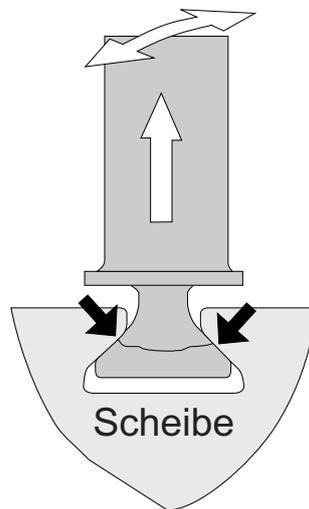


6. Schwingverschleiß (fretting)

6.1 Grundlagen der Schwingverschleißschädigung

6.2. Schäden durch Schwingverschleiß

6.3 Abhilfen gegen Schwingverschleißschäden



Schwingverschleiß umfasst weitere Begriffe wie, Reibkorrosion, Reibrost, Edelrost, Druckrost, Passungsrost, Passflächenkorrosion, Tribokorrosion, im Englischen fretting, fretting-corrosion, wear oxidation, contact erosion, false brinelling, formation of cocoa, im Französischen corrosion du frettage .

Unter Schwingverschleiß wird im Folgenden ein Reibverschleiß verstanden, der zwischen oszillierenden Kontaktflächen auftritt. Damit kann Schwingverschleiß sowohl mechanischen Verschleiß (Geometrie- bzw. Volumenverschleiß) als auch chemische Reaktionen mit den Umgebungsmedien (Korrosion, Oxidation) und Werkstoffschädigungen auslösen. Diese Schädigungen können die örtliche Festigkeit in der Verschleißzone, insbesondere die Schwingfestigkeit deutlich absenken. Der Begriff „Reibrost“ wird gewöhnlich dann gebraucht, wenn es sich zumindest bei einem Reibpartner um eine Eisenbasislegierung handelt. Schwingverschleiß tritt jedoch bei jeder Werkstoffkombination auf, insbesondere auch bei den metallischen Werkstoffen des Triebwerksbaus wobei z.B. Titanlegierungen einen besonders starken Abfall der Schwingfestigkeit zeigen.

Schwingverschleiß unterscheidet sich in seinem Mechanismus häufig erheblich vom Gleitverschleiß mit einsinniger Bewegung (Bild 6.1-2). Schlüsse aus den Erscheinungen beider Verschleißarten sind daher nicht als jeweils für die andere Verschleißart gültig anzusehen. Insbesondere sind Korrosions- und Oxidationseinflüsse beim Schwingverschleiß besonders ausgeprägt.

Gerade bei Flugtriebwerken sind viele Komponenten (Bild 6.1-1) von Schwingverschleiß betroffen. Dies liegt in erster Linie an den konstruktiven Besonderheiten, die, bei möglichst niedrigem Gewicht, höchste Übertragungsleistungen bzw. -kräfte gewährleisten müssen. Dadurch kommt es zu hohen elastischen Verformungen, die, bei unterschiedlichen Elastizitäten der lösbar gefügten Komponenten, zu Relativbewegungen der Kontaktflächen führen. Die hohe dynamische Belastung der nicht selten filigranen elastischen Komponenten und/oder zeitliche Temperaturänderungen mit großen Gradienten begünstigen dynamische Relativbewegungen. Hierzu tragen die den jeweiligen Betriebsbeanspruchungen optimal angepassten unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften wie Elastizitätsmodul und Wärmedehnverhalten der Komponenten bei.

Bild 6.1-1: *Triebwerke weisen eine Vielzahl von Komponenten mit merklicher Frettingbeanspruchung auf. Hierzu gehören:*

Rotorschaukel Füße und Scheibennuten
(Bild 6.2-1):

Dehnungen unter Fliehkraft, Temperaturänderungen und Schwingungen führen an den Auflageflächen statisch hoch belasteter Schaukel Füße (Fliehkraft, Gasbiegekräft) zu Fretting-schädigungen und Schaukelbrüchen.

