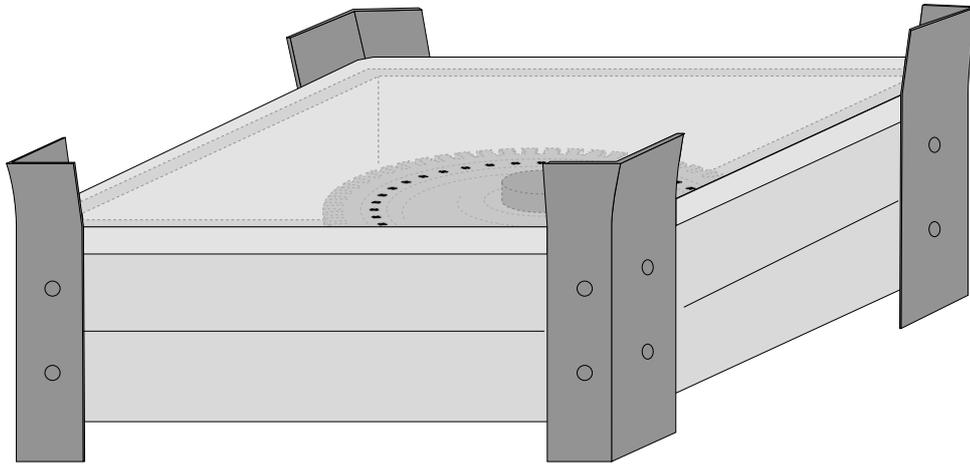


13. Handling, Verpackung, Transport, Lagerung



Bei sicherheitsrelevanten Betrachtungen können Handling, Verpackung, Transport und Lagerung der Werkstücke während und nach dem Fertigungsprozess ganz in den Hintergrund geraten. Zu Unrecht, denn es besteht ein durchaus bemerkenswertes Schädigungspotenzial. Fälle, in denen **am Fertigteil keine zerstörungsfreie Prüfung mehr** erfolgt, sind besonders kritisch.

Die **Handhabung** (engl. **Handling**) der Bauteile im Fertigungsprozess kann **mechanische Beschädigungen** an hochbelasteten Bauteilzonen erzeugen (Bild 13-1). Eine besondere Rolle spielt der innerbetriebliche Transport mit **Gabelstaplern**. Von den Fahrern sind Verhaltensweisen zu fordern, die das Risiko einer Werkstückbeschädigung minimieren (Bild 13-8).

Auch für den Transport im Rahmen des **Versands von Neuteilen** besteht die Gefahr mechanischer Beschädigungen (Bild 13-10).

Eine ganz andere gefährliche Schädigung ist **rissbildende Korrosion** (Bild 13-4). Diese Gefahr kann das **Tragen von Handschuhen** notwendig machen. Mechanische Beschädigungen infolge **Unachtsamkeit** (Band 4), sind im Fertigungsprozess und beim Versand des Neuteils (Bild 13-11) ebenfalls möglich.

Eine wichtige Rolle spielen Schädigungen an Werkstücken während einer **Zwischenlagerung** (Bereitstellung) im Rahmen des Produktionsprozesses (Bild 13-2). Es handelt sich in erster Linie um **Auswirkungen von Verunreinigungen** (Band 4, Kapitel 18.3). Solche Probleme lassen sich mit Hilfe geeigneter Container (Bild 18-5) ausreichend sicher vermeiden. Es gibt aber auch gänzlich andere, schädigende Einflüsse wie die **Überschreitung von vorgegebenen maximal zulässigen Zeitspannen**. In einem solchen Fall können sich Werkstoffeigenschaften unzulässig verändern (Versprödung, Band 4, Bild 18.7-8 und Bild 18.7-10).

Der **Versand erfordert ebenfalls geeignete Behälter bzw. Verpackungen** um Schäden an Neuteilen (Bild 13-5) zu vermeiden (Bild 13-9).

Sind **Beschädigungen** aufgetreten, bieten die heutigen Untersuchungsmethoden eine gute Chance **Ursachen zu klären und ermöglichen so gezielte Abhilfen und Risikoabschätzungen** (Bild 13-11).

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

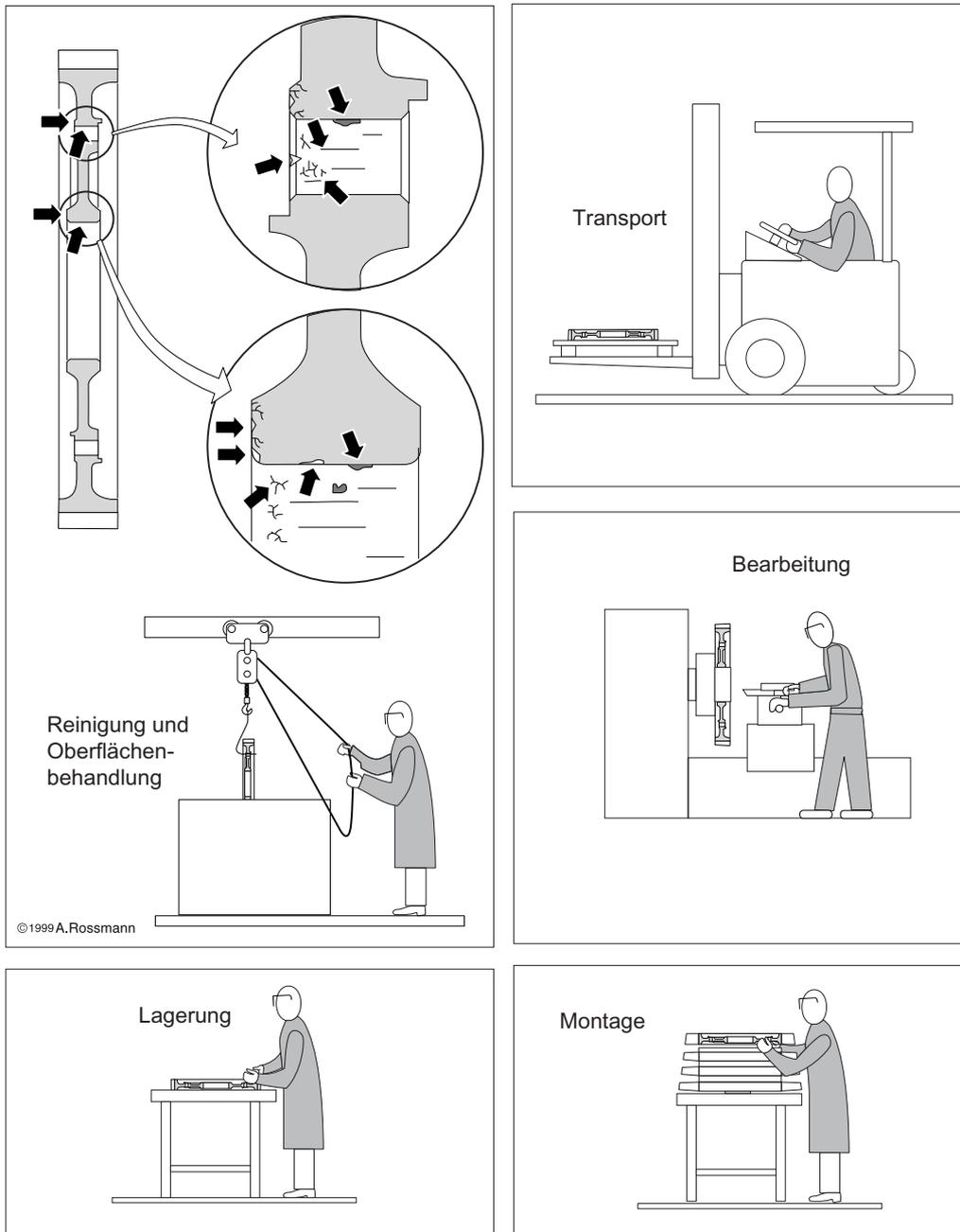


Bild 13-1

Bild 13-1 (Lit. 13-1): Die **Behandlung/Handhabung** (engl. **handling**) von Bauteilen kann **Riefen und Kratzer** erzeugen, die das Betriebsverhalten bzw. die Lebensdauer eines zyklisch belasteten Bauteils unzulässig beeinflussen.

