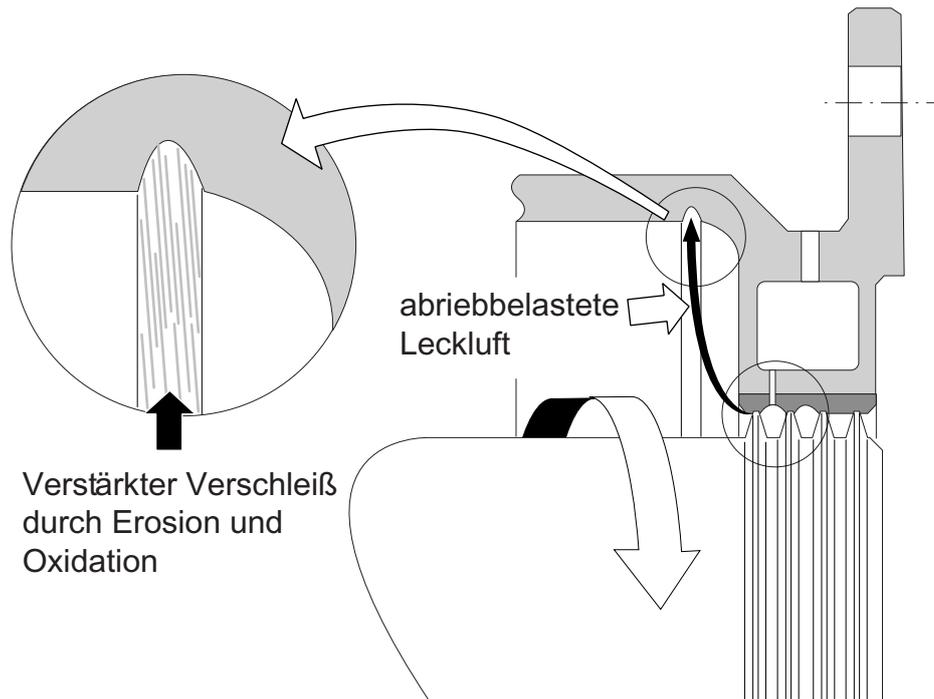


## 5. Effekte und Mechanismen der Betriebseinflüsse

### 5.1 Wechselseitige Beeinflussung von Effekten



*Diese Skizze zeigt den Mechanismus eines verstärkten **Erosionsvorgangs in und um ein Labyrinth**.*

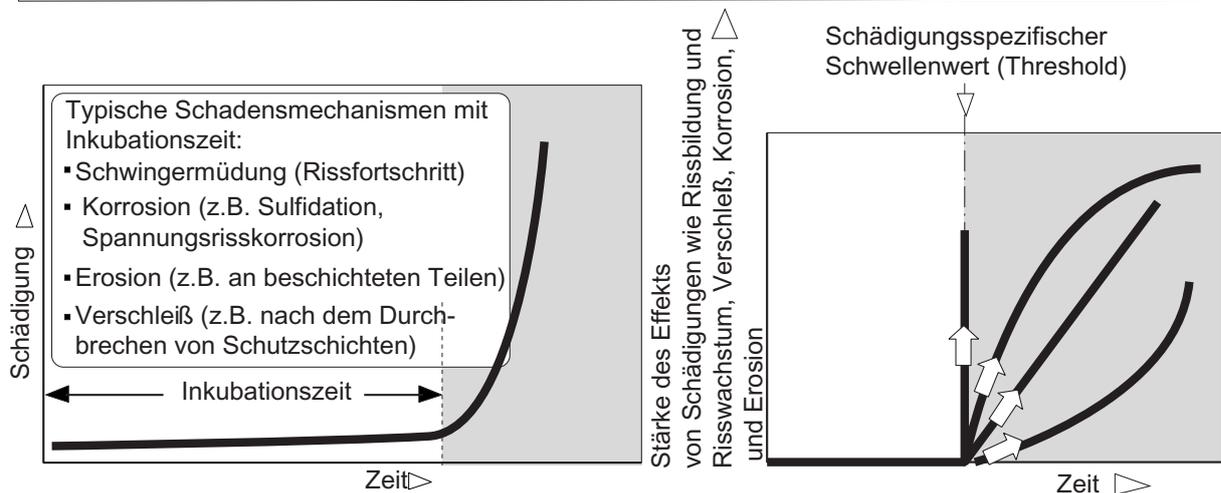
*Erosiver Labyrinthabrieb von Spitzenpanzerungen oder Einlaufschichten kann aus dem Labyrinth ausgeblasen werden und sich*