Steckverzahnungen (Vielkeilverzahnungen, Bild 6.2-19):

Diese drehmomentübertragenden Wellenverbindungen unterliegen auf Grund von Fluchtfehlern, Wellenschwingungen, Fertigungsabweichungen häufig schädigenden Relativbewegungen der Anlageflächen, im Extremfall mit der Gefahr eines „Durchdrehens“ der Wellenverbindung.

Durchführungen, flächige Steckverbindungen (Bild 6.2-11):

Besonders im Brennkammerbereich sind Führungs- und Anlageflächen von dünnwandigen Gasführungen bzw. der Brennkammer selbst durch den Verbrennungsvorgang merklichen Schwingbeanspruchungen unterworfen. Hinzu kommen große Wärmedehnungsänderungen. Dies kann zusammen mit Oxidation zu erheblichen, insbesondere abtragenden Verschleißproblemen führen.

Fixierungsverbindungen durch Bolzen oder Haltenasen sowie Führungen z.B. bei Einspritzdüsen sind ebenfalls schwingverschleißgefährdet.

Axiale Fixierungen von Rotorschaukeln:

Rotorschaukeln sind durch die Gaskräfte merklichen Axialkräften unterworfen die zum Wandern schwingender Schaukeln auch unter Fliehkraft führen können. Die Schaukeln liegen dann an den axialen Fixierungen (z.B. Zwischenringen/Spacer bzw. Labyrinthträgern) an und können dort Verschleißkerben erzeugen, von denen Schwingbrüche in die Ringe ausgehen.

Dämpfer und Anlageflächen:

Besonders bei Turbinenrotorschaukeln werden glockenförmige („Cowbell“) Elemente verwendet, die von innen unter Fliehkraft an den Fußplattformen anliegen und schwingende Schaukeln durch Reibung dämpfen. Diese funktionsbedingte Frettingbeanspruchung muss über die vorgesehene Lebensdauer sicher beherrscht werden.

Das gleiche gilt auch für abstützende Anlageflächen wie Clappernasen an größeren Verdichterrotorschaukeln (meist im Fan) oder Deckbändern an Turbinenrotorschaukeln, die oft noch gegeneinander verspannt sind.

Leitschaukel Füße und Gehäuse (Bild 6.2-8):

Leitschaukeln im Verdichter oder der Turbine sind gewöhnlich im Gehäuse lösbar fixiert. Gegen Rotation unter den Gaslasten werden Fixierungen in Form von Haltenasen oder Fixierelementen (z.B. Stifte oder Nieten) angewendet. Alle Kontaktflächen unterliegen auf Grund von Schwingungen des Gehäuses und/oder der Schaukeln und Wärmedehnungen merklichem Frettingverschleiß, was zu unzulässigen Querschnittsschwächungen, zum Ausbrechen oder dem „Wandern“ der Schaukeln führen kann.

