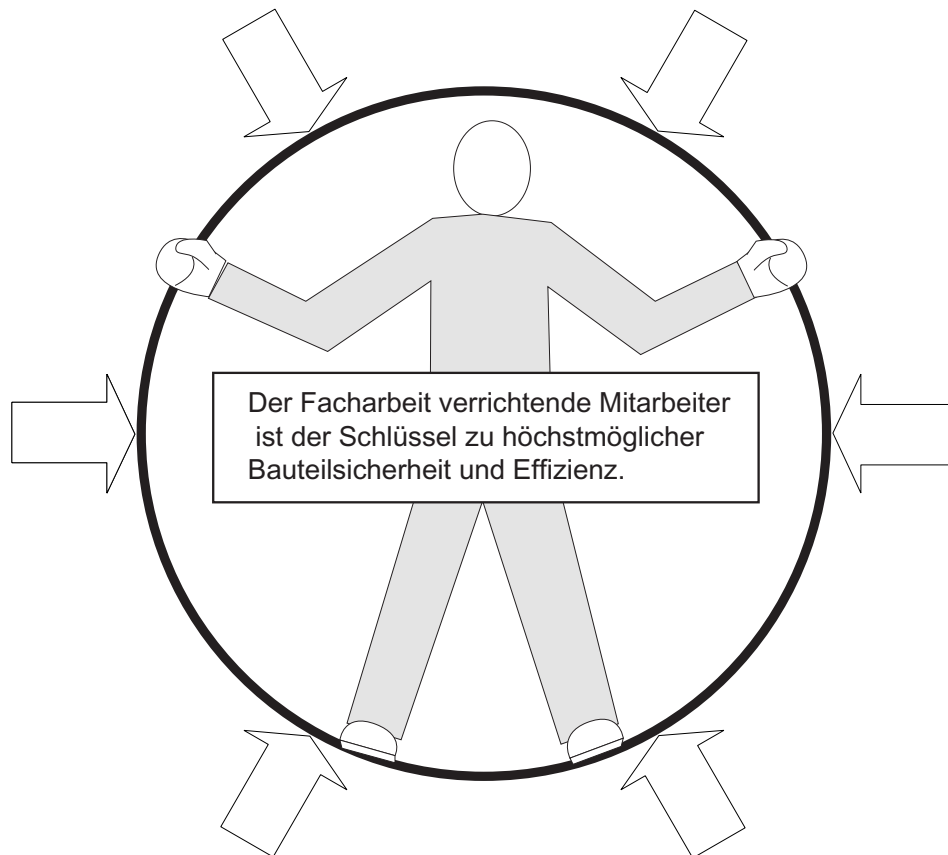


17. Qualitätssicherung,



Was ist Qualität? Qualität ist die Gesamtheit von Eigenschaften und Merkmalen eines Produkts oder einer Tätigkeit, die sich auf die Eignung zur Erfüllung gegebener Erfordernisse beziehen (Lit. 13.1-4). Anders gesagt: **Qualität ist gekennzeichnet von der Übereinstimmung des Ist mit dem Soll.** Wenn man davon ausgeht, dass Qualität in erster Linie mit Facharbeit erzeugt wird, ist ein optimales Umfeld eine Voraussetzung.

In der Triebwerkstechnik steht die Betriebssicherheit des Bauteils im Vordergrund. So muss die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Rotorscheibe gegen Bruch bei 10^{-9} pro Flugstunde liegen, dass die **Wahrscheinlichkeit eines Flugunfalls unter 10^{-7}** gewährleistet ist (Lit. 17.1-9). Gegenüber der Sicherheit treten weitere wichtige Aspekte wie geringe Ausschussraten und damit niedrige Fertigungskosten sowie Prestige und Liefertreue in den Hintergrund, obwohl sie für die Existenz einer Firma durchaus bedeutend sind. Die Fehlerwahrscheinlichkeit im Herstellungsprozess liegt deutlich über der des fertigen, eingebauten Bauteils. Diese Differenz wird von geeigneten Maßnahmen der Qualitätskontrolle gewährleistet. Handelt es sich doch bei Triebwerksbauteilen überwiegend um äußerst kostenintensive Bauteile. So kann ein Verdichtergehäuse oder eine Turbinenscheibe den Wert mehrerer Mittelklasse PKW darstellen.

Dieses Kapitel soll sich entsprechend den vorhergehenden Überlegungen, in erster Linie mit dem Vermeiden sicherheitsrelevanter Fertigungsprobleme beschäftigen. Dabei stehen Probleme im Vordergrund, die bereits, wenn auch sehr selten, zum Ausfall von Bauteilen geführt haben.

Damit werden die Forderungen an die Qualität der Triebwerksbauteile und somit besonders an den Fertigungsprozess und absichernde Maßnahmen wie die zerstörungsfreie Prüfung, äußerst anspruchsvoll. Als Voraussetzung einer für Triebwerke erforderlichen Qualität, müssen die Abläufe und das gesamte Umfeld des Herstellungsprozesses optimal gestaltet werden. Hierzu wurden verschiedene Strategien mit einer systematischen Vorgehensweise entwickelt (Lit 17.1-1 und Lit. 17.1-2).

Was die Fehlerfreiheit und Sicherheit der Neuteile betrifft, darf nicht aus den Augen verloren werden, dass Qualität letztendlich von den am Fertigungsprozess beteiligten Menschen, dem „**Human Factor**“ abhängt (Bild 16.1-2).

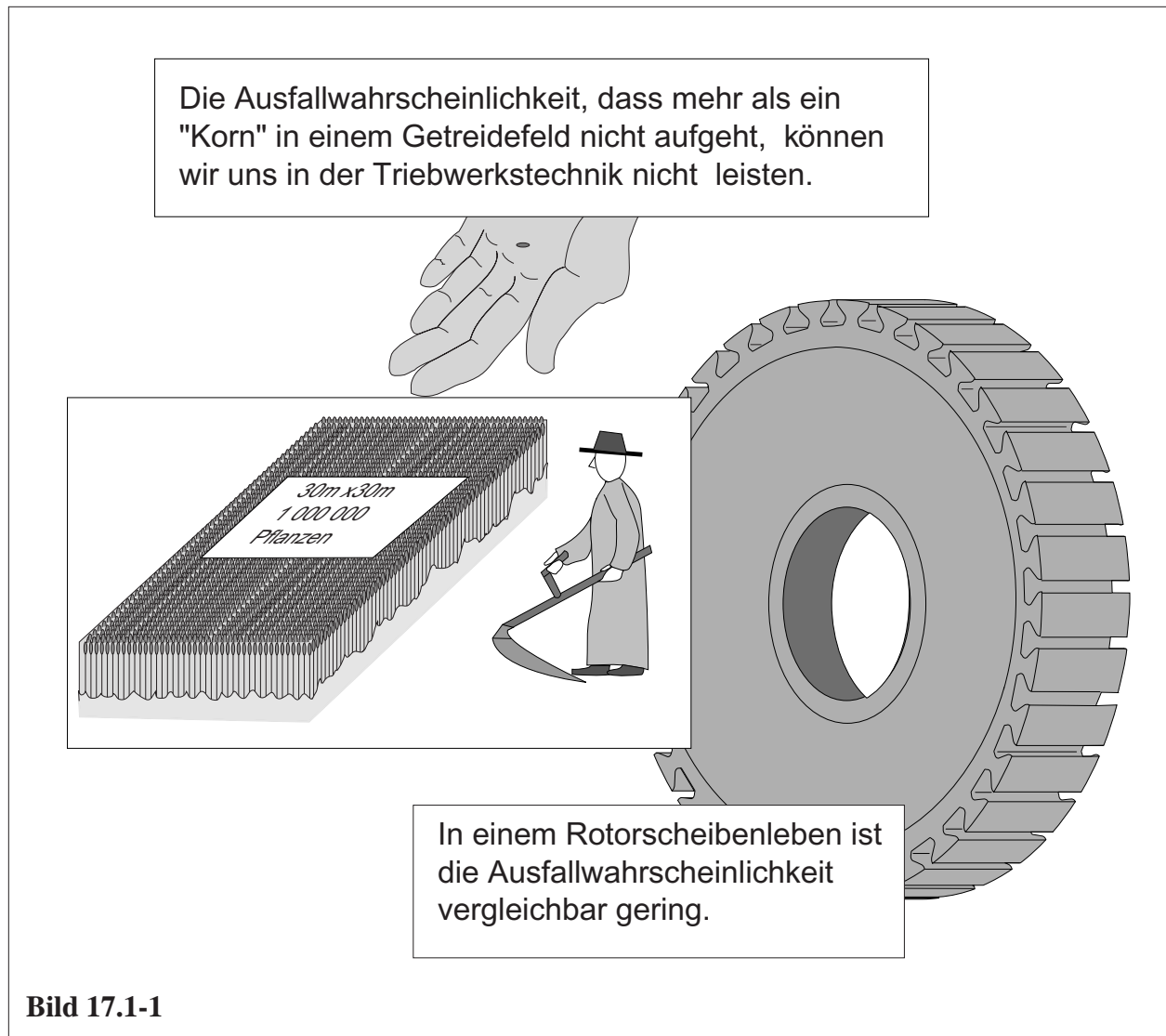


Bild 17.1-1: Die Sicherheit des Triebwerks ergibt sich aus dem Produkt der **Ausfallwahrscheinlichkeit** einzelner Teile. Deshalb muss die **Sicherheit der einzelnen Bauteile sehr hoch** sein, um die Sicherheit der gesamten Maschine zu gewährleisten (Lit. 17.1-9). Wenn z.B. eine Verdichterscheibe an 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 (Band 3, Bild 11.3-16). 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 von der **Kombination erprobter und stabiler Fertigungsverfahren mit geeigneten Qualitätssicherungsmaßnahmen und Prüfungen** zu erwarten. Dabei kommt besonders dem Facharbeiter eine wichtige Funktion zu (Bild 13.1-12).

Was oft unterschätzt wird: Letztendlich schafft der an der Entstehung des Produkts beteiligte Mensch die Qualität. Hier sind zuerst die Voraussetzungen zu schaffen.