*in benachbarten Gehäusebereichen fangen. Dort wird der Staubfilm herumgewirbelt. Es kommt bei ausreichend hohen Betriebstemperaturen zu einer Kombination von Erosion mit der Oxidation der immer frischen und damit reaktiven Metalloberflächen. So wird der Abtrag deutlich verstärkt und kann mehrere Millimeter dicke Querschnitte durchdringen.*

Ist bereits die Berücksichtigung der Auswirkung einzelner Effekte nicht einfach, erhöht sich die Schwierigkeit mit mehreren Effekten die sich wechselseitig beeinflussen. Dies entzieht sich gewöhnlich der Berechnung und muss entsprechend der praxisrelevanten Erfahrung abgeschätzt werden. Danach sollte ein Tauglichkeitsnachweis in Betriebsversuchen erfolgen.

Das oben dargestellte Beispiel zeigt einen Fall, bei dem sich der Verschleiß durch die Kombination einer scheinbar harmlosen erosiven Belastung durch gleichzeitige Oxidation gefährlich verstärkt.

## Beeinflussung des Verlaufs von Schädigungen durch verschiedene Effekte.



**Bild 5.1-1**

**Bild 5.1-1** (Lit. 5.1-1): Unter der **Inkubationszeit** versteht man, ähnlich wie bei natürlichen Vorgängen (z.B. in der Medizin und Biologie), die Zeitspanne ab dem Einwirken eines Einflusses bis zu dessen charakteristisch schädigender Wirkung (Kapitel 5.9.1). Während der Inkubationszeit erfolgen bereits schädigende Veränderungen, die jedoch das makroskopische äußere Verhalten scheinbar nicht schädigend verändern. Typische Schadensmechanismen mit ausgeprägter Inkubationszeit können Schwingermüdung, Erosions- und Korrosionsvorgänge sein.

Bei Schwingermüdung von Metallen laufen im Mikrobereich des Gefüges Veränderungen wie Verfestigung, Entfestigung oder Rissentstehung ab, die am Ende der Inkubationszeit zu makroskopischem Risswachstum führen.

Bei Erosionsvorgängen können während der Inkubationszeit Zerrüttungsvorgänge auftreten oder Erosionspartikel in der Oberfläche stecken bleiben. Diese Vorgänge können den Abtrag als Erosionseffekt begrenzte Zeit deutlich verringern. Man kennt sogar den Effekt, dass zu Beginn der Erosion die stecken gebliebenen Erosionspartikel eine Gewichtszunahme der beanspruchten Probe bedingen (Bild 5.5.1.1-5).

Bei Korrosionsvorgängen werden während der Inkubationszeit häufig schützende Oxidschichten gebildet. Die Inkubation endet dann, wenn das Medium direkt auf das Grundmaterial schädigend einwirken kann.

Die Inkubationszeit wird in der Technik genutzt, um bei lebensdauerbegrenzten Komponenten akzeptable Lebensdauern bzw. Ausfallsicherheiten zu erzielen. Ein Beispiel ist der Lebensdaueranteil der Inkubationszeit bei LCF-beanspruchten Bauteilen.

**Der Schwellenwert** (engl. threshold, Bild 4.3-3) bezeichnet einen Grenzwert, hier eines schädigenden Einflusses. Bei Überschreitung wird dieser schadenswirksam. Schadensmechanismen eines oder mehrerer schädigender Einflüsse mit jeweiligen Schwellenwerten sind recht häufig. Bei Ermüdungsvorgängen ist die Dauerfestigkeit ein dynamischer Belastungsschwellenwert. Erst oberhalb dieser Belastung ist mit einem Schwingbruch zu rechnen. Ähnliche Schwellenwerte kann man auch bei Bauteilen mit inneren und äußeren Kerben (innen: z.B. Mikrorisse, Lunker, Fehlstellen; außen: z.B. Riefen, Gefügeveränderungen) bezüglich einer bestimmten Spannungskonzentration (siehe Bild 4.3-3) beobachten.