Natürlich führt nicht jeder Kratzer zu einer gefährlichen Situation. Liegt der Kratzer aber an einer hochbeanspruchten (LCF) Stelle des Bauteils in einer ungünstigen Orientierung, kann dies die Lebensdauer des Bauteils entscheidend

verkürzen. Gefährlich sind beispielsweise Kratzer im Nabenbereich einer Scheibe und/oder in einer Verschraubungsbohrung. Gerade sie bieten sich für eine provisorische Aufnahme/Aufhängung zum kurzfristigen Transport oder für einen Tauchvorgang an (Skizze oben links). Bei diesem Vorgang können besonders gefährliche Axialriefen in Bohrungen entstehen. Auch beim Aufschieben eines Werkstücks auf Vorrichtungen besteht die Gefahr von Axialriefen (Band 4, Bild 18.5-1). Planflächen um Bohrungen sind von Riefen unterschiedlicher Orientierung bedroht. Diese entstehen beim Verschieben des Bauteils während Lagerung und Transport bevorzugt an planen Auflagen, wenn harte Partikel (z.B. Strahlgut/Korund) die Gegenfläche verschmutzen. Besonders heimtückisch sind Partikel die sich in einen weichen Werkstoff (z.B. Holz) eingedrückt haben und sich nicht mit Auskehren, Saugen oder Ausblasen entfernen lassen.

Die begrenzte Möglichkeit einer Korrosionsschutzschicht in Bohrungen von Stahlscheiben begünstigt bei ungeschützter Lagerung Korrosionsnarben.

Entstanden solche Riefen beim Handling oder werden sie dabei bemerkt, ist für die Einschätzung der Auswirkungen ein zuständiger Fachmann zu konsultieren (Band 4, Bild 17.7-1), selbst wenn ein scheinbar erfahrener Kollege die Beschädigung als ungefährlich beurteilt. Erst der Fachmann, hier von der zuständigen Qualitätssicherung repräsentiert, gibt die Gewähr einer richtigen Einschätzung und damit die Voraussetzung für die Einleitung geeigneter Schritte. Ist eine vorschriftsmäßige Nacharbeit notwendig und möglich, erfordert diese in jedem Fall ein abgestimmtes Vorgehen (Bild 13.5-1).

Um die Empfindlichkeit der Bauteile gegen kleine (zulässige) Kratzer zu verringern, werden die Oberflächen häufig präventiv kugelgestrahlt. Dadurch lässt sich die Wirkung der Kratzer entschärfen (Bild 12.2.1.6-1). Das heißt natürlich nicht, dass bei solchen Teilen beliebig Kratzer zugelassen sind.

Einige Empfehlungen zur Vermeidung von Beschädigungen der Bauteile beim Handling:

- Am besten ist natürlich, Kratzer und Oberflächenbeschädigungen werden vermieden. Diese Forderung geht besonders an alle die mit Bauteilen hantieren. Besonders in Fertigung, Qualitätskontrolle und Montage. So sind verschmutzte **Aufnahmen an Bearbeitungsmaschinen**, ein **Montagewerkzeug** mit einem Grat oder eine schmutzige **Auflagefläche** typische Ursachen von Riefen (Band 4, Bild 18.5-1).
- Woran erkennt man die Gefährlichkeit eines Kratzers? Erstes Indiz liefert die „**Nagelprobe**“: Bedenklich sind alle Oberflächeneindrücke, die mit dem Fingernagel oder der Fingerspitze fühlbar sind. Kratzer und Riefen können nachträglich auch wieder zugedrückt und deshalb kaum zu spüren sein. Im Zweifelsfall ist deshalb der Rat des zuständigen Fachmanns einzuholen.
- **Die Fehlstelle darf vor einer Beurteilung der Fachabteilung auf keinen Fall verändert werden.** D.h. kein Kratzen mit harten Gegenständen und kein Überpolieren.
- Kratzer, Eindrücke und undefinierte Beschädigungen jeder Art sind der **zuständigen Qualitätssicherung** zur Bewertung vorzulegen.
- **Eigenmächtige Nacharbeit**, wie das Auspolieren, ist **unzulässig**.
- Die **Ermittlung der Beschädigungsursache** stellt die Voraussetzung für gezielte, nachhaltige Abhilfen dar.

Bild 13-2: Die Lagerung der Werkstücke (Zwischenlagerung) zwischen aufeinanderfolgenden Fertigungsprozessen ist durchaus anspruchsvoll. Das zeigen die folgenden Beispiele.

Verschmutzungsgefahr (Skizze oben) wird von den folgenden Einflüssen begünstigt:

- **Ungeeignete Aufbewahrung der Werkstücke.** Sind z.B. die Bauteile nicht ausreichend abgedeckt, besteht erhöhte Gefahr einer schädigenden Verschmutzung (Band 4, Bild 18.3-20).

- **ungünstiger Aufbewahrungsort:** hierzu gehört die Nähe aggressiver Bäder, deren Dämpfe und eventuelle Spritzer auf die Bauteiloberfläche gelangen können.

Auch **Stäube** wie Lotpulver, Strahlgut (SiC) oder Pulver für Diffusionsbeschichtungen (Band 4, Bild 18.3-1.1 und Bild 18.3-2.1) können bei ausreichender Erwärmung in nachfolgenden Prozessschritten zu gefährlichen Schädigungen (Anschmelzungen) führen.

- **Nachlässigkeit und/oder ungenügende Motivation.** Dazu gehört Informationsmangel über die Folgen von Werkstückverschmutzungen Band 4, Bild 18.3-6 und Bild 18.3-20.

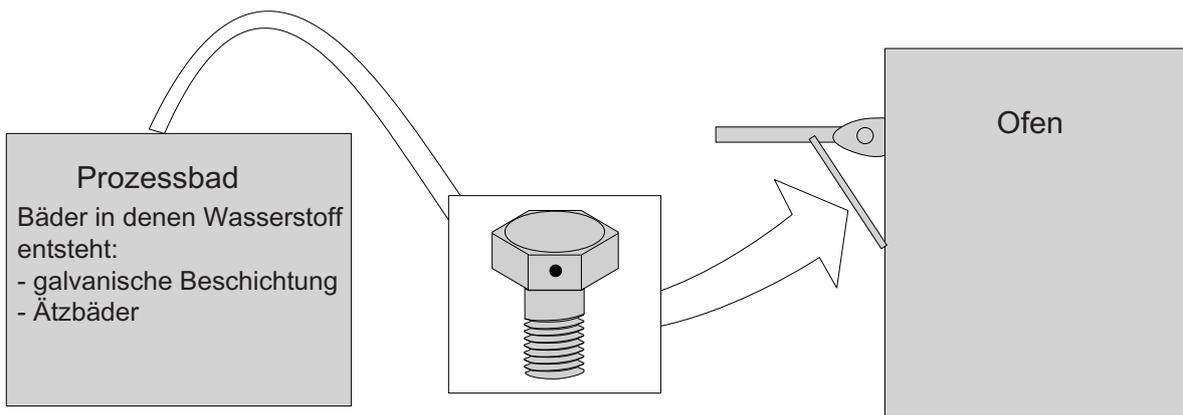
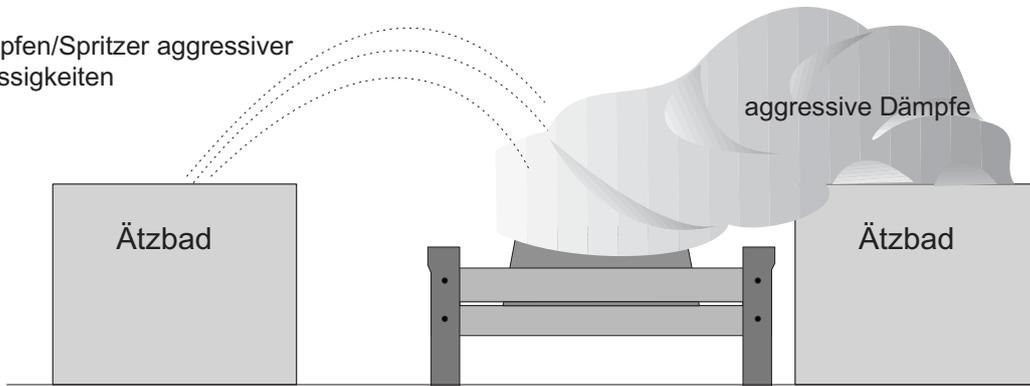
Liegen besonders reaktive Bauteiloberflächen vor, reicht die normale Luftfeuchtigkeit, möglicherweise verstärkt von Schwitzwasserbildung, um in kürzester Zeit Rost entstehen zu lassen. Besonders empfindlich sind frisch abrasiv gestrahlte Stähle.