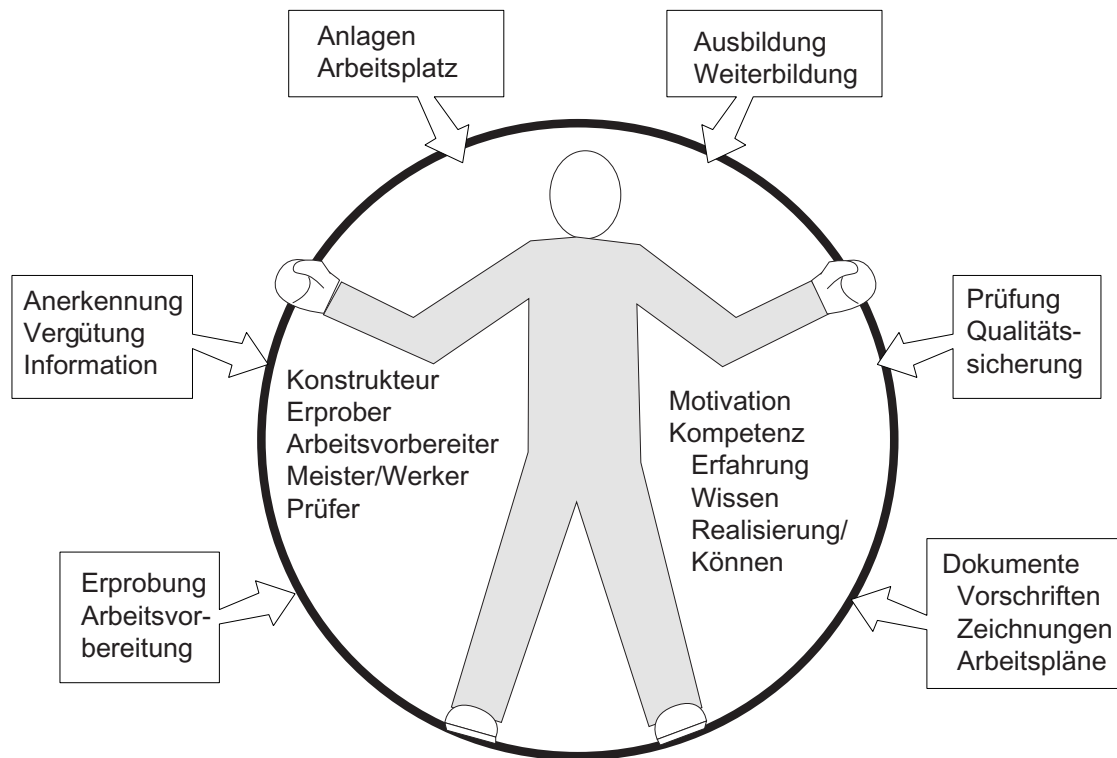


Bild 17.1-2

Bild 17.1-2: Die Qualität des Produkts und damit seine Betriebssicherheit wird letztendlich mit Facharbeit geschaffen und gewährleistet. Zu den direkt „**qualitätsschaffenden**“ **Fachleuten** gehören vornehmlich

- Konstrukteure,
- Verfahrenserprober und -entwickler,
- Arbeitsvorbereiter,
- Meister und Werker,
- Prüfer.

Ihre qualitätsfördernden Eigenschaften wie

- Motivation,
- Kompetenz,
- Erfahrung,
- Wissen,
- Realisierungsfähigkeit (Können) sind nach Möglichkeit zu unterstützen, indem ein **optimales Umfeld** zur Erfüllung der Aufgabe bereit-

gestellt wird. Diese Forderung erscheint trivial und selbstverständlich. Die **Realisierung ist jedoch eine Herausforderung für die zuständigen Entscheidungsträger**. Oft verhindern vermeintlich dringendere Prioritäten ein wünschenswertes Umfeld. Dies wird von Einflüssen geprägt die sich gegenseitig auswirken. Hierzu zählen in erster Linie:

Anerkennung kann sich sehr unterschiedlich ausdrücken. Zwar spielt die Vergütung eine wichtige Rolle und muss in erster Linie in einsehbarer Relation zu vergleichbaren Arbeiten und Verantwortung stehen. Demgegenüber wird die **persönliche und dokumentierte Wertschätzung**, z.B. in einer Fachhierarchie und/oder einer besonderen Kompetenz, gerne unterschätzt. Zur Anerkennung gehören auch

*Fach- und **Hintergrundinformationen** (Bild 15.1-5) die für das Verständnis und die Einschätzung des eigenen Stellenwerts für die Bauteilsicherheit erforderlich ist (Bild 17.1-3). Auch die rechtzeitige **Einbeziehung in fachliche Entscheidungsfindungen** signalisieren Anerkennung. Dazu gehört bereits die Konzipierung von Vorrichtungen oder die Adaption von Anlagen. Nicht immer wirkt eine „Arbeitsentlastung“ motivierend. Motivierend kann dagegen die explizite **Nutzung von Erfahrung** wirken.*

*Zum **Arbeitsplatz** gehört sowohl ein motivierendes Umfeld, als auch eine zur Erfüllung der Aufgabe möglichst gut geeignete Ausrüstung. In diesem Zusammenhang spielt der Begriff „**Human Factor**“ im Luftfahrtbereich eine besondere Rolle. Er beschreibt die Auswirkungen des Umfelds auf das Fehlerrisiko und Voraussetzungen für fehlerfreies Arbeiten (Lit. 17.1-8). In diesem Zusammenhang ist die amerikanische Luftfahrtbehörde FAA besonders engagiert.*

***Qualitätssicherung** schließt die Aktivitäten im Rahmen einer Selbstprüfung (z.B. Maßüberprüfungen) ein. Dazu gehört die fachliche Beurteilung des Bauteilzustands vor und nach dem jeweils zu verantwortenden Arbeitsschritt (Bild 17.1-5). Das ist eine unerlässliche Voraussetzung für sichere Bauteile bei günstigen Produktionskosten. Um diese Hinweise auf potenzielle Probleme zu erkennen, ist Erfahrung notwendig. Es handelt sich um die Feststellung **ungewöhnlicher Veränderungen** wie Spannbildung (Bild 17.1-13), Anlauffarben oder Glanz der Bauteiloberfläche (Bild 18.9-12).*

***Dokumente und Vorschriften:** Je klarer und verständlicher diese sind, umso eher lassen sich Fehlinterpretationen oder falsche Einschätzungen vermeiden. Auch hier sind Informationen zu den Hintergründen und Notwendigkeiten Voraussetzung für eine optimale und engagierte Anwendung. Umgekehrt beein-*

*trächtigen **missverständliche oder fehlinterpretierbare Arbeitspapiere** die Bauteilsicherheit. Übersetzte Dokumente, etwa im Rahmen einer Lizenzfertigung, können deren Anwendung erschweren. Erfahrungsgemäß handelt es sich um **Beurteilungsmerkmale und Fachbegriffe**, die nicht eindeutig übertragen wurden.*

Arbeitspläne sind für die Produktqualität von höchster Bedeutung. So beeinflusst z.B. die Folge von Arbeitsschritten die Wahrscheinlichkeit von Problemen und die Auffindbarkeit von Fehlstellen an Bauteilen.

*Die industrie- und firmenspezifische **technisch-fachliche Aus- und Weiterbildung** unter dem Aspekt einer Minimierung von Problemen und Schäden, ist offenbar in vielen Fällen zumindest verbesserungsbedürftig. Dies wird im Verhältnis zu den üblichen Kursangeboten für die Anwendung von Computerprogrammen aus dem Bürobereich und der Verwaltung deutlich. Besonders für den Bereich der Produktion und Fertigungstechnik scheint eine erfahrungsbasierte Weiterbildung auf den ersten Blick ein plausibles Anliegen, wird aber, wenn überhaupt, nur unbefriedigend angeboten und genutzt. Wenn hier ein Mangel für **Techniker und Ingenieure** besteht, sucht man eine geeignete **Weiterbildung für Werker bzw. Facharbeiter**, als diejenigen welche Qualität produzieren sollen, meist vergeblich (Lit. 17.1-5).*

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

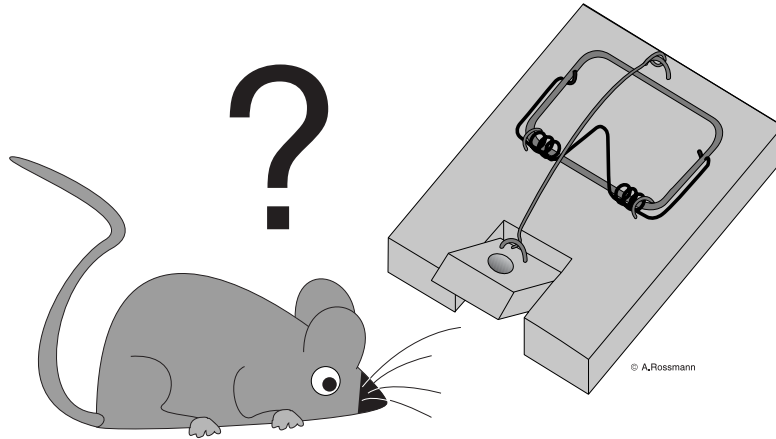


Bild 17.1-3

Bild 17.1-3 (Lit. 17.1-5): Durchschaut man die **Konsequenzen eigenen Handelns** nicht, besteht ein erhöhtes Fehlerrisiko. Fehlen die notwendigen **Hintergrundinformationen** und/oder sind die Zusammenhänge mit dem späteren Betriebsverhalten der Bauteile nicht ausreichend bekannt, ist das Potenzial höchstmöglicher Sicherheit und Effektivität nicht ausgeschöpft.

Die **Mausefalle** soll diese Situation verdeutlichen. Sie erinnert daran, dass trotz umfangreichen Wissens, jedoch nicht ausreichender Erfahrung, ein erhöhtes Risiko besteht. Der Grund sind Fehleinschätzungen der Konsequenzen des Handelns. Das gilt beispielsweise für einsame Entscheidungen über die Zulässigkeit und eventuelle Abhilfen bei Abweichungen.

Richtig ist es, **fachkundige zuständige Vorgesetzte bzw. Fachabteilungen rechtzeitig hinzuzuziehen**. Dies erfordert jedoch ein Vertrauensverhältnis, bei dem nicht der Überbringer schlechter Nachrichten auf mittelalterliche Weise bestraft wird (Bild 17.5-2).

Ähnliches gilt für die Betriebstauglichkeit der Bauteile. Sie wird entscheidend von einer Vielzahl **scheinbarer Nebensächlichkeiten** beeinflusst. Solche „**Nebensächlichkeiten**“ richtig einzuschätzen und mit Hilfe einer geeigneten

Einstellung zu realisieren, ist ein entscheidender Schritt zur **Qualitätssicherung**. Eine Voraussetzung für ein qualitätsbewusstes Verhalten ist also die **Kenntnis wichtiger Zusammenhänge und Einflüsse**, die auf Bauteile einwirken können. Dazu gehören auch Abläufe und entscheidungsbefugte Fachleute, um richtige Abhilfen und Bewertungen (Bild 17.1-11) vorzunehmen (Bild 17.5-1).

