss 84
 Schädigung durch Schmelztropfen 110
 Teile, Handling 113
 Transport
 Behälter 109
 Kisten 134
 Vibrationen 109
 Entmischung 99
 mit Gabelstapler 108
 Schaden, Ursache 72
 Verpackungen 72
 Trennmittel 76
 Turbinenschaufel 15
 Transportbeschädigungen 73
 Turbinenscheibenbruch 126

U

Überarbeitungsvorschläge 42
 Überhitzung, Beurteilung 58
 Überpolieren von Beschädigungen 88
 Ultraschallprüfung 53
 Ultraschallreinigung 15
 Umgebungseinfluss auf die Haftfestigkeit von Schichten 124

Umschlüsselung von Zeichnungen und Vorschriften 66
 Umsetzen von Maschinen 138
 Umwelteinflüsse auf Lagerung und Verarbeitung von Kunststoffen 125
 Undefinierte Beschädigungen 35

V

Verbesserung 42, 43
 Drang zur 43
 Vorschläge 42
 Verbiegen von Bauteilen 106
 Verfahrenserprobung, Ätzen 87
 Verhalten von Vorgesetzten 13
 Verkürzung der Fertigungszeiten, Risiken 17
 Verletzungsgefahr 40
 Verpackung 72
 für Transport 72
 von Hilfsstoffen 36
 Verschleppung von Verunreinigungen 134, 135
 Verschmieren von Rissen 89
 Verstaubte Bauteile, Einfluss auf Beschichtung 82
 Verstopfen
 Verstopfung
 Gefahr 50
 mit Beschichtungspulver 50
 mit Schmelzperlen 50
 mit Strahlgut 50
 von Kühlluftkanälen 73, 110
 Versuchstechnik 44
 Verunreinigtes Strahlgut 134
 Verunreinigung 49
 durch Pulver 134
 mit Silikonverbindungen 134
 Strahlgut 68, 91
 Verschleppung 134, 135
 von Bädern 117
 verzögerte Rissbildung 78
 Verzug 56
 Vibration
 beim Transport 109
 von Aufbewahrungsbehältern 98
 Vibrograf 22
 Visuelle Prüfung 114
 Vogelschlag 44
 Vorgesetzte, Verhalten 13
 Vorrichtungen 46
 Vorschriften
 Einhaltung 42
 interpretieren und Umsetzen 58
 Scheinbar unnötige 42
 übersetzen 65

W

Wälzlager, Korrosion durch Handschweiß 84
 Wärmebehandlung 116
 Entsprödung 86

verunreinigtes Titan 84
Wärmedämmschicht, Abplatzen 83
Wasserstoff, Rissbildung 78
 Ätzbäder 86
Wegwerfartikel, Zustand als Qualitätsmerkmal 80
Weiterbildung 30, 31
Werker
 Bedeutung der Erfahrung 103
 Selbstkontrolle 15, 20
Werkstoff
 überhitzt 19
 verschmiert 19
Werkstück spannen 105
Werkzeug
 Änderungen 70
 ungewöhnliches Verhalten 27, 75
Werkzeugbruch 17, 19, 26
 Schädigung durch 27
 Versagensursache 26
Werkzeugverschleiß 74
Wichtiges Bauteil 15
"Wurmspuren" 94

Z

Zentrierdurchmesser, Einfluss auf Klemmen 104
Zerspanen, Anregung von Schwingungen 93
Zerspanende Verfahren 17
Zerspanung
 Eindrücken von Spänen 132
 Zugänglichkeit 132
Zerspanungsprozess, Abweichungen 18
Zerspanungsverhalten 74
Zugänglichkeit 120
 bei Zerspanung 132
 für Nacharbeiten 120
 zur Innenseite eines Bauteils 120
Zugeigenspannungen 57
 durch Metallspritzer 112
Zukaufteile 80
Zurückbiegen verbogener Bauteilzonen 106
Zusammenhänge, nicht plausible 65

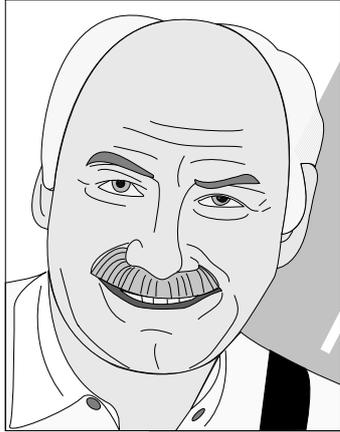
Axel Rossmann, Turboconsult
© 2009 by Axel Rossmann, turboconsult, 85757 Karlsfeld

Axel Rossmann, Turboconsult

© 2009 by Axel Rossmann, turboconsult, 85757 Karlsfeld

Axel Rossmann, Turboconsult

© 2009 by Axel Rossmann, turboconsult, 85757 Karlsfeld



Der Autor Axel Rossmann wurde 1939 in Berlin geboren. Er hat am Oskar-von-Miller-Polytechnikum Maschinenbau studiert und war von 1965 bis 2004 bei MTU-München als Schadensanalytiker tätig. Zu seinem Aufgabengebiet gehörte die Untersuchung ziviler und militärischer Triebwerke für die unterschiedlichsten Flugzeugtypen und Hubschrauber. Die Arbeiten fanden im Rahmen von Entwicklung, Serienbetreuung, Fertigung und Montage statt. Über die in ca.40 Jahren gesammelten Erfahrungen hat Axel Rossmann mehrere Fachbücher geschrieben. Ein Buch behandelt den Betrieb von Industriegasturbinen. Weitere 4 Bände über „Problemorientierte Triebwerkstechnik“ wurden in den letzten Jahren veröffentlicht.

Die vorliegende Broschüre entstand im Rahmen des **RoMan-Projekts** und soll die Praktiker des Triebwerksbaus zu qualitätsbewusstem Handeln motivieren.

Falls Sie mehr wissen wollen: Axel Rossmann ist über die E-mail Adresse **Turboconsult@gmx.de** zu erreichen.

Homepage: **www.turboconsult.de**