Ein geradezu klassisches Beispiel für das Schwellenwertverhalten ist die Spannungsrissskorrosion (SpRK, engl SCC, siehe Kapitel 5.6.3). Die typische Rissbildung erfolgt erst, wenn bei einem für das Korrosionsmedium empfindlichen Werkstoffzustand ein bestimmtes Zugspannungsniveau überschritten wird. Bei Erosionsvorgängen kann ein Schwellenwert durch die Härte der erosionsbeanspruchten Oberfläche im Vergleich zur Härte der Erosionspartikel bedingt sein (Bild 5.5.1.1-2).

Das „Schwellenwertverhalten“ ist von größter Bedeutung für die Technik. Die Auslegung dauerfester Bauteile, die Einschätzung der Zuverlässigkeit bestimmter (unvermeidlicher) technologiecharakteristischer Fehler und Schwachstellen bei Auslegung und Risikoabschätzungen nutzt diesen Effekt.

Wie nach der Inkubationszeit der zeitliche Schadensverlauf erfolgt, kann von verschiedenen Parametern abhängen, die nicht unbedingt die gleichen wie diejenigen sein müssen, die den Schwellenwert bestimmen.

Handelt es sich im Schadensverlauf z.B. nicht um Korrosion, sondern um zyklisches Risswachstum durch eine Schwingbeanspruchung, so sind wahrscheinlich andere Gefügebesonderheiten ausschlaggebend.

## **Bild 5.1-2:**

**Bild oben** (Lit. 5.1-1 und Lit. 5.1-2): Der Abtrag an einer Heiteiloberflche kann durch die Kombination von Erosion und Oxidation stark beschleunigt werden. Spröde Oxidationsschichten sind für steile Aufprallwinkel (Bild 5.5.1.1-1), wie sie an der Eintrittskante der Schaufelbltter zu erwarten sind, besonders erosionsempfindlich. Der Erosionsabtrag der schtzenden Oxidschichten legt reaktive frische Metalloberflächen frei, die entsprechend heftig oxidieren.

Eine ähnliche Erscheinung tritt dann auf (Lit 5.1-5) wenn **Staubpartikel** in der Brennkammer **aufgeschmolzen** werden und auf den vergleichsweise kalten gekühlten Oberflächen der Heiteile, insbesondere den Schaufelblttern, beim Auftreffen **festkleben** (engl. glassing, Lit. 5.1-6).

Die Staubschmelzen können sich mit den relativ rauen Oxidschichten verklammern und/oder mit diesen reagieren. Damit entsteht eine festhaftende Verbindung. Auf diese Weise kann besonders der **Durchtrittsquerschnitt an Leitapparaten** (nozzle) **der Hochdruckturbinen** so zugesetzt werden, dass das Triebwerk bei Leistungserhöhung leicht ins Pumpen gerät (Lit. 5.1-6).

Beim Abstellen des Triebwerks erstarren diese Schichten zu spröden Belägen unter Rissbildung und platzen mit den schtzenden Oxidschichten ganz oder teilweise ab (Lit. 5.1-7).