Bild 17.1-4: Das **Fehlerrisiko** lässt sich unter geeigneten Voraussetzungen und einer „strategischen“ Vorgehensweise minimieren.

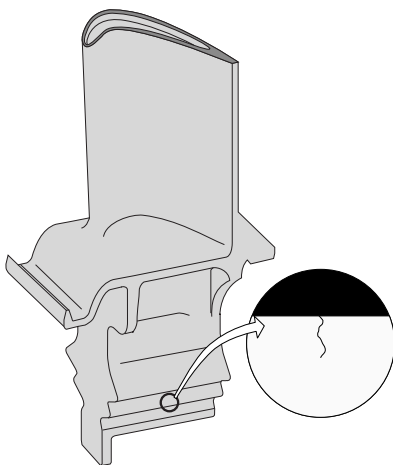
Gleichbleibende Rohteilqualität (Kapitel 11): Von **Ausfallmusterprüfung und Wareneingangsprüfungen verifizierte, zuverlässige Lieferanten** gewährleisten die **Qualität der Rohteile bzw. des Halbzeugs**. Sie sind eine Voraussetzung für hohe Bauteilsicherheit. Dies gilt besonders im Hinblick auf Abweichungen und Fehler, die nur mit der Stabilität und Überwachung der Herstellungsprozesse ausgeschlossen werden. Das ist der Fall, wenn zerstörungsfreie Prüfungen an ihre Grenzen stoßen. Dieser Aspekt gewinnt mit einer Festigkeitssteigerung der Werkstoffe, die in erhöhten

Fehler lassen sich mit bewährten, strategisch angeordneten Schritten und geeigneten Voraussetzungen auf ein akzeptables Maß minimieren.

- Gleichbleibende Rohteilqualität:
 - Zuverlässige Lieferanten
 - Ausfallmusterprüfung
 - Wareneingangsprüfung

- Stabiler Fertigungsprozess:
 - Verfahrenserprobung
 - Ermittlung optimaler Parameter
 - Entwicklung geeigneter Vorrichtungen
 - Umsetzung in die Serie
 - Verfahrensüberwachung
 - "Sensibilisierung" des Personals

Beispiel: Schleifrisse in Füßen von Turbinenschaufeln.



- Rechtzeitiges Auffinden von Fehlern:
 - Geeignete Qualitätssicherung
 - Kenntnis der Fehlerarten
 - günstig angeordnete Prüfschritte

- Abhilfemaßnahmen:
 - Klärung des Schadensmechanismus
 - Klärung der Ursachen
 - Risikoabschätzung

Bild 17.1-4

Betriebsbelastungen genutzt wird, an Bedeutung (Band 1, Bild 4.1-1). Wachstumsfähige Fehlstellen werden immer kleiner und sind immer schwerer mit ausreichender Sicherheit zerstörungsfrei nachzuweisen (Bild 17.3.1-3.1).

Ein **stabiler Fertigungsprozess** (Bild 17.1-5) ist nicht nur eine Voraussetzung kostengünstig, d.h. mit geringstmöglichem Ausschuss zu produzieren. Er minimiert auch das Risiko von Fehlstellen in Werkstücken und erhöht damit deren Sicherheit. Das gilt insbesondere für verfahrensspezifische Fehlstellen wie „Klebungen“ (Kaltschweißen) bei Schweißungen (Band 3, Bild 12.2.1.3.4-5 und Bild 12.2.1.3.5-1/-2/-3), die sich der Detektierbarkeit mit serieneigneten zerstörungsfreien Prüfverfahren entziehen.

Rechtzeitiges Auffinden von Fehlern: Ein Beispiel sind Schleifrisse in Tannenbaumfüßen von Turbinenschaufeln (Skizze, Band3, Bild 12.2.1.1.1-4). Diese Risse sind zwar mit einer Eindringprüfung nach geeigneter Vorbehandlung ausreichend sicher detektierbar. Es ist jedoch die möglichst frühzeitige Entdeckung von der die Menge der betroffenen Werkstücke und damit die Höhe der Schadenskosten abhängt. Wird die ursächliche Abweichung des Schleifprozesses mit einer kontinuierlichen Parameterüberwachung sofort erkannt, sind solche Kosten vermeidbar.

Abhilfemaßnahmen: Wurden unzulässige Abweichungen im Fertigungsprozess bzw. Fehlstellen festgestellt, ist zuerst die Klärung des Schadensmechanismus und damit die Voraussetzung für eine Ursachenklärung zu schaffen (Bild 17.1-11). Erst diese ermöglicht die Erarbeitung und Einführung gezielter erfolgversprechender Abhilfemaßnahmen.

Eine Risikoabschätzung muss die Möglichkeit betrachten, ob fehlerhafte Bauteile zum Einbau gelangen können. Gegebenenfalls sind daraus weitere Maßnahmen abzuleiten.

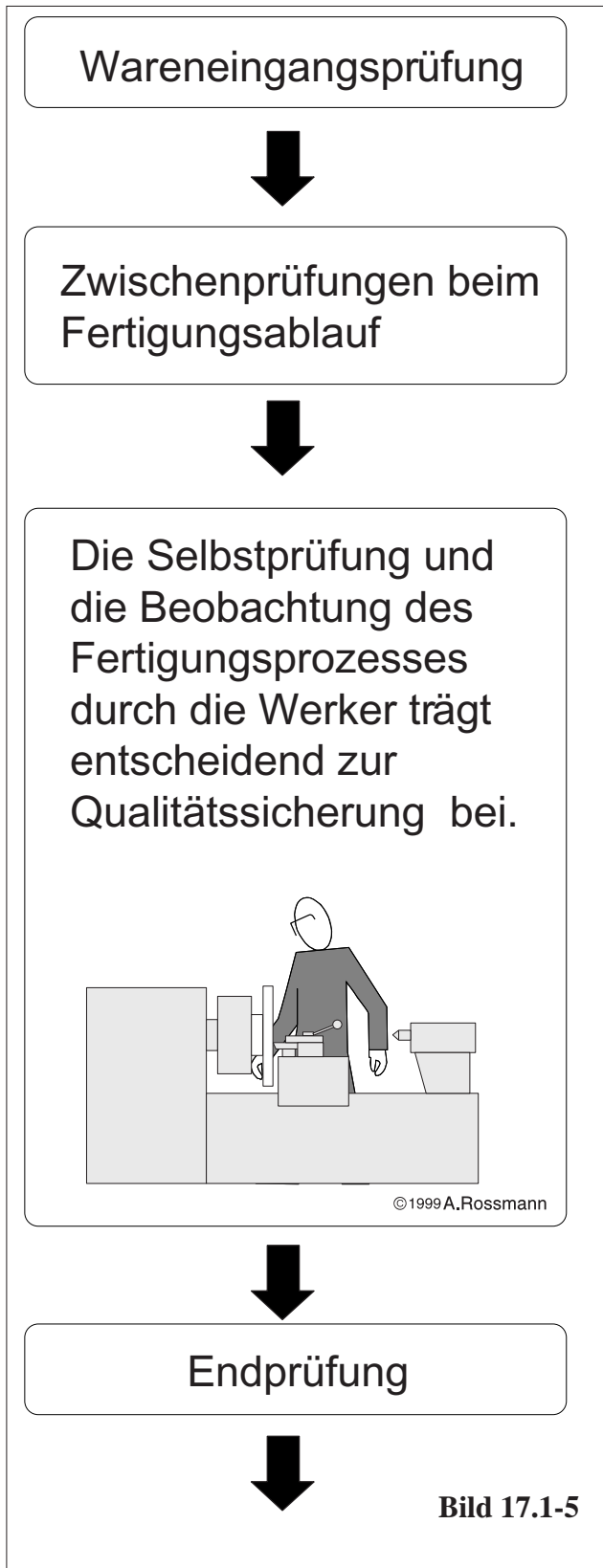


Bild 17.1-5 (Lit. 17.1-5): Facharbeiter leisten einen nicht zu unterschätzenden **Beitrag zur Sicherung der Qualität der Produkte. Sie ermöglichen bei genügender Erfahrung, Ausbildung und Motivation, eine äußerst wichtige und zuverlässige, kontinuierliche **Prozessüberwachung** (Bild 17.1-10).**

Während des Fertigungsprozesses sieht ein Facharbeiter beispielsweise das Verhalten des Bauteils, des Prozessablaufs und der Werkzeuge. Dabei können Abweichungen, die auf Probleme hinweisen, auffallen. So können besonderes Spanaussehen (Lit. 13-6) oder ungewöhnlich intensive Anlauffarben Indizien für Stabilitätsprobleme des Fertigungsprozesses sein. Sie können auf ernste Fehler hinweisen, die mit den folgenden Prüfverfahren nicht mehr sicher auffindbar sind. Motivation und Weiterbildung sind (Bild 12.2.1.1.1-8.2) deshalb gerade in der Fertigung eine gut angelegte Investition.

Zur **Motivation** (Bild 15-2) 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 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 sie sich auf nachfolgende Schritte, insbesondere die **Betriebs-eigenschaften des Bauteils**, auswirkt.



Bild 17.1-6

Bild 17.1-6 (Lit. 17.1-5): Die **Arbeit am Bildschirm** und an weitgehend automatisierten Fertigungsprozessen erhöht die Gefahr eines gewissen **Realitätsverlustes und der „Verein-samung“** auf Grund eines fehlenden persönlichen Kontakts. Diese Gefahr besteht nicht nur in der „Schreibtischarbeit“ der Konstruktion, sondern auch im Fertigungsbereich. Gerade die Arbeitsvorbereitung und die Beurteilung des Arbeitsergebnisses im Fertigungsablauf scheinen in steigendem Maß betroffen. Ein solcher Trend stellt ein nicht zu unterschätzendes Risiko dar. Zum einen werden Erfahrungen, die am besten im **persönlichen Ge-**

spräch vermittelt werden, nicht mehr wünschenswert weitergegeben.

Zum anderen wird die Chance einer gewissen Kontroll- und Korrekturfunktion ungezwungener und damit besonders kreativer Beratung mit den Kollegen, vertan.

Der **persönliche Kontakt** kann also ein wichtiger Faktor für die Betriebssicherheit der Bauteile sein.