Wasserstoffversprödung während zu langer Zwischenlagerzeiten (mittlere Skizze, Bild 12.2.1.7-14): Besonders hochfeste Stähle können in Prozessbädern Wasserstoff aufnehmen (Bild 12.2.1.8-5 und Band 1, Kapitel 5.7). Um diese Gefahr zu bannen, muss innerhalb eines Zeitraums von 2 Stunden nach der möglichen Wasserstoffaufnahme eine mehrstündige Erwärmung bei mindestens 180°C erfolgen (Bild 12.2.1.7-14). Wird diese Zeitspanne überschritten, besteht die Gefahr einer irreversiblen Versprödung.

Wasserstoffversprödung beim Schweißen unter Zutritt von Feuchtigkeit (untere Skizze): Werden Bauteile in der Kälte gelagert und dann vor dem Schweißen in einen warmen Arbeitsraum gebracht, kann sich **Schwitzwasser** bilden (Bild 12.2.1.3.1-18). Wird ohne vorhergehende, ausreichende Trocknung geschweißt, dissoziiert das Wasser und den entstehenden Wasserstoff nimmt die Schmelze begierig auf. Nach Tagen und Wochen kann es dann zu spröder Rissbildung kommen (Bild 13-3, Bild 12.2.1.3.1-18 und Band 1 Bild 5.7.1-6).

Probleme der Lagerung von Werkstücken im
Fertigungsprozess.

Tropfen/Spritzer aggressiver
Flüssigkeiten



zu langer Zeitraum zwischen
Verfahrensschritten:
Gefahr der Wasserstoffversprödung

Schwitzwasserbildung
an Teilen die im Kalten
gelagert wurden und dann
in eine warme Umgebung
transportiert werden.

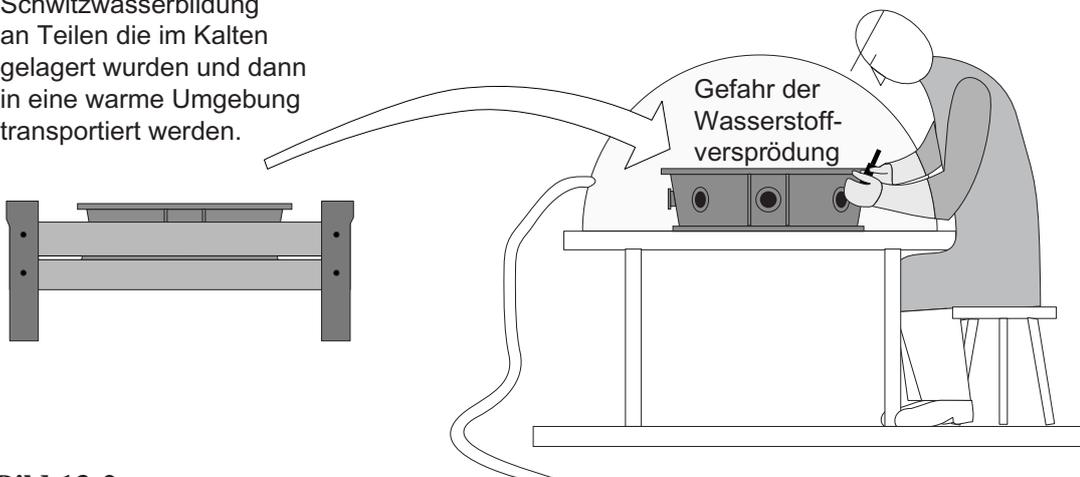


Bild 13-2

Auch während der Lagerung können an Neuteilen durch Korrosion und/oder Versprödung Risse entstehen.

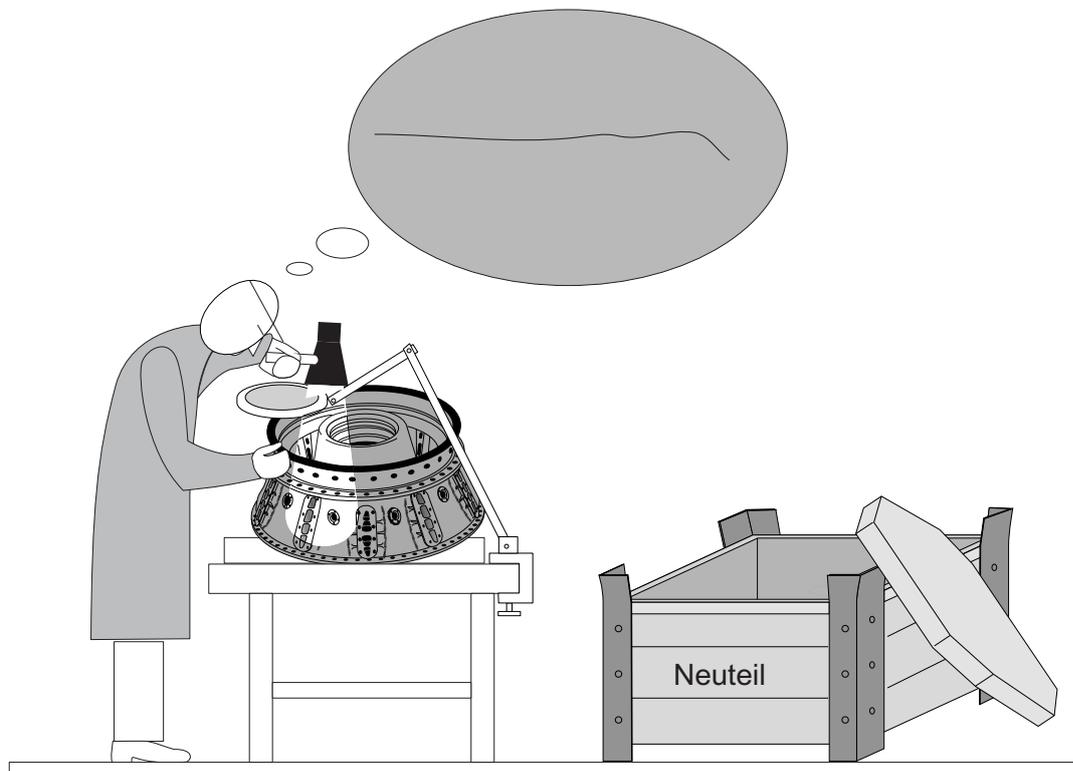


Bild 13-3

Bild 13-3: Verzögerte Rissbildung kann erst längere Zeit nach kritischen Fertigungsprozessen auftreten. Dann sind die Bauteile längst im Lager oder bereits ausgeliefert. Laboruntersuchungen (Bild 13-2, REM, Band 1, 2.2.2.4-3 und Band 4 Bild 17.3.1-12 und 18.7-10) lassen heute mit ausreichender Sicherheit feststellen, ob es sich um einen Mechanismus verzögerter Rissbildung handelt, meist eine Form der **Wasserstoffversprödung**. Sie tritt bevorzugt an Bauteilen aus besonders harten bzw. festen Stählen auf. Dabei muss es sich nicht um komplexe Schweißteile (Seite 12.2.1.3-2) handeln. Auch nicht ausreichend entsprodete Schrauben (Bild 12.2.1.8.3-7), Muttern, Rohrleitungsverbindungen, Gewindeeinsätze und Federn (Bild 12.2.1.7-14, Band 1, Bild 5.7.2-1) können betroffen sein.

Befinden sich Werkstoffe in einem empfindlichen Gefügestand kann **Luftfeuchtigkeit** oder **Meeresatmosphäre Spannungsrisskorrosion** auslösen (Band 1, Bild 5.6.3.1.2-1). Ein Beispiel sind Überwurfmutter aus hochfesten Aluminiumlegierungen bei denen offenbar die Wärmebehandlung von den Vorschriften abwich (Band 1, Bild 5.6.3.1.2-1).

Bild 13-4: Kochsalz löst in Titanlegierungen oberhalb 450°C Spannungsrisskorrosion aus (Band 4, Bild 18.3-16). Erfahrungsgemäß genügt bereits ein Fingerabdruck (Handschweiß), dass sich bei ausreichend hohen Zugeigenspannungen ein Riss bildet. Die erforderlichen Temperaturen werden während des Schweißens, offenbar auch beim Reibschweißen (Bild 12.2.1.3.4-5) und Wärmebehandlungen erreicht.

Handschuhe dienen nicht nur zum Schutz der Hände, sondern sind auch eine Voraussetzung für die Bauteilsicherheit.

Handschweiß ist gefährlich:

An Titanteilen die über 450°C erwärmt werden, können Risse ausgelöst werden.

Die Gefahr besteht besonders beim Wärmebehandeln und Schweißen.

An korrosionsempfindlichen Bauteilen wie Wälzlagern oder frisch abrasiv gestrahlten Stahlteilen kann es zur Rostbildung kommen.