Typische Frettingzonen eines Triebwerks

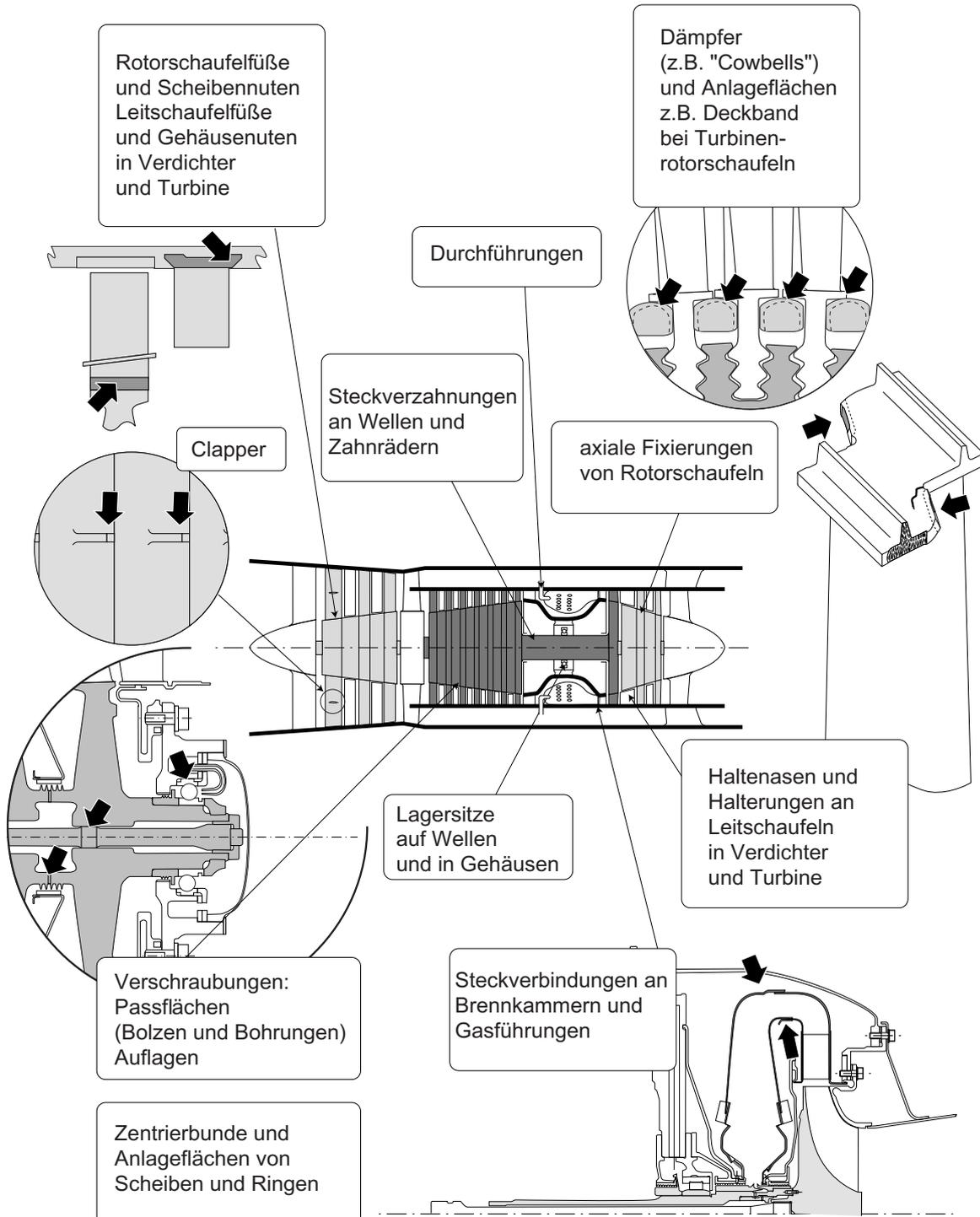
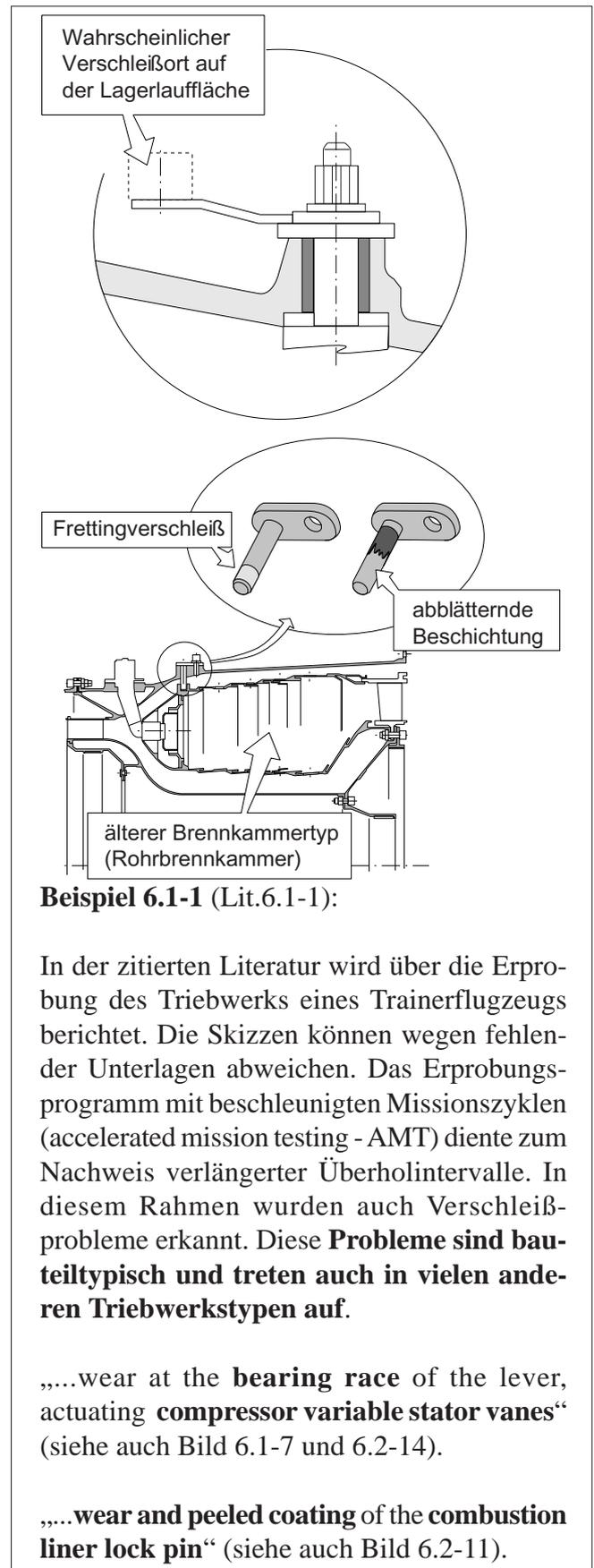