Deshalb ist die fachliche **Kommunikation** zu suchen, um der alten Volksweisheit Genüge zu tun: „Vier Augen sehen mehr als zwei.“

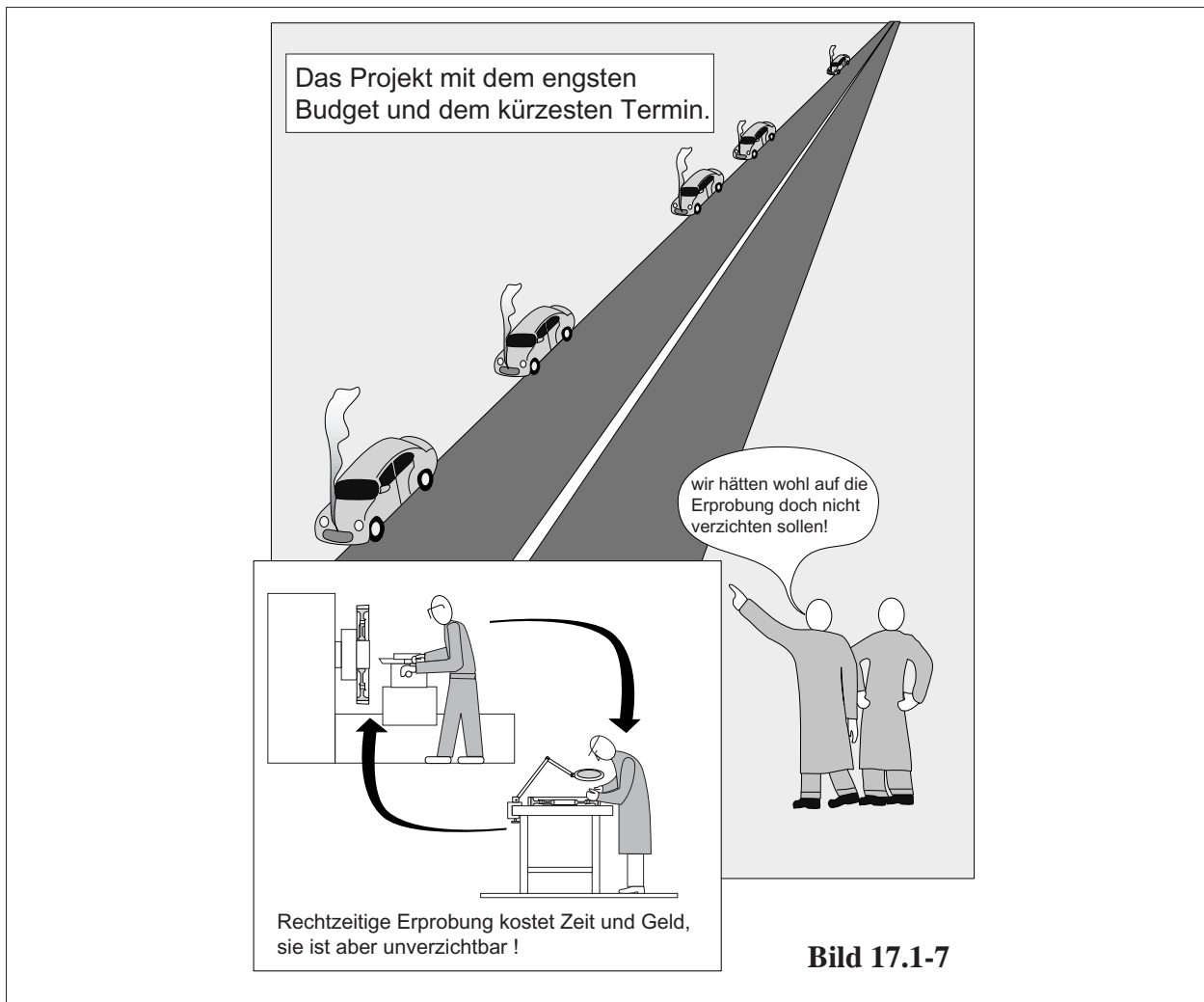


Bild 17.1-7 (Lit. 17.1-7): Sieht man immer wieder den gleichen neuen Autotyp mit einer Panne am Straßenrand, dürfte das Kaufverhalten potenzieller Kunden gegenüber dieser Marke negativ beeinflusst werden. Da wäre es für den Hersteller wohl besser gewesen, gleich ausreichend Mittel und Zeit in die Entwicklung und Erprobung zu investieren, als teure Nachrüstungen mit Imageverlust zu riskieren.

Diese Zusammenhänge gelten in übertragenem Sinne gerade auch für Triebwerke. Hier kommt noch der besondere Sicherheitsaspekt hinzu. Gerade was den Einfluss der Fertigungsverfahren betrifft, ist eine **bauteilspezifische Erprobung unerlässlich**. Diese benötigt Zeit und ist gewöhnlich mit erheblichen Kosten verbunden. Dagegen ist eine Computersimulation deutlich schneller und kostengünstiger.

Leider kann sie erfahrungsgemäß in vielen Fällen den Hardwareversuch nicht ersetzen.

Die erarbeiteten Fertigungsparameter sind dann in der Serienanwendung einzuhalten und garantieren die nachgewiesene Betriebssicherheit.

Es ist deshalb unbedingt notwendig, den für die Einführung oder Veränderung von Fertigungsverfahren notwendigen Kosten- und Zeitrahmen realistisch vorzusehen. Aus diesem Grund ist eine ausreichende **mittelfristige Verfahrensentwicklung**, zu der auch das Betriebsverhalten der Bauteile gehört, bis zur Serienreife unerlässlich. **Nicht ausreichend erprobte Verfahren tragen ein hohes Risiko** in sich.

Einige Grundlagen zur Qualitätsbeschreibung.

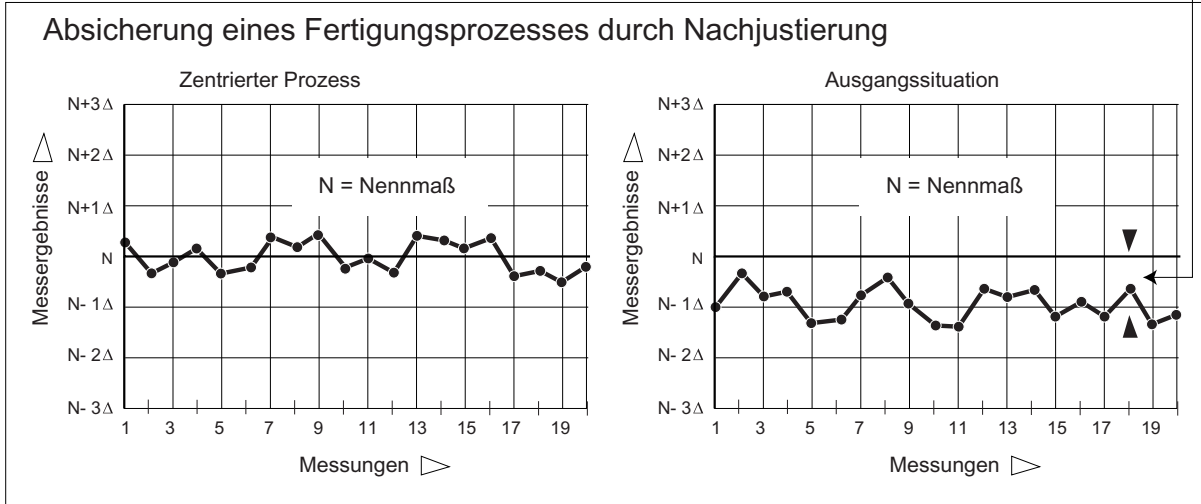
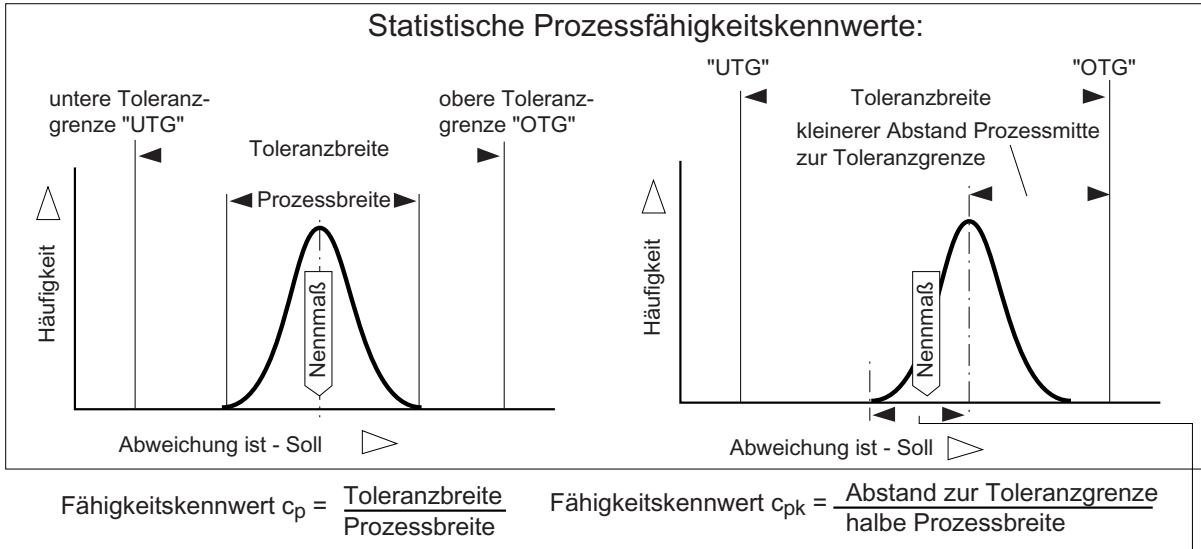


Bild 17.1-8

Bild 17.1-8 (Lit. 17.1-1 und Lit. 17.1-2): Die **Stabilität eines Fertigungsprozesses** ist von großer Bedeutung für die Bauteilsicherheit und für die kostenoptimale Fertigung (Bild 17.1-4). Ein wichtiges Merkmal für die Stabilität ist die **statistische Verteilung der Abweichung wichtiger Kenngrößen bzw. Qualitätsmerkmale** (Diagramme oben) über der **Zeit** (Diagramme unten). Die **Streuung der Abweichung (Ist - Soll)** muss sich sicher innerhalb der zulässigen Toleranzbreite befinden. Sie liegt zwischen unterer (UTG) und oberer Toleranzgrenze (OTG). Die **Prozessbreite** ist mit 6 x Standardabweichung (σ) definiert. Das be-