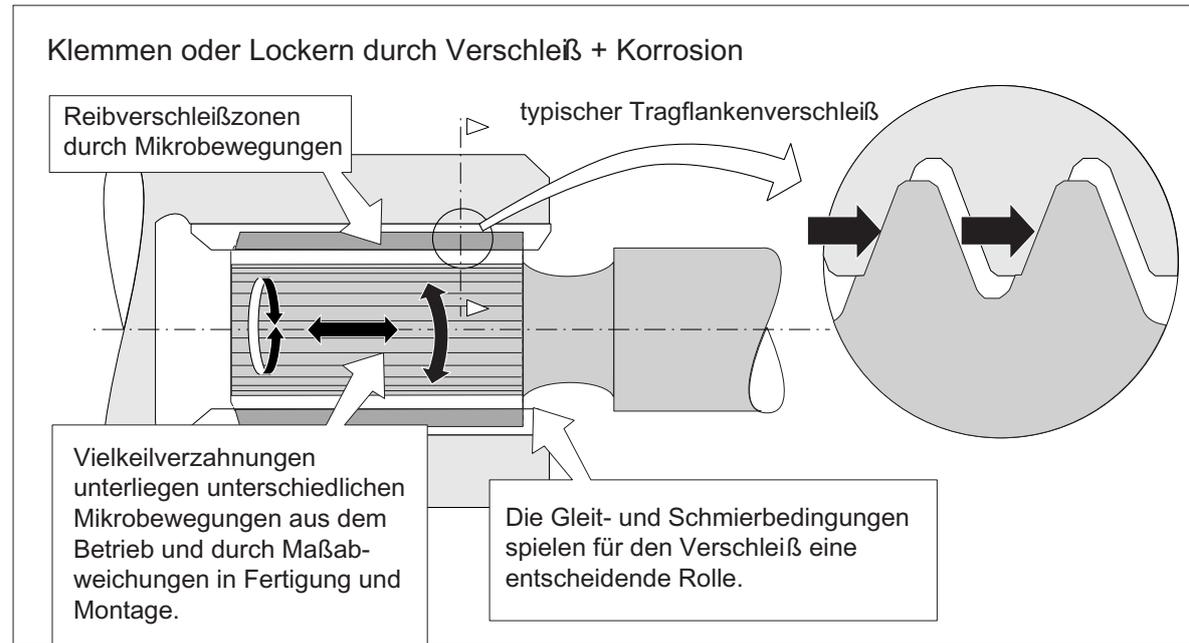
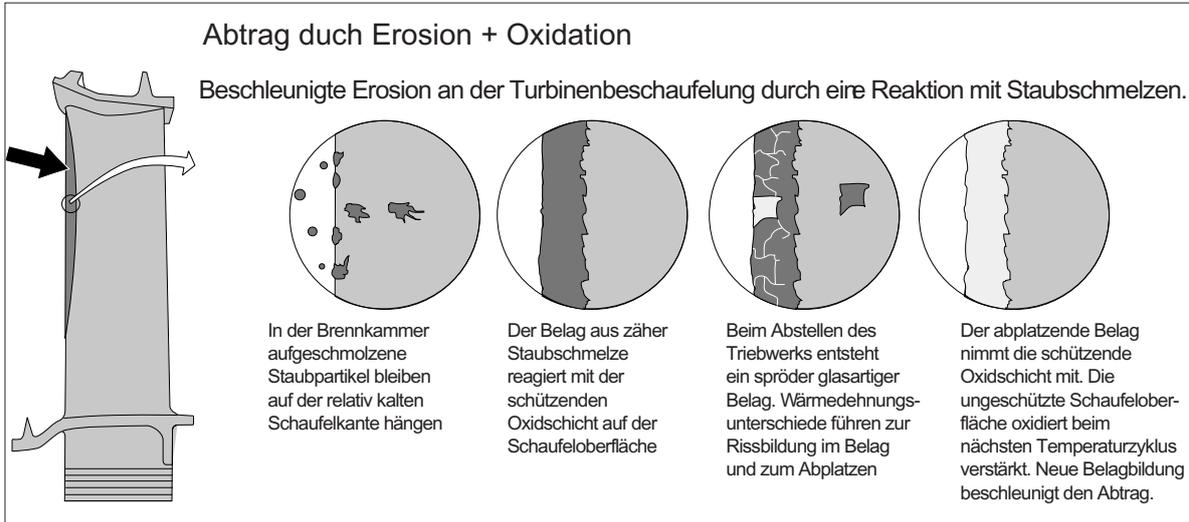
Beim erneuten Betrieb oxidieren die frischen metallischen Flächen besonders stark und der Vorgang wiederholt sich bei erneutem Staubeintritt in das Triebwerk.

**Bild unten:** Lsbare **Wellenkupplungen** in Form von **Steckverzahnungen** werden häufig in Triebwerken verwendet. Die Verzahnungen sind gewöhnlich nicht sehr hoch belastet, weisen relativ lose Schiebesitze auf und sind schlecht geschmiert. Steckverzahnungen werden an Hauptwellen und Hilfsgeräten angewandt (Skizze oben „1“ bis „6“).

Gesteckte Wellenverbindungen sind äußerst zuverlässig wenn zumindest die folgenden Bedin-

# Betriebsbelastung und Werkstoffverhalten: Wechselseitige Beeinflussung von Effekten

Mehrere Einflüsse können sich unerwartet wechselseitig beeinflussen, abschwächen oder verstärken.