Bild 6.1-1

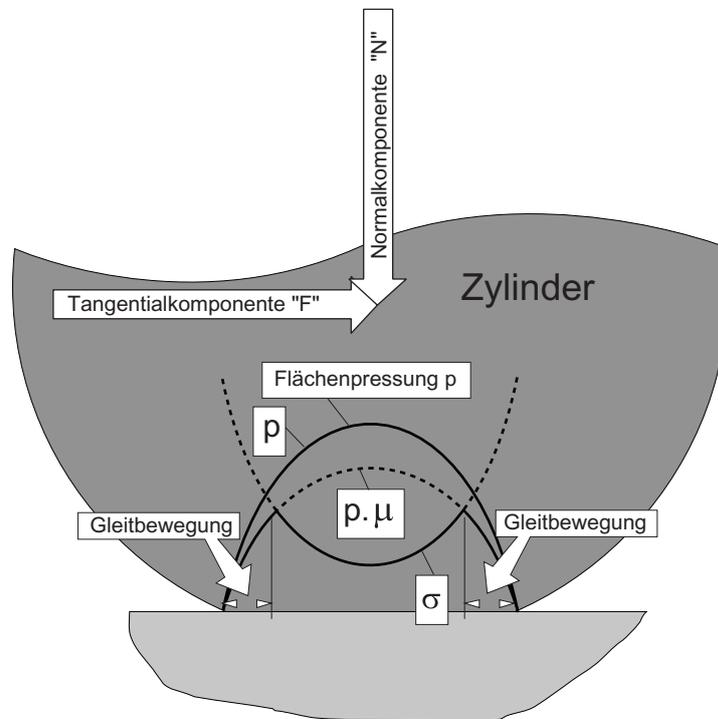
Verschraubungen, Passflächen, Zentrierbunde, Anlageflächen, Bolzenbohrungen:

Durch die Dehnungszyklen unter Drehzahl und Temperaturänderungen (insbesondere beim Start/Abstell Vorgang) und Schwingungen (z.B. Biegeschwingung des Rotors) kann es in hochbeanspruchten Zonen von Rotorbauteilen zum Abfall der Schwingfestigkeit und zu einer deutlichen Verkürzung der Lebensdauer kommen.



Schwingverschleiß (Fretting) Grundlagen

6.1 Grundlagen der Schwingverschleißschädigung.



Verschleißarten und typische Schädigungen:

Eine Schädigung durch Schwingverschleiß kann auf Grund spezifischer Verschleißmechanismen in sehr unterschiedlichen Formen auftreten (Bild 6.1-2).