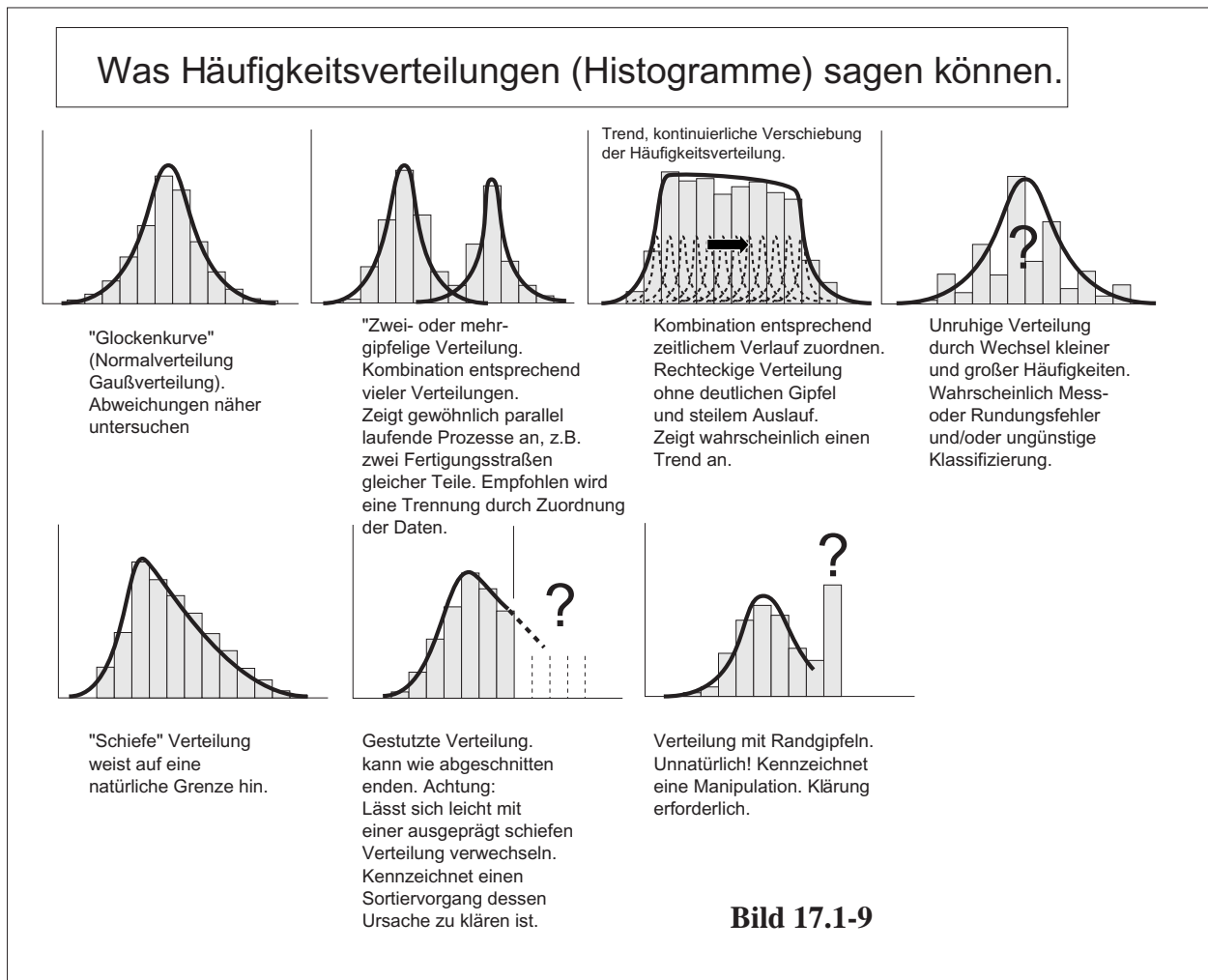
deutet, dass 99,73 % aller Werte innerhalb der Prozessbreite zu erwarten sind. Die Prozessbreite wird symmetrisch vom **Nennmaß** geteilt. Hier kennzeichnet der sog. **Fähigkeitskennwert c_p** das Verhältnis von Toleranzbreite zu Prozessbreite. Aus dem Verlauf der Häufigkeitskurven lassen sich wichtige Schlüsse auf den Fertigungsprozess ziehen (Bild 13.1-9). Das Diagramm oben links zeigt eine symmetrische Verteilung, die auch symmetrisch zur Toleranzbreite liegt. Das muss nicht immer der Fall sein (Diagramm oben rechts). Das Diagramm unten rechts repräsentiert einen solchen Fall. Der Abstand der **Prozessmitte zur**

Toleranzgrenze ist ebenfalls ein wichtiges Merkmal. Der **Fähigkeitskennwert** c_{pk} ergibt sich aus dem Verhältnis des kleineren Abstands vom Nennmaß gegenüber der jeweiligen Toleranzgrenze zur halben Prozessbreite. Natürlich strebt man die Symmetrie der Verteilung zur **Toleranzbreite** an (Diagramm unten links). Damit ist die sicherste Gewähr gegeben, dass der Prozess nicht aus der Toleranzbreite läuft. Mit der Beobachtung der Messwerte über der Zeit lassen sich rechtzeitig stabilisierende Maßnahmen ergreifen. Ein Beispiel ist die Nachführung einer Profilschleifscheibe, um den Scheibenverschleiß zu kompensieren.

Die Feststellung der hier im Zentrum des Interesses stehenden Fertigungsfehlstellen ist, im Gegensatz zu Maßabweichungen, häufig nur indirekt über die Verfolgung der relevanten

Prozessparameter möglich. Dazu muss jedoch der Zusammenhang zwischen den Ursachen des betrachteten Fehlstellentyps und den Prozessparametern ausreichend verstanden sein. Werden z.B. Schleiffrisse oder Überhitzungsmerkmale erst mit einem geeigneten nachgeschalteten Prüfprozess ermittelt, lassen sich statistische Betrachtungen trotzdem nutzbringend anwenden. So besteht die Möglichkeit, die Fehlerhäufigkeit einzelnen Prozessparametern zuzuordnen und aus der Verteilung Schlüsse zu ziehen.

Bild 17.1-9 (Lit.17.1-1): Der Verlauf der **Häufigkeitskurven** lässt Schlüsse auf den Fertigungsprozess und/oder die Aus- bzw. Bewertung zu. Sie können für eine gezielte Nachprüfung potenziell betroffener Bauteile und **Ursachenermittlung** äußerst hilfreich sein.



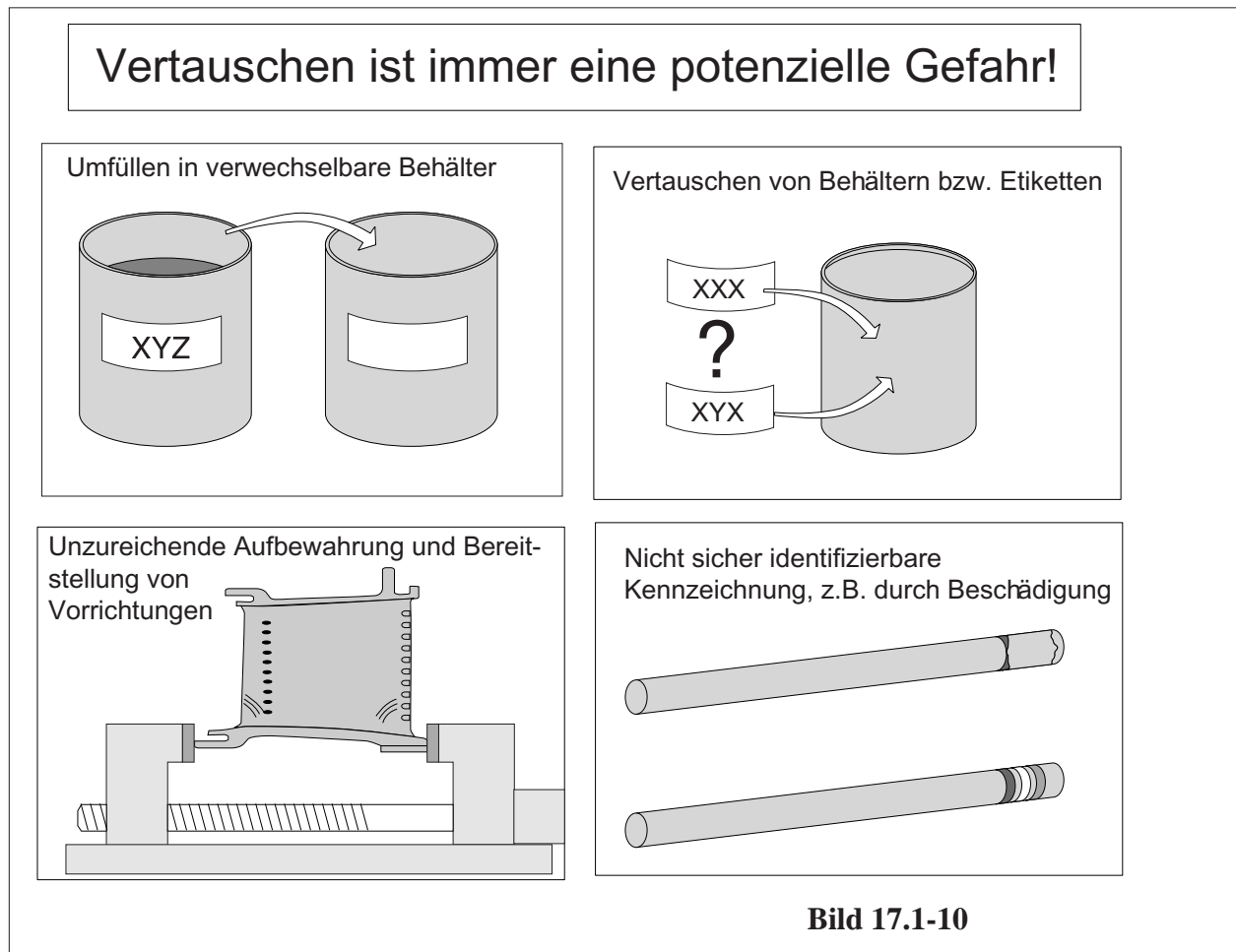


Bild 17.1-10: Vertauschen von Medien / Hilfsstoffe, Bauteilen bzw. Vorrichtungen und Werkstoffen ist auch in der Fertigung ein Problem. Der potenzielle Schadensumfang ist gerade bei dieser Fehlerursache besonders hoch. Dies liegt in erster Linie daran, dass Verwechslungen oft spät erkannt werden, nicht selten durch Zufall. Der Grund ist, dass unerwartet und schwer detektierbare Schäden und Abweichungen wie Versprödung und Festigkeitsabfall, die zerstörungsfrei nicht nachgewiesen werden, erst von einem unzulässigen Betriebsverhalten angezeigt werden. Dies hat gravierende Folgen:

- Viele Bauteile sind betroffen.
- Identifikation der potenziell betroffenen Bauteile für eine Risikoabschätzung und Maßnahmen gestaltet sich schwierig (Band 3, Bild 11.3-1).
- Betriebsschäden mit sicherheitsrelevanten und/oder hohen Kosten.