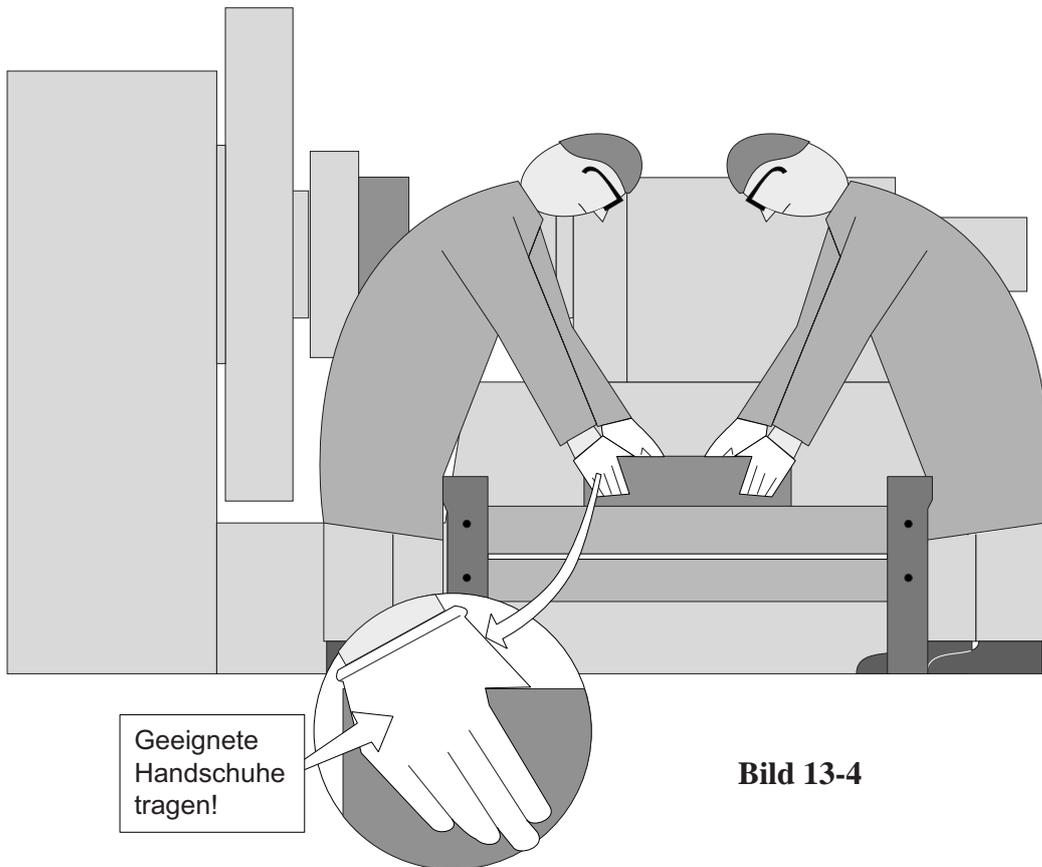


Bild 13-4

Als Vorbeugung gegen derartige Schäden sollten **geeignete Handschuhe** (z.B. Baumwollhandschuhe) beim Handling von Titanteilen getragen werden.

Auch korrosionsempfindliche Stahlteile können im Zusammenhang mit Handschweiß geschädigt werden. Es handelt sich jedoch nicht um Rissbildung, sondern um wässrige Korrosion im Zusammenspiel mit Schweißwasser. Gefährdete Bauteile sind z.B. Wälzlager.

Zumindest wegen des äußeren Eindrucks eines Korrosionsangriffs (Rost), aber auch weil

die Haftfestigkeit von Beschichtungen (z.B. Lacke) beeinträchtigt werden kann, ist das Handling der Bauteile mit bloßen Händen nicht zu empfehlen. Zu besonders empfindlichen Oberflächen gehören frisch geätzte oder gestrahlte Stahlteile und ungeschützte Leichtmetalle (Al- und Mg-Legierungen).

Die richtige Verpackung minimiert das Risiko von Transportschäden.

Transportkiste in der Fertigung

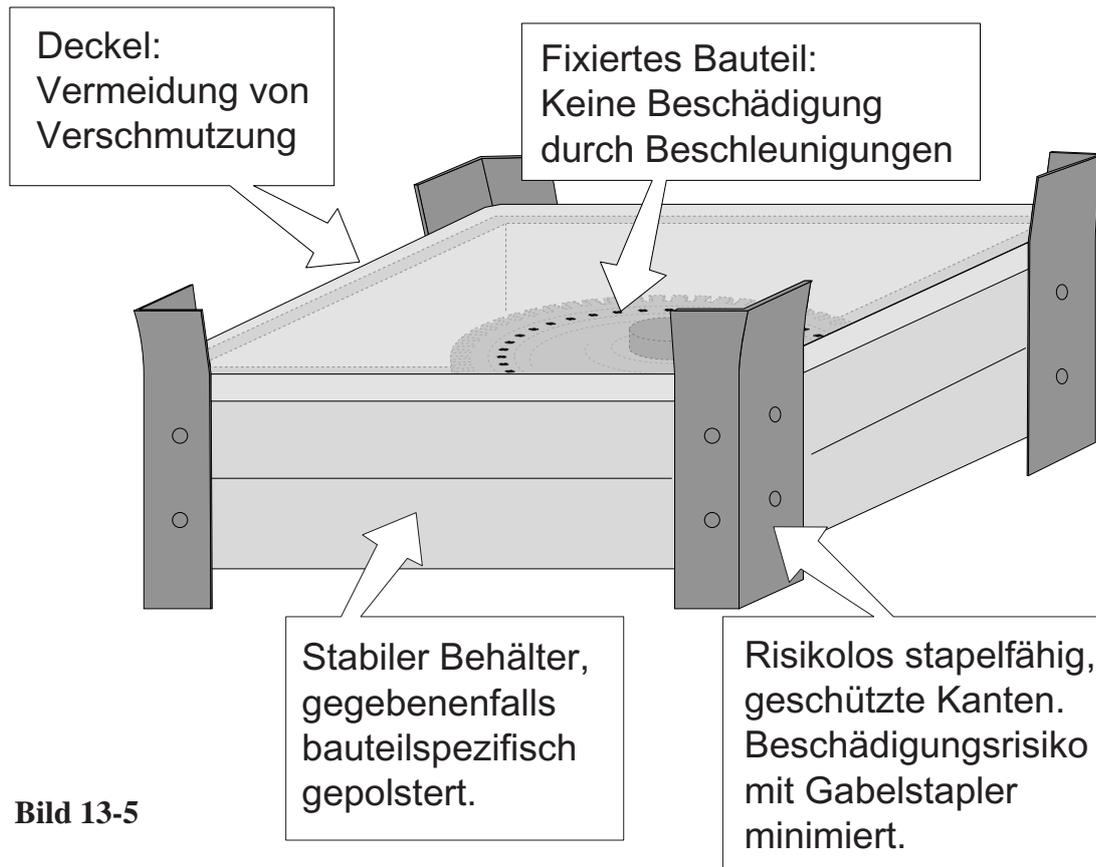


Bild 13-5

Bild 13-5: Ein geeigneter **Behälter für Transport** und Zwischenlagerung im Fertigungsprozess ist Voraussetzung, schädigende äußere Einwirkungen zu vermeiden (Bild 13-9). Zu den Forderungen an einen Behälter für Bauteile gehören:

Der **Deckel** sollte verschmutzende Fremdstoffe aus dem Fertigungsprozess (Bild 13-2) und aus anderen Quellen (Band 4, Bild 18.3-20) sicher abhalten.

Das **Bauteil ist im Behälter zu fixieren**. So wird ein Verschieben (Gefahr der Riefenbildung, Bild 14-1) und bei Stößen oder einer eventuellen Schiefelage das Schlagen an die Wände vermieden.

Der **Behälter muss ausreichend stabil** sein. Dabei sind die erheblichen Beschleunigungen (Stöße) beim Transport zu berücksichtigen. Diese Forderung kann bei schweren Bauteilen, einigen Aufwand erfordern.

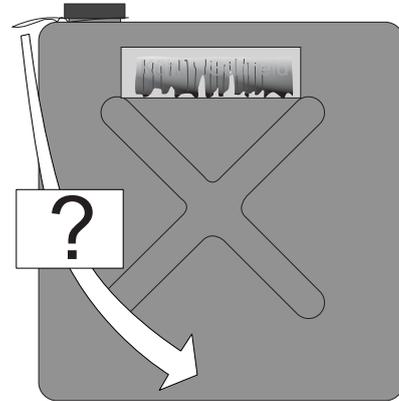
Die **Stapelfähigkeit des Behälters** muss Abrutschen und Kippen beim Aufnehmen und Transport sicher verhindern.