- Abtrag (Bild 6.1-5) durch Abrasion, Oxidation bzw. Korrosion
- Abfall der Schwingfestigkeit (Bild 6.1-8) durch Ermüdungsschädigung mit Schwingrißbildung
- Ermüdungsausbrüche (Ermüdungspittings) an Wälzflächen
- Mikro- und Makroverschweißung gegeneinander oszillierender Flächen

Besonders bei Stählen (Bild 6.1-3) bedarf es besonderer Erfahrung und Fachkenntnis, die Größe der schadensbeeinflussenden Verschleißparameter aus dem Verschleißbild richtig abzuschätzen.

Der zeitabhängige Verlauf des Abtrags ist charakteristisch für den Verschleißmechanismus (Bild 6.1-6)

Bild 6.1-2: Verschleißvorgänge an Kontaktflächen mit Relativbewegungen lassen sich nach unterschiedlichen Gesichtspunkten einteilen (siehe auch Lit. 6.1-2 und 6.1-3).

Einteilung der Verschleißarten nach der schädigenden Belastung:

Bei dieser Einteilung ist die Relativbewegung und der zeitliche Kraftverlauf kennzeichnend.

Gleitverschleiß :

Die Relativbewegung erfolgt gleichförmig, während eine konstante Kraft senkrecht und tangential zur Oberfläche wirkt. Der Verschleißmechanismus ist vorzugsweise abrasiv (siehe „abrasiver Verschleiß“).

Roll- oder Wälzverschleiß:

Der Abwälzvorgang erzeugt eine schwellend pulsierende Kraft mit vollkommener Entlastung bei jedem Zyklus, die senkrecht auf der Verschleißfläche steht. Eine merkliche, schädigende Relativbewegung der Kontaktflächen erfolgt nicht. Der Schadensmechanismus beruht in erster Linie auf Schwingermüdung des Werkstoffs mit Rissbildung und Ausbrüchen der Oberfläche (Grübchen, Ermüdungs-Pittings)

Stoßverschleiß:

Die Kontaktflächen weisen keine Makrorelativbewegung zueinander auf. Die elastischen Verformungen in den Kontaktzonen erzeugen jedoch Mikrorelativbewegungen. Die Richtung der schwellenden Belastung steht senkrecht auf den Kontaktflächen. Im Gegensatz zum Wälzverschleiß erfolgt bei jedem Zyklus keine vollkommene Entlastung. Der Verschleißmechanismus ist durch die Schwingermüdung des Werkstoffs und/oder durch Schwingverschleiß (Fretting, Reibrost, siehe auch „adhäsiver Verschleiß“) gekennzeichnet.

Einteilung der Verschleißvorgänge nach dem charakteristischen Schadensmechanismus:

Adhäsiver Verschleiß:

Die Schädigung erfolgt durch eine Mikroverschweißung der Kontaktflächen und erneutes Aufreißen. Die frischen Metalloberflächen sind sehr reaktiv und bilden Oxide und/oder Verbindungen mit den Umgebungsmedien wie Feuchtigkeit oder Schmiermittel. Man spricht dann auch von Reiboxidation. Die Richtung der pulsierenden Kräfte kann in einem beliebigen Winkel zur Kontaktfläche stehen. Dieser Verschleißvorgang kann auch bei „Stoßverschleiß“ wirksam werden.

Abrasiver Verschleiß:

Dieser Verschleißtyp erfolgt in erster Linie durch eine einsinnige Relativbewegung der Kontaktflächen zueinander. Er tritt bevorzugt bei „Gleitverschleiß“ auf. Dabei wirken Schneidvorgänge schädigend.

Ermüdungsverschleiß:

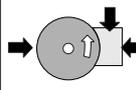
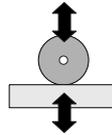
Der Schadensmechanismus entspricht dem Roll- oder Wälzverschleiß.