Medien: Umfüllen von Hilfsstoffen und Umetikettieren von Behältern (Skizzen oben) birgt die potenzielle Gefahr von Verwechslungen. Wird beim Umfüllen eine eindeutige Etikettierung versäumt, sind nachträgliche Verwechslungen vorprogrammiert. Während des Umetikettierens kann bereits eine Verwechslung entstehen. Das Werkstück kann z.B. in falschen Prozessbädern (Galvanik), behandelt werden.

Vorrichtungen: Hier spielen z.B. Spannkonturen eine Rolle. Passen diese nicht ausreichend, kann es zu örtlicher Überlastung der Bauteile kommen (Bild 18.5-1). Dies wiederum kann an Teilen mit spröden Diffusionsschichten zu Schichttrissen führen (Skizze unten links, Bild 18.7-1.2) die einen deutlichen Schwingfestigkeitsabfall zur Folge haben. Ungeeignete Werkstoffe der Spannflächen können anhaftenden

Abrieb an den Werkstücken begünstigen (Bild 18.3-1). Eine nachfolgende Wärmebehandlung oder ein galvanischer Prozess kann dann eine Schädigung auslösen (Bild 18.3-11).

Werkstoffe: Ursache solcher, wenn auch seltener Vorfälle ist meist eine **mangelhafte Kennzeichnung des Halbzeugs**. Werden z.B. die üblichen Farbringe der Kennzeichnung von Stangenmaterial beschädigt (Skizze unten rechts), erhöht dies die Gefahr einer Verwechslung. Selbst wenn die Legierung stimmt, kann ein unerwartet abweichender Werkstoffzustand (z.B. ausgehärtet statt lösungsgeglüht) problematisch sein. Das kann sich auf eine nachfolgende Zerspanung (z.B. Schleifrisse), Warmumformung (z.B. Warmrisse), Schweißen (Heißrisse) oder Ätzbehandlung (z.B. Risskorrosion) u.s.w. auswirken.

Ein besonderes Problem kann auftreten, wenn zwar der Werkstoff spezifikationskonform ist, es sich jedoch um einen, für die spezielle Anwendung **nicht zugelassenen Rohteil-lieferanten** handelt. Im Extremfall ist so der Einbau nicht zugelassener Bauteile möglich, was umfangreiche Korrekturmaßnahmen nach sich zieht.

Selbst scheinbar geringe Abweichungen in der Analyse von **Zusatzmaterial** wie Loten, kann unzulässige, äußerst schwer am Neuteil zerstörungsfrei feststellbare Eigenschaften der Verbindung entstehen lassen. Hierzu gehört eine ungenügende Zähigkeit (Versprödung), schlechte Bindung wegen eines abweichenden Lotschmelzpunkts oder zu niedrige Warmfestigkeit der Verbindung.

Bild 17.1-11: Ein großes Problem ist die ausreichende **bauteilspezifische Verfahrenserprobung**. Diese Gefahr besteht, wenn die Erprobung an Proben oder Bauteilen durchgeführt wird, die nicht in allen relevanten Eigenschaften den späteren Serienteilen entsprechen. So können z.B. Gefügeunterschiede wie Korngrößen, Kornorientierung und Korngrenzenbelegung das Ergebnis von Ätzprozessen beeinflussen. Hier kann sich die Resistenz gegenüber einem interkristallinen Angriff beeinflussen oder die Warmrissbildung bei Schweißungen bemerkbar machen.

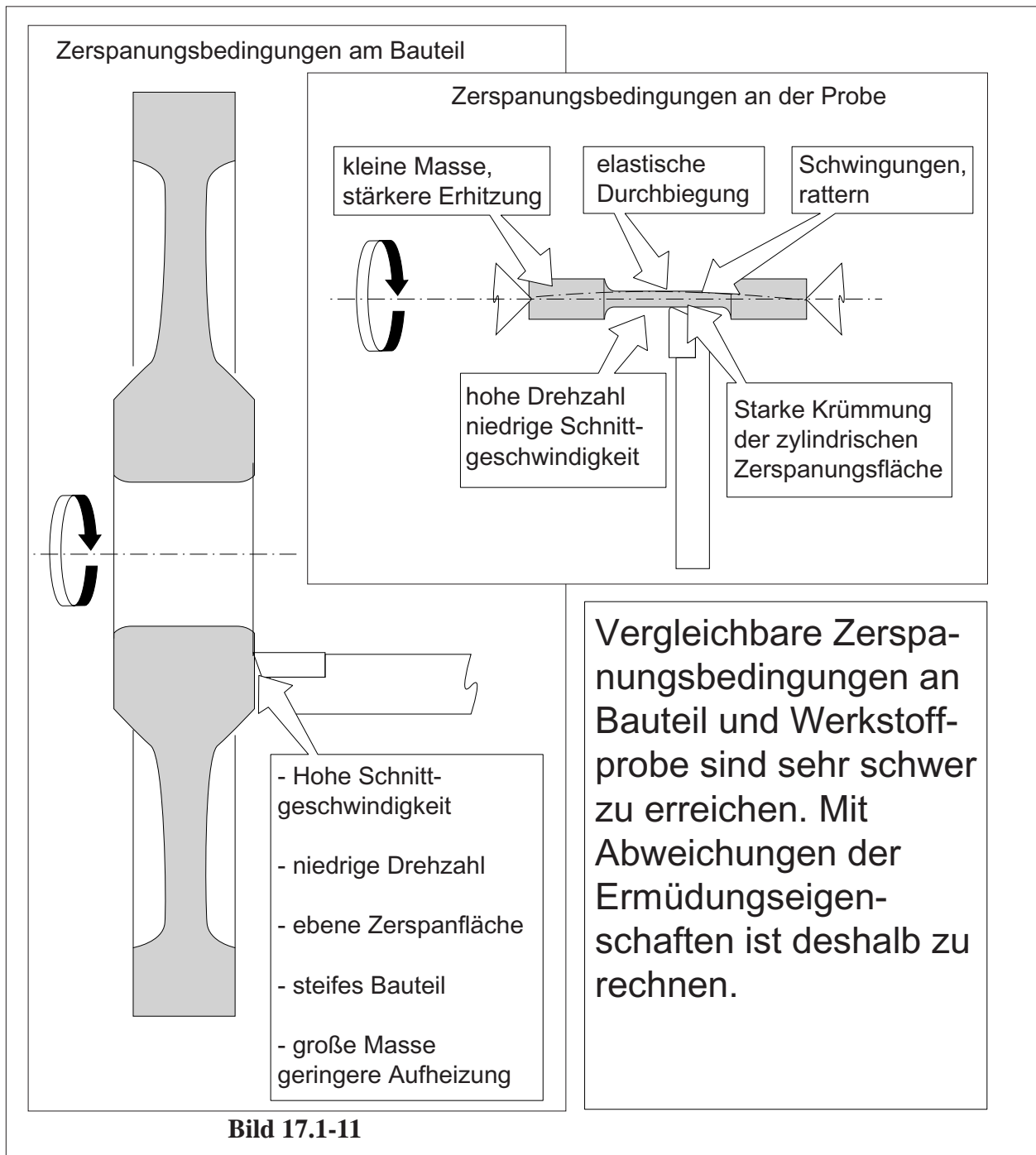
Einer besonderen Aufmerksamkeit bedarf die Erprobung von **Zerspanungsvorgängen**. Dies liegt daran, dass die Betriebssicherheit, insbesondere gegenüber dynamischen Beanspruchungen (Schwingfestigkeit) entscheidend vom Oberflächenzustand (Verfestigung, Eigenspannungen) abhängt (Bild 18.4-4 und Bild 18.4-10). Sie steht in engem Zusammenhang mit Zerspanungsbedingungen wie:

- **Kontur der Zerspanungsfläche** (Krümmungsradius, Skizze oben). Die Erprobung an einer Probe mit vergleichsweise kleinem Durchmesser und damit sehr kleinem Krümmungsradius lässt deutliche Abweichungen in betriebsrelevanten Oberflächeneigenschaften erwarten.

Auch die Bauteilgeometrie muss in den Zerspanungsparametern der Probe ausreichend berücksichtigt sein. So können z.B. Schaltpunkte, in denen z.B. die Werkstückdrehzahl und/oder der Vorschub verändert werden, die Schwingfestigkeit des Bauteils beeinflussen. Sie sind in diesem Fall bauteilspezifisch anzuordnen und müssen natürlich für Erprobungsteile, die Lebensdauernachweisen dienen, den späteren Serienteilen gleichen.

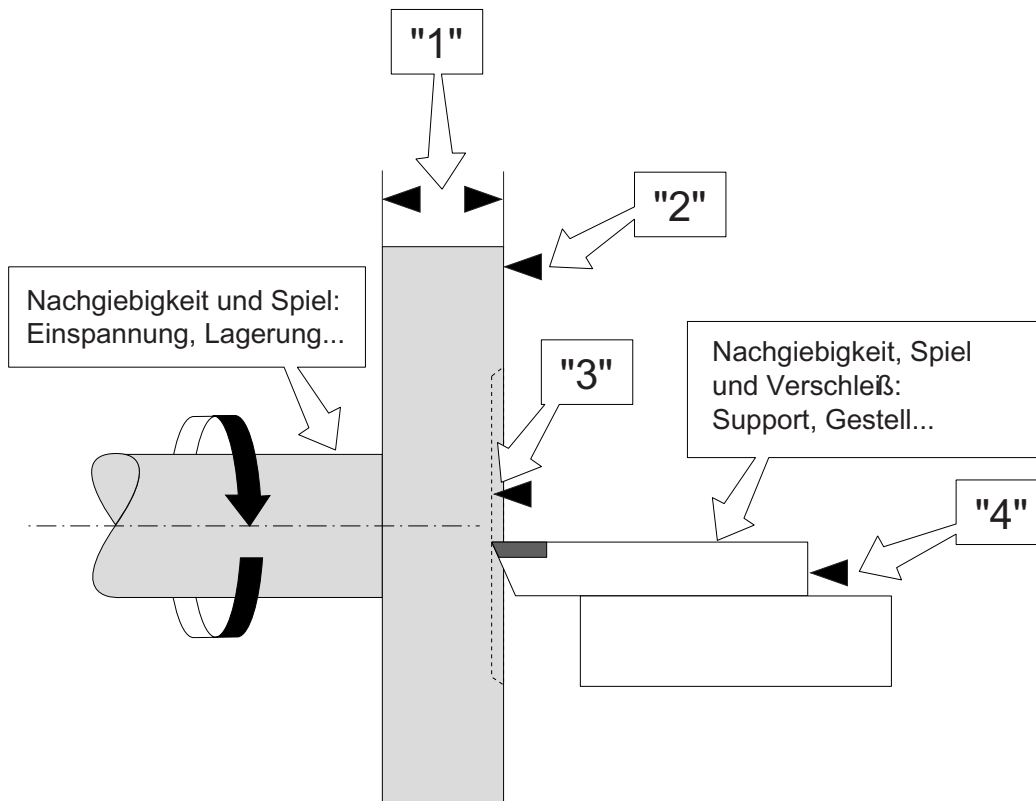
- **Steifigkeit des Systems Bauteil/Bearbeitungsmaschine**. Sie beeinflusst Vorgänge wie Rattern oder die elastische Auslenkung mit Maßproblemen.