Zu weiteren Eigenschaften zählt bei wiederverwendbaren Behältern eine gute Reinigungsmöglichkeit. Die Sichtbarkeit des Bauteils lässt sich mit der Verwendung eines transparenten Deckels erreichen.

Die Lagerung von Hilfsstoffen der Fertigung erfordert Fachkenntnis und hat ein hohes Schadenspotenzial.



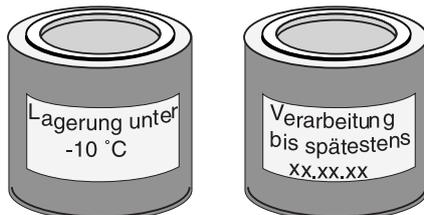
Entmischung durch
Vibrationen des Bodens



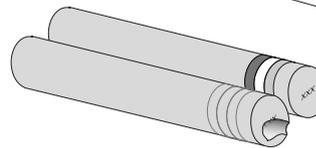
Nicht zugelassene
Produkte wie
silikonhaltige
Stoffe.



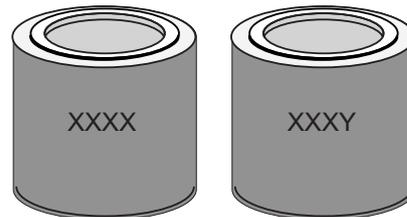
Verarbeitungstermine
und Lagertemperaturen
beachten!



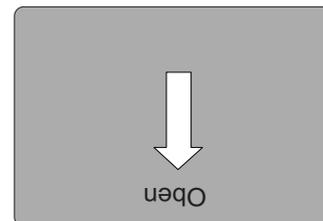
Kunstharze, Klebstoffe, Lacke, Elastomere



Beschädigte
Kennzeichnung
begünstigt
Verwechslungen.



Verwechslungsgefahr bei
sehr ähnlichen Verpackungen



Ungeeignete Lagerungsrichtung

Bild 13-6

Bild 13-6: Die Lagerung von Hilfsstoffen der Fertigung kann auf unterschiedliche Weise die Entstehung von Schäden beeinflussen. Das zeigen die folgenden Beispiele.

In Behältern mit Metallpulvern (Skizze oben links) für Lote, thermische Spritzschichten, pulvermetallurgische Bauteile oder gefüllte Elastomer- und Kunstharzbeschichtungen können Vibrationen eine Entmischung verursachen (Lit. 13-4, Bild 11.2.3-3 und Bild 12.2.1.8.2-6.2). Es genügen Vibrationen des Hallenbodens

oder eines Transports. Die Entmischung kann die Pulvereigenschaften im Behälter örtlich so verändern, dass das verarbeitete Produkt nicht mehr den Spezifikationen entspricht. Dazu gehören niedrige Festigkeit von PM-Teilen, ungeeignetes Schmelzintervall von Loten oder schlechtes Anstreichverhalten thermisch gespritzter Beschichtungen.

Besonders bei aushärtbaren organischen Medien wie den Komponenten von Kunstharzen, Klebstoffen und von Lacksystemen (Skizze unten links) ist auf die maximal zulässige

Lagerzeit zu achten. Diese steht in Zusammenhang mit Bedingungen wie Einhaltung eines geeigneten Temperaturbereichs (z.B. Tiefkühlung reaktiver Harze). Besonders kritisch sind sog. **Prepregs**, vorimprägnierte Lagen faserverstärkter Kunststoffe, die äußerst sensibel auf kurzzeitige Überschreitungen meist deutlich im Minusbereich liegender Lagertemperaturen reagieren. In den genannten Fällen kann die **Festigkeit** des Mediums selbst und/oder die **Haftfestigkeit** von Klebern und Beschichtungen betroffen sein.

Auf die **Position bzw. Lage eines Behälters** ist zu achten (Skizze rechts), wenn diese gekennzeichnet ist.

Eine besondere Gefahr geht von **Verwechslungen** aus. Deshalb sind alle Möglichkeiten dafür zu vermeiden. Bereits die **Ähnlichkeit von Behältern** kann Verwechslungen begünstigen. Das müssen Umfüllungen von Medien in kleinere Gebinde berücksichtigen.

Beschädigte Kennzeichnungen wie **abgerisene Anhänger, verwischte Aufkleber** (Skizze oben rechts) an Gebinden oder **deformierte Einprägungen und abgeriebene Farbmarkierungen** an Halbzeug können gefährliche Verwechslungen begünstigen. Selbst wenn eine Verwechslung bereits im Fertigungsprozess entdeckt wird, besteht die Gefahr, dass viele Werkstücke betroffen sind. Hohe Kosten und erheblicher Zeitaufwand sind die Folge.

Liegt die Beschaffung von **Hilfsstoffen wie Handwaschpasten oder Schutzcreme** (Skizze Mitte links) im Aufgabenbereich der **Lagerhaltung, ist auf explizit zugelassene Produkte** zu achten. So können z.B. silikonhaltige Produkte die Eindringprüfung beeinträchtigen (Band 4) oder die Haftfestigkeit von Lacken und Beschichtungen verschlechtern.

Die Folge einer Verwechslung von Hilfsstoffen kann **sehr teuer** sein. In einem Fall fiel das **ungewöhnliche Aussehen gelöteter Teile** auf. Das erforderte Maßnahmen mit Kosten im Bereich eines komfortablen Einfamilienhauses.

Bild 13-7 (Lit. 13-1): An einer gekühlten **Hochdruckturbinenschaufel** werden typische **Handling- und Transportschäden** gezeigt.

Verstopfen von Kühlluftkanälen und -bohrungen („1“): Staub und kleine Partikel können in unverschlossene Öffnungen eintreten und im späteren Betrieb die Kühlung verschlechtern. Damit wird die Lebensdauer überproportional verkürzt (Band 1 Bild 5.3.2-4 und Band 4). Wirken die Partikel im Betrieb aggressiv, kann Heißgaskorrosion entstehen und das Bauteil gefährlich schädigen (Band 4, Bild 18.3-13).

Abplatzen spröder Aufageschichten („2“ und „3“): Es handelt sich um thermische Spritzschichten wie Wärmedämmschichten und Labyrinthpanzerungen. Werden diese angeschlagen, können sie aus- oder abplatzen. In diesem Fall ist ihre Funktion eingeschränkt. Örtlich unwirksame Wärmedämmschichten führen zum Anstieg der Bauteiltemperatur und einem Lebensdauerabfall (siehe „1“). Ausgeplattete Panzerungen an Labyrinthspitzen beeinträchtigen den Anstreifvorgang und begünstigen so Rissbildung und/oder Materialaufbau mit Überhitzung. Bei einem Anstreifvorgang steigt die Gefahr katastrophalen Versagens (Lit. 13-4).

Beschädigung der Anstreifflächen von Bewegungsdichtungen („4“) wie thermischen Spritzschichten und Wabendichtungen (engl. Honeycomb). Dichtflächen aus Spritzschichten können ausbrechen, Wabendichtungen sind auf Grund ihrer filigranen Struktur für Deformationen infolge von Gewalteinwirkung empfindlich. Entsteht so ein Heißgasleckstrom zum mechanisch hochbelasteten Schaufelfuß, wird ein frühzeitiges Versagen der Schaufel ausgelöst. **Beschädigung spröder Diffusionsschichten („5“):** Zu solchen Schichten zählen Al-Diffusionsschichten für den Oxidationsschutz (Bild 12.2.1.8.1-2). Besonders Beschichtungen im Bereich von Kanten sind auf Grund der exponierten Lage von Ausplatzungen und/oder Rissbildung bei Stoßbeanspruchung betroffen. Damit wird zum einen der Oxidationsschutz ört-