**Bild 5.1-2**

gungen gewährleistet werden um unzulässigen Fretting-Verschleiß zu vermeiden:

**Zulassungsphase vorhandene Lecköl als Schmiermittel fehlt.**

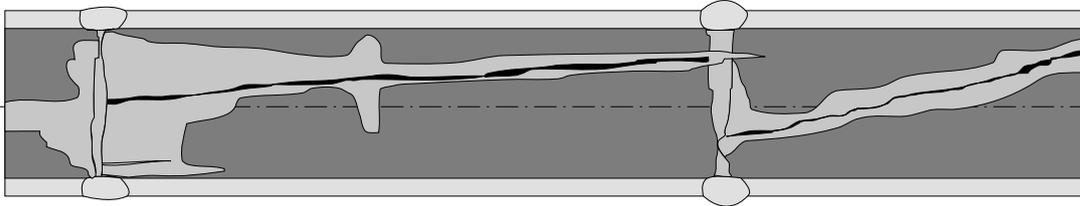
- geeignete Werkstoffkombination (Tribosystem)

- begrenzte Schwingungen (z.B. Torsionschwingungen)

- ausreichende Schmierung. **Besonders gefährlich ist es, wenn es gelingt Steckwellen so abzudichten, dass das in der Entwicklungs- und**

- ausreichendes Fluchten der rotierenden Komponenten

## Kavitationserosion auf der Innenseite der Entlastungs- leitung einer Speisewasserpumpe



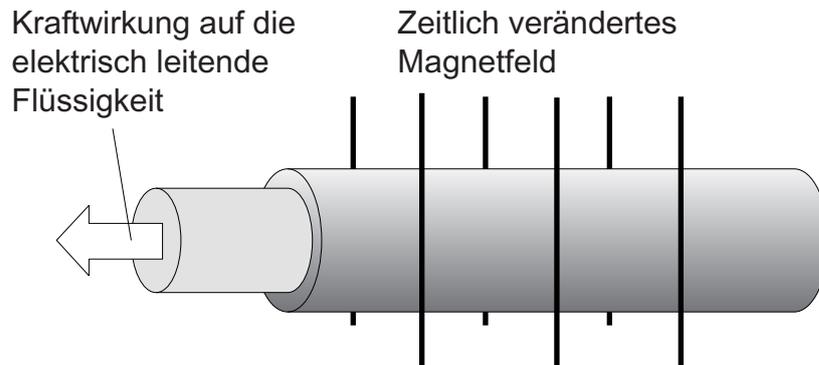
**Bild 5.1-3**

- abgestimmte Steifigkeiten, um Relativbewegungen in der Verzahnung zu minimieren
- keine Überlastungen im Betrieb (z.B. durch Stoßbeanspruchung), bzw. richtige, betriebsnahe Auslegung.

Sind einzelne dieser Bedingungen nicht gegeben, ist Verschleiß in der Verzahnung zu erwarten. Oberflächenbehandlungen wie Einsatzhärten, Nitrieren oder Verchromen sind offenbar kein ausreichend sicherer Schutz. Dagegen haben zumindest im Einzelfall Vakuumbeschichtungen wie Sputtern oder Ionen-Plattieren deutliche Lebensdauerverlängerungen gebracht (Lit. 5.1-8). Ein Verschleißschaden wird häufig erst dann erkannt, wenn die Kuppelung außer Eingriff gerät (Bild 5.9.3-1, Lit. 5.1-9 und Lit. 5.1-10).

**Bild 5.1-3 (Lit. 5.1-4):** Beeinflussen sich zwei Schadensmechanismen gegenseitig, ist diese Auswirkung theoretisch, wenn überhaupt nur schwer, für die Auslegung ausreichend verlässlich abzuschätzen. Ein typisches Beispiel ist die Kavitationserosion. Dabei trägt die Erosion schützende Reaktionsschichten (z.B. Oxide) ab. Mit den frischen, hochreaktiven Metallflächen kann das Strömungsmedium nun stark reagieren. Dieses 'Spiel' wiederholt sich und es kommt zu einer hohen Abtragsgeschwindigkeit.