- **Schnittparameter** in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie. Auf einem weiter innen liegenden Radius einer Planfläche herrscht bei



gleicher Drehzahl eine niedrigere Schnittgeschwindigkeit als weiter außen (Skizze links).
 - **Bauteilquerschnitte** beeinflussen neben der Steifigkeit die **Wärmekapazität** und damit die Temperaturen des Zerspanungsvorgangs (z.B. Schleifprozess). Diese lassen bei dünnen Bauteilquerschnitten höhere Bauteiltemperaturen erwarten.

Die Überwachung von Fertigungsverfahren sollte möglichst direkt erfolgen.



Beispiel: Die Messung sollte direkt am Bauteil erfolgen.

besser "1" "2" "3" "4" schlechter

Typische Eigenschaften die sich einer indirekten Überwachung entziehen können:

Verschleiß: Maßänderung, Erhöhung von Spielen

Veränderung der Elastizität: Rissbildung, Beschädigungen, Fehlstellen

Abweichende Werkstoffeigenschaften: örtliche Veränderungen von Härte /Festigkeit, Zähigkeit

Bild 17.1-12

Bild 17.1-12: Der Aufwand für die kontinuierliche Überwachung und Dokumentation eines Fertigungsprozesses wird dann akzeptiert, wenn er sicherheitsrelevant ist. Das gilt besonders, wenn eine zerstörungsfreie Prüfung für das Betriebsverhalten wichtiger fertigungsbedingter Eigenschaften nachträglich nicht mehr befriedigend möglich ist. Eine solche

Überwachung ist umso sicherer, je direkter sie auf den Fertigungsschritt erfolgt. In jedem Fall muss aber der Zusammenhang zwischen Messgröße der Überwachung und der zu gewährleistenden Bauteileigenschaft eindeutig, bekannt und verstanden sein. Je indirekter bzw. mit Zwischenschritten eine Überwachung erfolgt, umso eher können Abweichungen im

Überwachungssystem selbst die notwendige Zuverlässigkeit in Frage stellen. Beispiele sind ein Abdriften von Thermoelementen oder Vakuummessröhren.

Im Bild ist die Problematik am vereinfachten Beispiel eines Drehvorgangs dargestellt. Zu gewährleisten ist die Dicke der Scheibe innerhalb der Toleranzvorgabe. Eine direkte Messung nach dem Zerspanungsvorgang („1“) kann dafür als sicherstes Prüfverfahren angesehen werden. Eine Messung der Position der Planfläche („2“) setzt bereits voraus, dass andere nicht überprüfte Maße, aber auch die Aufspannung richtig sind. Die festgelegte und überwachte Eintauchtiefe der Schneide („3“) ist in ihrer Aussage für die Scheibenbreite noch indirekter, hängt dieses Maß doch von Einflüssen wie dem Meißelverschleiß ab.

Noch „unsicherer“, aber wohl recht einfach zu bewerkstelligen, ist die Messung der Stellung des Supports. Hier kommt als weitere Unsicherheit die elastische Verformung des gesamten Systems Werkstück/Maschine oder Verschleiß und Spiel in der Maschine dazu. Diese sind u.A. von den Schnittkräften, d.h. vom Zustand des Drehmeißels und der Spanabfuhr abhängig, die wiederum nicht gemessen werden. Ähnliche Überlegungen können auch für gänzlich andere Verfahren wie Wärmebehandlungen oder Reibschweißen (Lit. 13-3) angestellt werden.

Die Problematik wächst mit Eigenschaften die selbst nur indirekt gemessen werden können. Hierzu gehören Strahlintensitäten beim Kugelstrahlen (Band 3, Bild 12.2.1.6-2) für die ein separates Almenplättchen verwendet wird. Auch die Haftfestigkeit und Struktur von Beschichtungen (Einlaufschichten, Wärmedämmschichten, Band 3, Bild 12.2.1.8.2-7) ist nur indirekt zerstörungsfrei zu ermitteln (Bild 18.8-5 und Bild 18.8-6).

Bild 13.1-13: Ein Fertigungsprozess kann mit vom normalen Prozess abweichenden Besonderheiten Instabilitäten anzeigen. Damit besteht für den **erfahrenen Fachmann** die Möglichkeit einer gewissen kontinuierlichen Prozessüberwachung (Bild 17.1-5). **Es geht immer um „Ungewöhnlichkeiten“.** Dabei geht es nur darum, die Veränderung zu erkennen. Es bleibt dann den zu benachrichtigenden, zuständigen Fachabteilungen überlassen die Besonderheit zu bewerten und gegebenenfalls die Ursachen zu ermitteln und weitere Maßnahmen zu ergreifen.

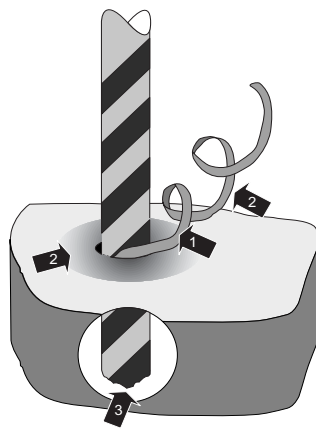
Die Betonung liegt für eine optimale Nutzung dieser Chance auf der **Erfahrung des Personals** vor Ort. Voraussetzung ist deshalb, dass das normale Bauteil- und Maschinenverhalten wie das Aussehen der Werkstücke vor- und nachher bekannt und präsent ist. Auch Merkmale im Prozess wie die Geräuschentwicklung während der Bearbeitung können wichtige Hinweise geben. Damit ist ein rechtzeitiges Erkennen von Problemen möglich. Zur Verdeutlichung die folgenden Beispiele:

Typische, durch **Augenschein** zu erkennende Kriterien sind **ungewöhnliche Abweichungen:**

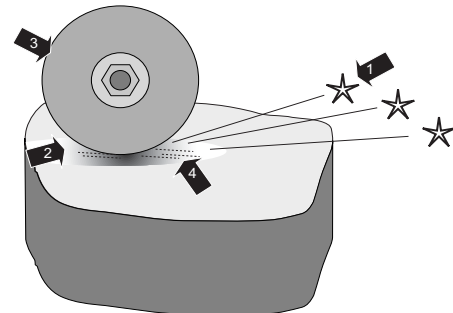
- **Späneaussehen, Brechen der Späne:** Das Aussehen der Späne **eines kontinuierlichen Zerspanungsprozesses mit definierter Schneide** (Bohren, Drehen, Skizze oben links) steht in engem Zusammenhang mit der Schneid-geometrie, den Zerspanungsdaten und Hilfsstoffen wie Kühlschmierstoff. Auch **auf Werkstoffeigenschaften wie Festigkeit und Zähigkeit sind aus dem Zerspanungsverhalten Rückschlüsse** möglich. Verändern sich diese, kann sich das auf das Spanaussehen (Länge, Brechen, Gleichmäßigkeit, Glüh-temperatur/Anlauffarben) merklich auswirken. Ein besonders wichtiges Anzeichen für einen örtlichen Festigkeitsabfall (z.B. Riss, Seigerung) wird angezeigt, wenn es **immer am selben Umfangsort zum Spanbruch** kommt. Tritt dabei ein leichter Stoß auf, ist das ein

Während des Fertigungsvorgangs lassen sich wichtige Beobachtungen machen, die Rückschlüsse auf die Qualität zulassen.

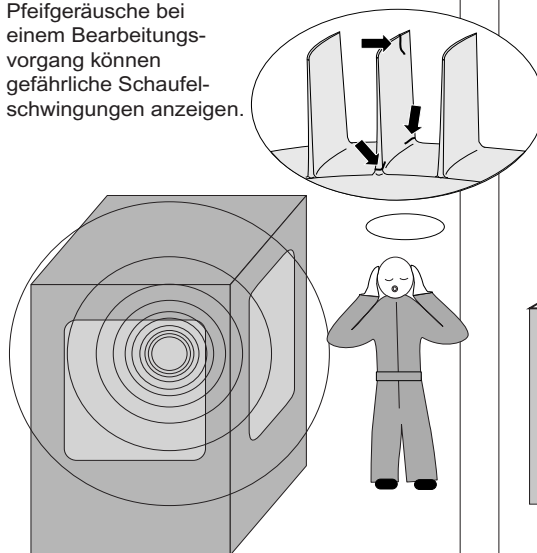
- 1 Späneaussehen
- 2 Anlauffarben und Glühfarben
- 3 Abnutzung des Werkzeugs



- 1 Funkenaussehen
- 2 Anlauffarben und Glühfarben
- 3 Abnutzung des Werkzeugs
- 4 Riefenbildung



Pfeifgeräusche bei einem Bearbeitungsvorgang können gefährliche Schaufel-schwingungen anzeigen.



Ungewöhnliche Verfärbung oder ein besonderes Reflexionsverhalten
ungewöhnliche Blasenbildung

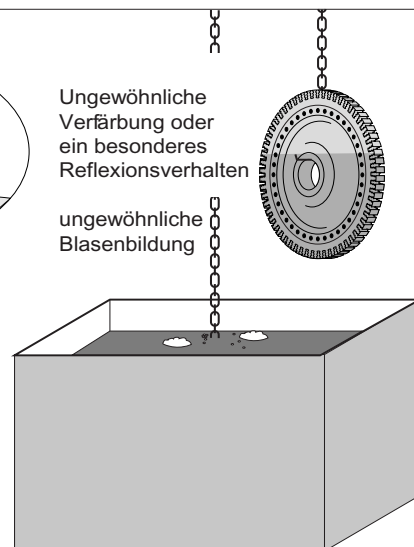


Bild 17.1-13

ernstzunehmendes Qualitätsmerkmal für den Werkstoff.

Veränderung der Zerspanungsbedingungen hin (Band 3, Bild 12.2.1.1.1-8.2).

Anlauffarben an Werkzeugschneide, Werkstück und Spänen weisen auf Veränderungen der Wärmeentwicklung und damit auf eine

Abnutzung des Werkzeugs lässt auf Veränderungen der Zerspanungsbedingungen rückschließen. Diese können auf unterschiedlichste Abweichungen von optimalen Prozess-

bedingungen zurückzuführen sein. Dazu gehören Bearbeitungsmaschine, Kühlschmierstoff (Verschleiß), Werkzeug, Werkstückmaterial (Warmbehandlungszustand oder Verwechslung).