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

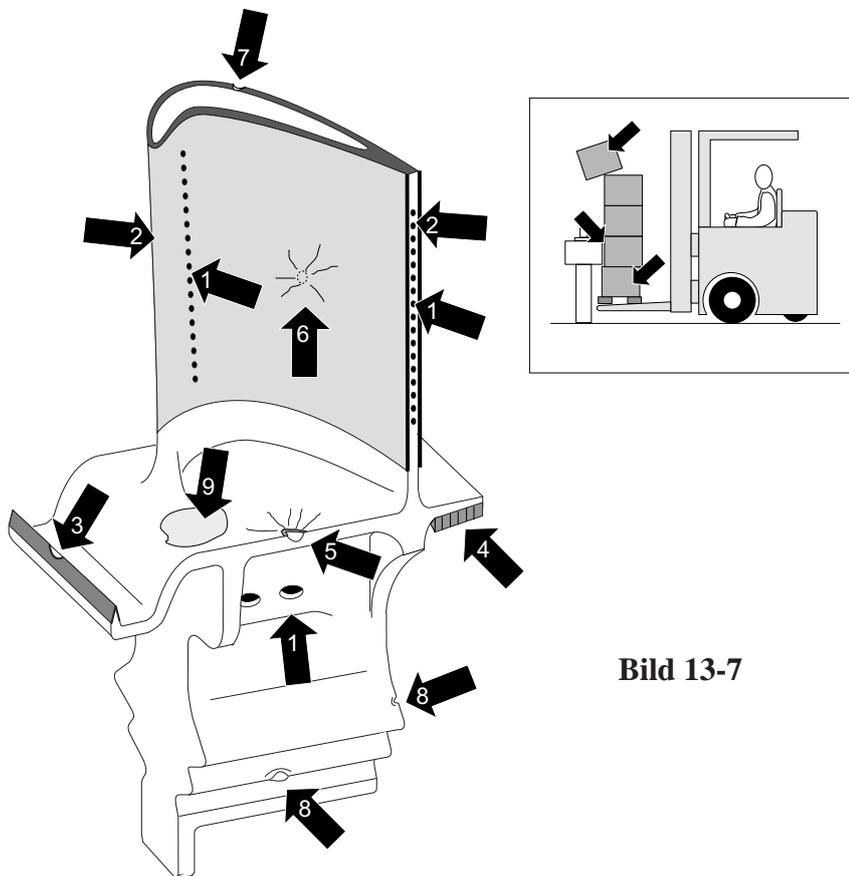


Bild 13-7

lich verschlechtert und die von ihm bestimmte Bauteillebensdauer verkürzt. Zum anderen können scharfe Kerben und Risse die Schwingfestigkeit unzulässig mindern. Thermoermüdung und hochfrequente Schwingungen können zum Risswachstum mit der Gefahr des Bauteilversagens führen.

Beschädigung von Spitzenpanzerungen („7“): Zur Spaltminimierung werden die Spitzen von Rotorschaukeln in Verdichter und Tur-

bine mit aufgelöten Hartpartikeln gepanzert (Lit. 13-4, Band 2, Bild 12.2.1.4-1). Selbst wenn es nicht zum Abplatzen der Panzerung kommt besteht die Gefahr, dass die spröden, keramischen Hartstoffpartikel ihre Schneidwirkung verlieren. Damit wird der spaltoptimierende Anstreifvorgang zu Betriebsbeginn beeinträchtigt. Die Schaufel wird an der Spitze über das zu erwartende übliche Maß hinaus geschädigt. Folgt eine verstärkte Oxidation mit einer

Spaltvergrößerung (Lit. 13-4), kann sich das sogar im Wirkungsgrad des Gesamttriebwerks bemerkbar machen (Deterioration; typische Werte in Lit. 13-4).

Deformation von Auflage- und Passflächen („8“): Sind Zentrierflächen deformiert, kommt es zu Montageproblemen. Riefen und Fressspuren in Füge­richtung (siehe auch Band 4, Bild 18.5-1) können die LCF-Lebensdauer merklich absenken. Verhindern erhöhte Fügekräfte die Anlage vorgesehener Positionierungsflächen, besteht die Gefahr eines Setzens im Betrieb. Folgen sind die Lockerung der Verschraubung und/oder Unwuchten mit umfangreichen Folgeschäden.

Verformungen an Auflageflächen die zur Kraft­einleitung dienen (z.B. am Schaufelfuß) können gefährliche Spannungsspitzen erzeugen, die zur Ermüdungsris­sbildung und zum Versagen führen.

Aufgeschmiertes Fremdmaterial („9“) ist dann besonders bedenklich, wenn es bei Betriebstemperatur mit dem Grundwerkstoff oder einer Beschichtung reagiert und diese schädigt (Band 4, Bild 18.3-1). Denkbar ist beispielsweise eine Versprödung oder die Schädigung der natürlichen schützenden Oxidschicht mit der Folge verstärkter Oxidation.

Bild 13-8: Gabelstapler als vielverwendetes Transportmittel im Fertigungsprozess und dem Versand der Fertigteile haben, wie die Erfahrung zeigt, ein durchaus bemerkenswertes **Schädigungspotenzial**. Es ist deshalb wichtig, die **Fahrer ausreichend zu sensibilisieren und zu motivieren**. Sie 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 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 einer Vorstellung möglicher 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 mögliche **Beschädigungen durch das Rangieren** oder bei der **Aufnahme eines Behälters** lässt sich in vielen Fällen aus dem äußeren Zustand rückschließen. 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 geeignete **Firmenkultur** (Band 4, Bild 17.5-2), 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 (**Brinelling**, Bild 13-10). Die Folge sind schwere Schäden im Betrieb.