## 5.1.1 Wechselwirkung elektrisch leitender Flüssigkeiten mit Magnetfeldern und elektrischen Feldern.



Effekte der **Magnetofluiddynamik** bzw. **Magnetohydrodynamik** an Maschinenelementen dürften mit der Anwendung elektrischer Antriebe in Fahrzeugen, der Erzeugung regenerativer elektrischer Energie (Windenergie, Solarthermie) und statt Hydraulik in Aktuatoren, steigende Bedeutung erlangen. Beispielsweise ist denkbar, dass die Schmierung von Wälzlagern oder die Auswirkungen größerer Schwitzwassermengen in Meeresatmosphäre schädigend wirken. Es ist also von Vorteil, wenn solche dem Maschinenbauer eher fremde Zusammenhänge, bewusst sind.

Hier wird lediglich auf potenzielle Auswirkungen auf **leitende Flüssigkeiten** aufmerksam gemacht. Es kann sich sowohl um gut leitende Flüssigkeiten wie **Metallschmelzen** als auch relativ schlecht leitende wie Salzwasser und andere **Elektrolyte** handeln. Solche niedrigen Leitfähigkeiten sind beispielsweise von Verschmutzungen durch Salze zu erwarten. Bei Problemen in entsprechenden Systemen sind zu berücksichtigen:

- Kraft: Bewegung von Flüssigkeiten, Rühren, Fördern, Verzögern insbesondere von Metallschmelzen. Wirkung der beeinflussten Strömung : z.B. Erosion auf Anschmelzungen von Rohrleitungen und Gefäßen. Erosion von schützenden Reaktionsschichten und/oder ein intensiverer Elektrolytaustausch kann sich beschleunigend auf Korrosion auswirken. Auch galvanische Vorgänge wie in der Fertigungstechnik können unterstützt oder beeinträchtigt werden.
- Aufheizung.
- Strömungsbeeinflussung (turbulent in laminar).
- Durchfluss an Spalten und Öffnungen.
- Rückwirkung der Flüssigkeit auf die Felder (Strömungssonden).
- Misch-/Entmischvorgänge.

In konkreten Fällen wird geraten, für eine Einschätzung der Relevanz in die Fachliteratur einzusteigen.

## Literatur zu Kapitel 5.1

- 5.1-1** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 1, ISBN 3-00-005842-7, 2000, Seite 6.2-37.
- 5.1-2** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 2, ISBN 3-00-008429-0, 2001, Seite 3.2-22 und 4.5-15.
- 5.1-3** C.Karcher, „Arbeitsgruppe Angewandte Thermo- und Fluidodynamik“, [www.maschinenbau.tu-ilmenau.de](http://www.maschinenbau.tu-ilmenau.de), 4.10.2004, Seite 1-10.
- 5.1-4** E.J.Pohl, R.Bark, „Wege zur Schadenverhütung im Maschinenbau“, Allianz Versicherungs-AG, München und Berlin, 1964, Seite 86.
- 5.1-5** P.König, T. Miller, A. Roßmann, „Damage of High Temperature Components by Dust-Laden Air“, AGARD-CP-558, Conference „Erosion, Corrosion and Foreign Object Damage Effects in Gas Turbines“, April 1994, Seiten 25-1 bis 25-12.
- 5.1-6** V.R. Edwards, P.L. Rouse, „U.S. Army Rotorcraft Turboshaft Engines Sand & Dust Erosion Considerations“, AGARD-CP-558, Proceedings der Konferenz „Erosion, Corrosion and Foreign Object Damage Effects in Gas Turbines“, Propulsion and Energetics Panel Symposium, Rotterdam, The Netherlands, 25-28 April 1994, Kapitel 3, Seite 5.
- 5.1-7** R.A.LeyesII, W.A.Fleming „The History of North American Small Gas Turbine Aircraft Engines“, AIAA, ISBN 1-56347-332-1, 199. Seite 551.
- 5.1-8** R.L. Johnson, R.C. Bill, „Fretting in Aircraft Turbine Engines“, Conference Proceedings AGARD-CP-161 „Specialists Meeting on Fretting in Aircraft Systems“, Seite 5-1 bis 5-4.
- 5.1-9** S.R. Lamb, G. Clark, „Engine Accessory Angle Drive Gear Failure“, „Handbook of Case Histories in Failure Analysis“, Kapitel: Transportation Components 17, ASM international.
- 5.1-10** R.L.Jonson, R.C. Bill, U.S.Army, „Fretting in Aircraft Turbine Engines“, AGARD-CP-161, Oct. 1974, Seite 5-1 bis 5-13.