Geräusentwicklung ist die Folge von Vibrationen des Werkstücks, der Vorrichtungen, der Werkzeuge oder der Maschine. Hat sich z.B. etwas an der **Einspannung des Werkstücks** oder am Werkstück ungewöhnlich verändert (z.B. Deformation, Rissbildung) kann das die Frequenz hörbar beeinflussen. Die Lautstärke hängt von der Heftigkeit der Schwingung ab. Diese lässt wiederum auf die Stärke der Anregung rückschließen. Hier wirken sich veränderte Zerspanungskräfte aus. Sie reagieren auf Einflüsse wie Festigkeit des Bauteilwerkstoffs, Werkzeugverschleiß und einer Veränderung des Kühlschmierstoffs sowie dessen Zufuhr. Auch eingeklemmte Späne an nicht einsichtigen Bearbeitungsflächen können die Geräusentwicklung verändern.

Beruhet die Geräusentwicklung auf Werkstückschwingungen, ist dies ein Alarmzeichen für eine mögliche Schwingerermüdung. Diese kann unerkennbar als Vorschädigung vorliegen (Band 1, Bild 5.4-2) oder sich im fortgeschrittenen Stadium als Riss zeigen. Besonders dünnwandige Bauteile wie Verdichterschaufeln (Bild 18.5-7.1) und Gehäuse sind für diese Möglichkeit anfällig (Skizze unten links).

Optische Effekte wie Funkenflug, Rauchentwicklung, Glühen sind ähnlich wie Anlauffarben Hinweise auf eine Veränderung der Energieeinbringung bzw. Wärmeentwicklung. Damit sind Effekte wie Werkzeugverschleiß oder eine Veränderung der Zerspanungsdaten (z.B. Vorschub, Zerspanungsgeschwindigkeit) ursächlich verbunden. Eine ungewöhnliche Funkenausbildung (Lit. 17.1-7) kann auf eine Werkstoffverwechslung oder eine unerwartete Beschichtung hinweisen. Der erfahrene Fachmann kann sogar auf Legierungsabweichungen rückschließen, die andernfalls aufwändige

Analyseverfahren erfordern. Die **Intensität des Funkenflugs** ist eher von der Intensität des Zerspanungsprozesses und/oder dem Kühlschmierstoff abhängig (z.B. Schleifen, Skizze oben rechts).

Auch ein ungewöhnlicher **Geruch** oder die Entstehung von **Rauch** und **Dämpfen** kann einen schädigenden Bearbeitungsvorgang anzeigen. Weitere optische Effekte betreffen die **farbliche Veränderung von Prozessbädern** oder eine ungewöhnliche Blasen- bzw. Schaumentstehung (Skizze unten rechts, Band 3, Bild 12.2.1.7-12).

Werkstückrauigkeit und Topografie: Ein erstes Zeichen ist ein **außergewöhnlicher Glanz bzw. mattes Aussehen**. Dies kann auf bestimmte Bauteilzonen begrenzt sein. Bei zerspannten Flächen kann ein ungewöhnliches Spiegeln auf Werkzeugverschleiß oder eingeklemmte Späne (ungenügende Späneabfuhr, Bild 18.5-3) mit starker Oberflächenverformung hinweisen. Bildet sich auf der Zerspanungsfläche das Korn deutlich ab (besonders bei grobkörnigem Ni-Guss) ist das ein Hinweis auf eine starke plastische Verformung. Matte Oberflächen sind eher unter dem Einwirken von Ätzbädern zu erwarten. Zeigt das Bauteil z.B. Bereiche die weiterhin metallisch glänzend sind, kann davon ausgegangen werden, dass hier das **Ätzbad nicht gewirkt** hat. Umgekehrt, erwartet man eine glänzende Fläche (z.B. Elektropolieren) und erkennt matte Bereiche, besteht der Verdacht eines **gefährlich intensiven Ätzangriffs** (z.B. interkristalline Korrosion).

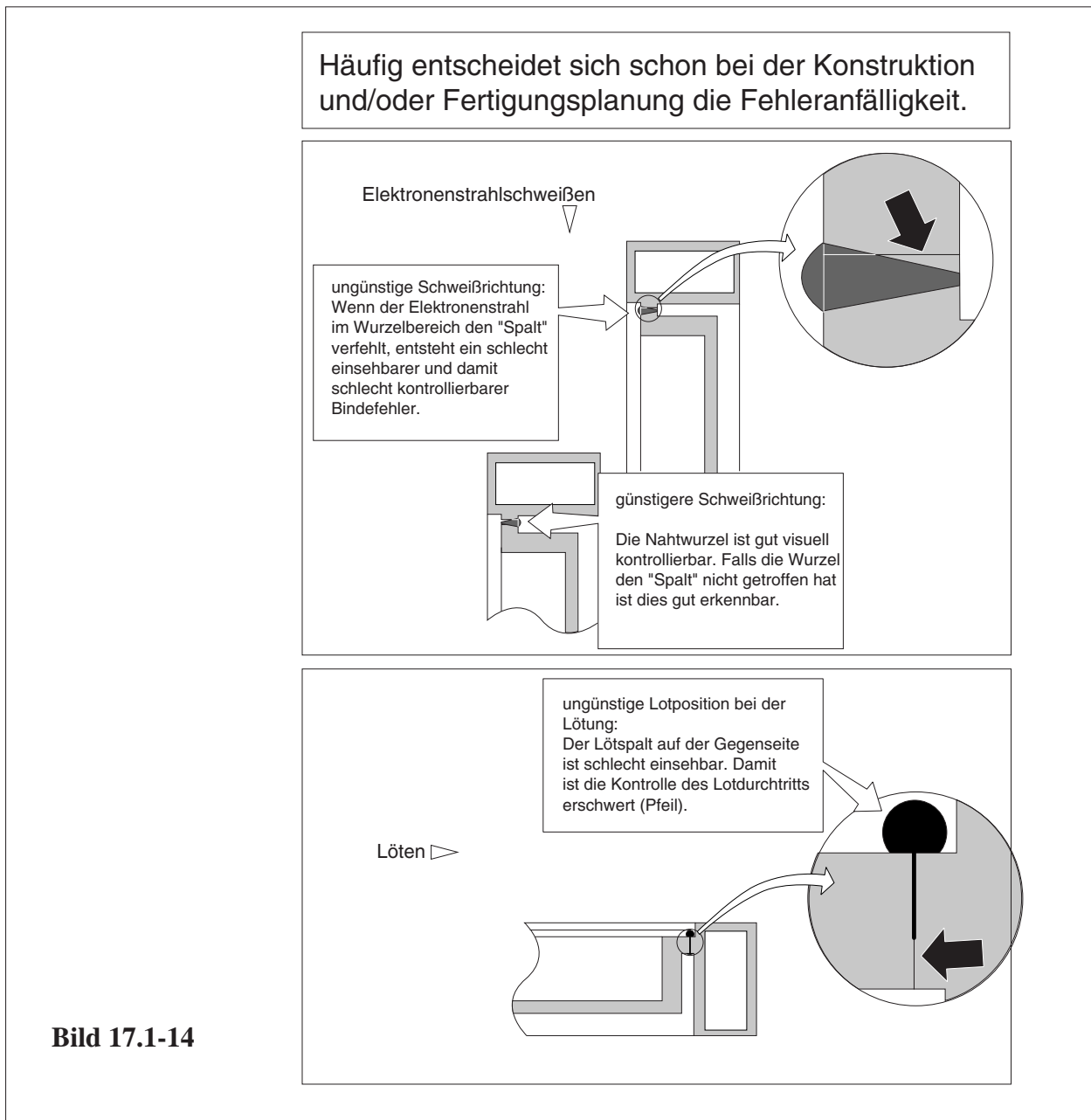


Bild 17.1-14

Bild 7.1-14: Bereits der **Konstrukteur**, möglichst in Zusammenarbeit mit der **Fertigungsplanung**, sollte aktiv eine optimale Fertigung mit geringstmöglicher Fehleranfälligkeit (FMEA, Bild 17.1-10) anstreben. So sind z.B. Schweiß- und Lötverbindungen so am Bauteil zu positionieren, dass optimale Bedingungen für den Verfahrensprozess vorliegen und die **visuelle Prüfung der Bindung über den gesamten Fügespalt** gewährleistet ist. Bei einer Elektronenstrahlschweißung kann dies mit einer Prüfung des Wurzelbereichs geschehen (Skizze oben). Ist diese schlecht

zugänglich, kann das die Bauteilsicherheit tangieren (Bild 18.6-6).

Entsprechendes gilt auch für Lötungen. Nicht immer wird diesen Forderungen nachgekommen. Ein Beispiel ist die ungünstige Gestaltung einer Lötung in der unteren Skizze (siehe auch Band 3, Bild 12.2.1.4-20).

Literatur zu Kapitel 17.1

- 17.1-1** H.Hansen, G.F.Kamiske, „Praxishandbuch Techniken des Qualitätsmanagements-Werkzeuge-Systeme-Prozessorientierung“, ISBN 3-933814-53-7, 1. Auflage August 2001, Symposion Publishing GmbH, Düsseldorf, Seiten 190-193, 263-290, 314.
- 17.1-2** M.Süß, „Qualitätsmanagement in der Luftfahrtindustrie“, Skriptum der Vorlesung an der TU München, Fakultät Maschinenwesen, Lehrstuhl für Flugantriebe, SS 2003.(3256)
- 17.1-3** P.Adam, „Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken“, Birkhäuser Verlag, 1998, ISBN 3-7643-5971-4, Seite 186, 187, 192-222.
- 17.1-4** DIN 55350 „Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik“, September 1980. (2762)
- 17-5** A.Rossmann „Unser Beitrag zur Qualitätssicherung“, Axel Rossmann Turboconsult, ISBN 3-00-007241-1. 2000. Englische Ausgabe: „Helping the Quality Effort“, 1999.
- 17.1-6** A.Packeisen, W.Theisen „Turning and Grinding of Hard Alloys“, Zeitschrift: „Advanced Engineering Materials, 1999, 1, No. 1, Seite 35-48. (646)
- 17.1-7** W. Friedrich. „Tabellenbuch für Metallgewerbe“, Ferdinand Dümmler Verlag Bonn, 1975, ISBN 3-427-51015-8, Seite 77.
- 17.1-8** D.Wagner, J.A. Birt, M.Snyder, J.P.Duncanson „The Human Factors Design Guide“, National Technical Information Service, Springfield, Virginia USA, 1996.
- 17.1-9** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken, - Problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 1“, 2000, ISBN -3-00-005842-7, Kapitel 2.3, Bild 2-4.