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

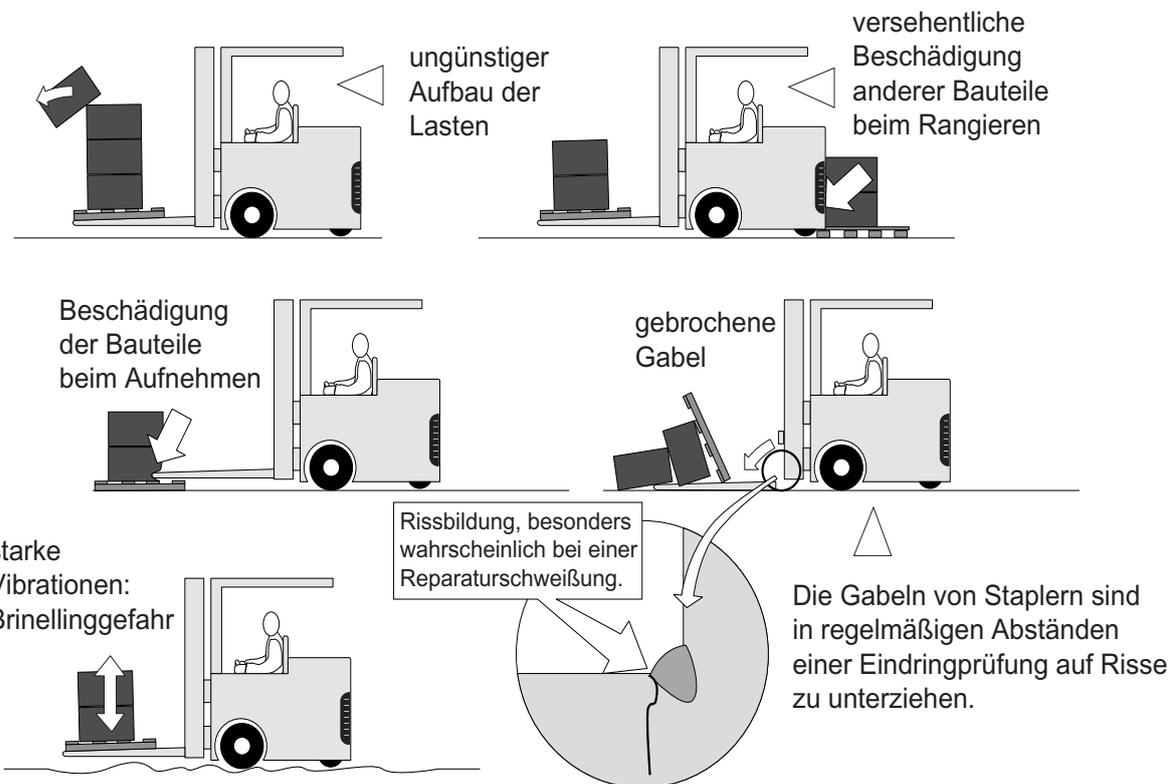


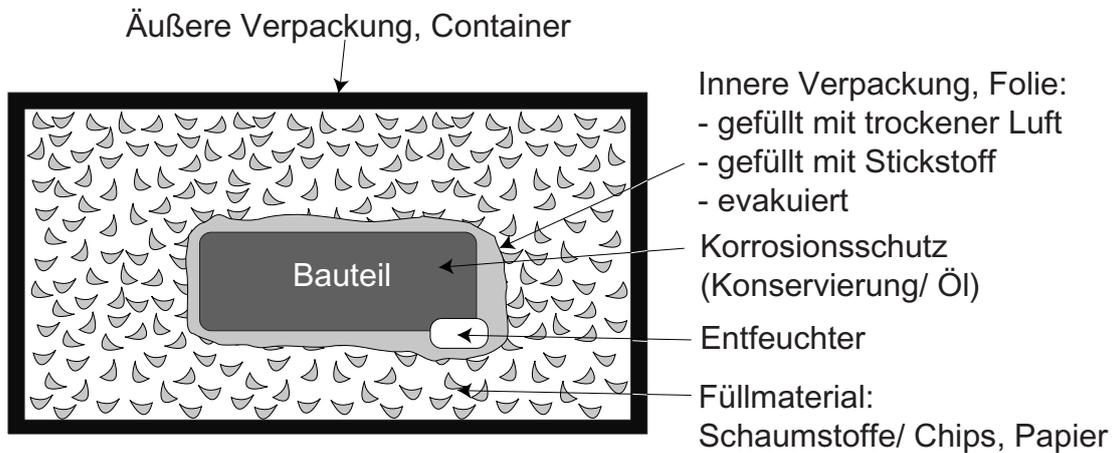
Bild 13-8

Nicht zuletzt ist die Möglichkeit eines Schadens am Gabelstapler selbst 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** (mit Röntgen oder Eindringprüfung) **auf Risse untersucht** werden. Besonderes Augenmerk ist auf die Innenecke am Übergang zum Schlitten für die Vertikalbewegung zu richten (Skizze Mitte rechts).

Ein Beispiel ist der Bruch einer Gabelzinke und das Herabfallen eines nur provisorisch verpackten Kampfflugzeugtriebwerks aus ca. 1 m Höhe. Verständlicherweise hatte dieser Vorgang umfangreiche und äußerst kostspielige Überprüfungen und Montagevorgänge zur Folge, ohne dass es zu Schäden an der Transportlast gekommen sein muss.

Bild 13-9: Lagerung und Transport von Fertigteilen und Baugruppen können ausgeklügelte Verpackungen bzw. Behälter erfordern (Skizze oben), um Schädigungen durch die vielfältigen, potenziellen äußeren Einwirkungen (Rahmen unten) zu verhindern. So wird die **Verpackung zumindest für die Adaption an die jeweiligen Bauteile zur Spezialistenaufgabe** und erfordert die Kenntnis der Bauteileigenschaften und Sicherheitsforderungen. **Mechanische Verpackungseigenschaften:** Hierzu gehört in erster Linie die Einwirkung äußerer Kräfte beim Transport, Stapeln und Handling (Bild 13-8). Mit der Empfindlichkeit und dem Gewicht des Bauteils steigen die Anforderungen an die Verpackung. Nicht nur die äußere Hülle ist von Bedeutung. Auch die Einbettung des Bauteils in Material wie Schaum-

Äußere Einwirkungen bei Lagerung und Transport.



mechanisch:

- Stöße, Vibrationen
- Kräfte vom Stapeln
- örtliche Beschädigung

Korrosiv:

- Feuchtigkeit: Luftfeuchte, Schweißwasser,
- Luftverunreinigungen: Meeresatmosphäre, Industriatmosphäre

Temperaturunterschiede:

- Alterung, Schädigung
- Schichtablösung
- Gasaustausch mit Atmosphäre

Luftdruckschwankungen:

- Gasaustausch mit der Atmosphäre
- Verdampfung oder Veränderung flüchtiger Substanzen

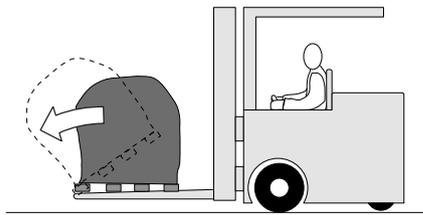
Bild 13-9

stoffformkörper, Schaumstoffchips oder Papierstrukturen. Dabei ist neben dem Aufwand/**Kosten** auch immer der Umweltaspekt (**Entsorgung**) im Auge zu behalten.

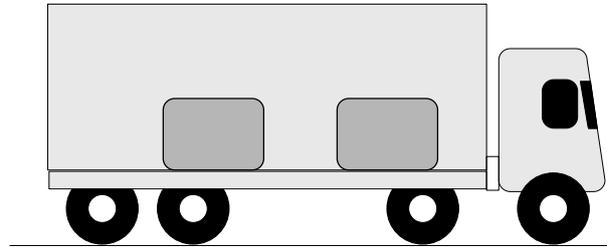
Korrosion ist gewöhnlich die Folge einer für die Umgebungsatmosphäre undichten Verpackung. So erhält **Luftfeuchtigkeit** Zutritt. In Kombination mit Schweißwasserbildung und **Meeresatmosphäre** oder **aggressiver Industriatmosphäre** kann es bei nicht ausreichender

der Konservierung zu einem schädigenden Angriff kommen. Für eine solche Situation sind **Laufbahnen von Wälzlagern** besonders empfindlich. Sie sollten sich mit **ausreichend dichten Verpackungen, geeigneter Konservierung der Bauteile und Entfeuchter** (Kieselgel, engl. silica gel) in der Verpackung vermeiden lassen. Große Temperaturunterschiede wie zwischen Tag (Sonneneinstrahlung) und Nacht (z.B. in

Situationen für Transportschäden während und nach dem Fertigungsprozess.



kippen, anstoßen, fallen lassen,
Beschädigung der Verpackung



große Beschleunigungen, Vibrationen

Bild 13-10

Wüstengegenden und/oder beim Lufttransport) kann bei undichten Verpackungen der **Austausch mit der Umgebungsatmosphäre** und damit z.B. der **Zutritt von Feuchtigkeit** und/oder Feinstaub intensiviert werden. Liegen solche Bedingungen über längere Zeiten (z.B. Monate) vor, können Elastomere (Dichtungen, Beschichtungen) oder Kunstharze (Klebstoffe) altern (verspröden, Festigkeitsabnahme) und/oder die Haftfestigkeit abfallen. Über ausgedehnte Lagerungszeiten ist auch eine Veränderung von Medien wie ungeeignetem Konservierungsöl denkbar.

Ein ähnlicher Effekt kann auch im Zusammenhang mit **Luftdruckschwankungen** stehen. Diese sind z.B. bei Veränderung der Höhe zu erwarten, z.B. beim **Transport über hohe Pässe oder in einem Flugzeug**. Dabei ist es auch denkbar, dass Bestandteile eines flüssigen Mediums verstärkt abdampfen.

Bild 13-10 (Lit. 13-1): Transportschäden sind für den Absender, den Transporteur und den Empfänger ein besonderes Ärgernis. Werden sie nicht erkannt, kann das Betriebsverhalten eines Bauteils unzulässig beeinflusst sein. In diesem Fall besteht neben Verzögerungen und Kosten ein potenzielles Sicherheitsrisiko. Einige Transportschäden kann der Absender selbst vermeiden. Gerade Triebwerksteile stellen gewöhnlich einen großen Wert dar. Sie sind

hoch präzise, manchmal auch filigran oder korrosionsempfindlich. Verpackungen müssen diese Eigenschaften des Transportguts und die zu erwartenden Transportbelastungen berücksichtigen. Handelt es sich um Baugruppen (Module) mit **Wälzlagern** können **Vibrationen** (z.B. von einer unebenen Straße) oder **wiederholte Stöße** (z.B. Schienenstöße, Rangierstöße) zu Verschleißschäden an den Wälzagerlaufbahnen führen (**Brinelling**, siehe auch Band 4, Bild 18.5-8). Natürlich müssen die Verpackungskosten in einem sinnvollen Verhältnis zum Wert des Bauteils stehen. Stöße sind gerade auch von den Kanten her abzufangen, Feuchtigkeit ist vom Innenraum fernzuhalten und Belastungen in einem Stapel sind zu berücksichtigen. Im Inneren dürfen sich Teile nicht berühren, um gefährliche Kerben auszuschließen oder zu verhindern, dass spröde Schichten (z.B. keramische Wärmedämmschichten) abplatzen. Die Teile dürfen bei Vibrationen nicht aneinander reiben, um Verschleiß und Festigkeitsabfall (Fretting) zu vermeiden. Die Verpackung muss das Teil also sicher fixieren. So hat sich z.B. gezeigt, dass **Honeycombdichtungen** mit ihren typischen **dünnen Blechstege**n an den Kanten besonders leicht beschädigt werden können. Das gilt beispielsweise für Transportstöße auf Bauteile in Kunststoffkästen. Die Berührungsflächen der Verpackung müssen so nachgiebig und weich sein, dass die Teile

nicht beschädigt werden können. Hervorstehende Metallteile wie Nägel sind auszuschließen.

Wenn trotz guter Verpackung das Teil beschädigt beim Kunden eintrifft, besteht der berechtigte Verdacht, dass der **Transport ungewöhnlich rau** war. Wie lässt sich ein solcher **Verdacht nachweisen**? Moderne Labormethoden, in erster Linie das REM, (Band 1 Bild 2.2.2.4-3) ermöglichen bei akzeptablem Aufwand die Klärung der Ursachen eines Transport-schadens. Diese Untersuchungsmethode lässt sowohl über die Geometrie einer Verformung als auch gegebenenfalls mit der chemischen Analyse eines Abriebs oder von Aufschmierungen den Verformungsvorgang rekonstruieren.

So verdächtigte anfangs der Empfänger einen herausstehenden Nagel in der Transportkiste als **Ursache eines Transportschadens**. Es handelte sich um die Beschädigung am Außendurchmesser einer Verdichterscheibe. Mit Labormethoden ließen sich jedoch typische Mauerreste in der Beschädigung nachweisen. Sie belegten eindeutig, 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.

In einem anderen Fall wurden in verbogenen Honeycombzellen ausgebrochene Kunststoffreste der Verpackung gefunden. Das wies auf einen zu harten Kunststoff der Verpackung hin.

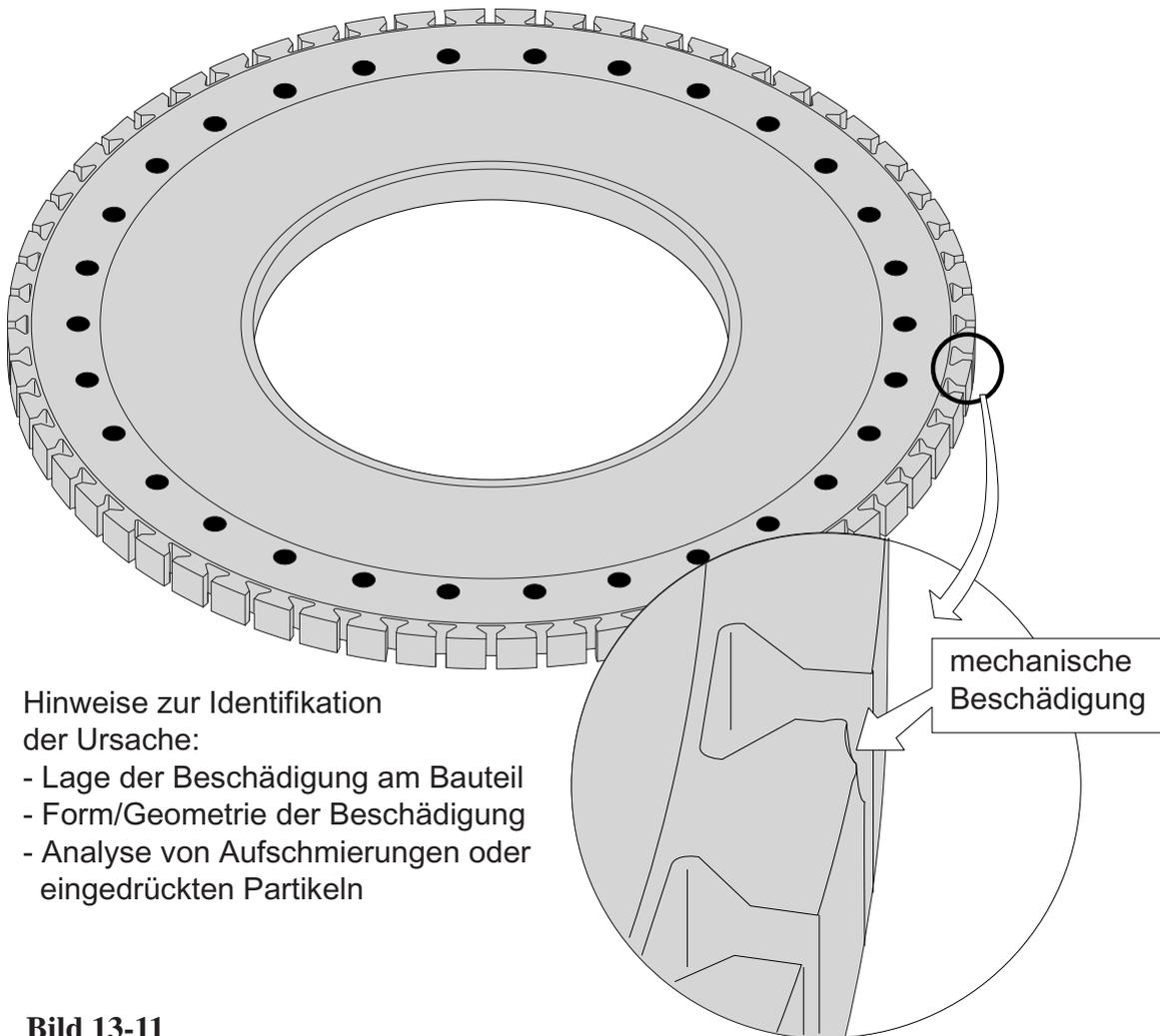
Auch die **Farbe einer Verpackung** kann Anlass für kostspielige Schäden sein. So wurde ein Fall bekannt, bei dem man die gelbe Aramid-Containmentbandage eines kleineren Fantriebwerks während des Auspackens irrtümlich mit einem Messer aufschnitt. Das Personal hatte diese wichtige Triebwerkskomponente **mit einem üblicherweise gelben Verpackungsmaterial verwechselt**.

Einige Empfehlungen zur Vermeidung von Beschädigungen der Bauteile beim Handling:

- **Verpackungen von Triebwerksteilen erfordern Fachwissen von Spezialisten.** 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 **Laboruntersuchung** 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.

Bild 14-11: Voraussetzung für eine gezielte vorbeugende Vermeidung von Transport und Handlingschäden (Band 4) ist die Ermittlung der Ursachen bereits aufgetretener Fälle. Handelt es sich um sicherheitsrelevante und/oder kostspielige Schäden wird zu einer Problemanalyse geraten (Band 1 Kapitel 2.2.2). Das wichtigste Verfahren zur Ermittlung der notwendigen Fakten ist erfahrungsgemäß die sog. REM-Untersuchung (Band 1 Bild 2.2.2.4-3). Mit ihr lassen sich auch kleinste Beschädigungen dokumentieren, geometrische Besonderheiten erkennen und auf ihren Ursprung rückschließen. Die Zusammensetzung eventueller Aufschmierungen oder eingedrückter Partikel können analysiert werden. Wegen der von der Probenkammer des REM eingeschränkten Probengröße können Abdrücke im Schadensbereich notwendig werden (Band 1 Bild 2.2.2.4-4). Das schließt natürlich chemische Analysen

Die Aufklärung von Transportschäden ist eine Voraussetzung weitere zu vermeiden.



Hinweise zur Identifikation der Ursache:

- Lage der Beschädigung am Bauteil
- Form/Geometrie der Beschädigung
- Analyse von Aufschmierungen oder eingedrückten Partikeln

Bild 13-11

aus. Es sei denn, Partikel bleiben am Abdruck haften.

Die **geometrische Form** der Beschädigung gibt wichtige Hinweise auf die Gestalt des Gegenstücks. So sind Nägel, Schrauben oder andere Bauteile und Teile der Verpackung identifizierbar.

Die **chemische Analyse von Aufschmierungen und Partikeln** lässt Rückschlüsse auf deren Art und Herkunft zu.

Im Fall der Beschädigung einer Turbinenscheibe gelang der Nachweis, dass eine Beschädigung durch den Kontakt mit einer Betonwand beim Empfänger der Lieferung erfolgt sein muss.

Die Ergebnisse der REM-Untersuchung können auch für eine nachfolgende Bewertung der **Weiterverwendung** des Bauteils oder einer eventuellen **Nacharbeit** (Band 4, Bild 17.5-1) entscheidend sein.

Literatur zu Kapitel 13

- 13-1** A.Rossmann, „Unser Beitrag zur Qualitätssicherung“, 1998, Turboconsult.
- 13-2** Metals Handbook „Volume 11, Failure Analysis and Prevention“, ASM 1986, ISBN 0-87170-007-7. Seite 211, 212.
- 13-3** I.E.Traeger, „Aircraft Gas Turbine Engine Technology“, Second Edition, Glencoe, ISBN 0.07-065158-2, 1994, Seite 399.
- 13-4** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 2, 2000 Turboconsult., ISBN 3-00-008429-0, Bild 7.1.3-15, Bild 7.1.4-2, Bild 7.1.4-14 und Bild 7.2.2.-4.