Verschleiß mit physikalischen Effekten und chemischen Reaktionen:

Durch die Erzeugung frischer Metalloberflächen und/oder hoher Reibtemperaturen können an den Kontaktflächen Diffusionsvorgänge und/oder chemische Reaktionen auftreten. Solche Reaktionen können den Verschleiß fördern. Durch Absenkung des Reibbeiwerts (Schmierwirkung), Härtesteigerung und/oder Verhinderung weiterer Mikroverschweißungen können Reaktionsprodukte auch verschleißschützend wirken.

Es kann der Eindruck entstehen: Die Fachbegriffe sind nahezu so komplex wie die Verschleißvorgänge selbst.

Belastungsspezifische Verschleißarten

Verschleißart	kennzeichnende Belastungsanordnung	Verschleißerscheinungen	Beispiele typischer Triebwerksteile mit Verschleiß	
			einsinnige Bewegung	Schwingverschleiß (Fretting)
Gleitverschleiß		<ul style="list-style-type: none"> -Riefen -Rattermarken -Kaltverschweißen (Fressen) -Glättung -Rißbildung -Überhitzung 	<ul style="list-style-type: none"> -Schaufelspitzen -Labyrinthspitzen -Einlaufbeläge -Schutzrohre flexibler Wellen und Betätigungskabel -Wälzlager (Skidding) 	<ul style="list-style-type: none"> -Schaufelfüße -Steckverbindungen an Gasführungen und Brennkammern -Steckverbindungen an Wellen -Schubdüsenverstellung -Schubumkehrerbetätigung
Rollverschleiß Wälzverschleiß mit und ohne Schlupf		<ul style="list-style-type: none"> -Grübchen (Pitting) -Riffelbildung -Fressen -Riefen -Rißbildung 	<ul style="list-style-type: none"> -Wälzlager -Zahnräder 	<ul style="list-style-type: none"> -Schubumkehrerlager -Lager von Verstellungen -Zahnräder von Verstellungen -Schubdüsenverstellung
Stoßverschleiß		<ul style="list-style-type: none"> -Grübchen -Eindrücke -Rißbildung -Reibrost 		<ul style="list-style-type: none"> -Schaufelfüße -Wälzlager (Brinelling) -Verriegelungen -Brennkammerhalterungen -Leitschaufelhalterungen -Bewegungsbegrenzer

alle Verschleißarten können bei oszillierenden Mikrobewegungen als Schwingverschleiß auftreten

Verschleißmechanismen

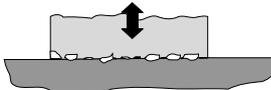
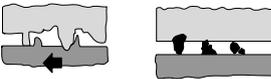
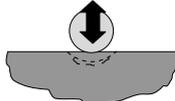
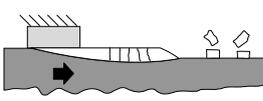
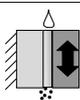
Verschleißmechanismen zwischen Berührungsflächen		Beispiele typischer verschleißbeanspruchter Triebwerkskomponenten
adhäsiver Verschleiß: -Haftverschleiß -Freßverschleiß (Kaltverschweißung)		<ul style="list-style-type: none"> -Anlageflächen von verspannten Wellen -Füße von Turbinen- und Verdichterschaufeln
abrasiver Verschleiß: -Furchungverschleiß -Kornverschleiß		<ul style="list-style-type: none"> -Lagersitze -Labyrinth -Gleitteile an Schubdüsen
Ermüdungverschleiß: Pittingverschleiß (Grübchenbildung)		<ul style="list-style-type: none"> Hämmerstellen an -Schaufeldeckbändern -Verriegelungen -Wälzlager (Brinelling)
Verschleiß mit -Diffusionsschichten -Anlegierung -Gefügeveränderungen		<ul style="list-style-type: none"> -Spielvergrößerung an Lagerbuchsen -Gleitschichten an Zylindern -Axialkolbenkraftstoffpumpen
Verschleiß mit -chemischen Reaktionen (Öle und Schmiermittel)		<ul style="list-style-type: none"> - Vielkeilverbindungen an Wellen

Bild 6.1-2

Besonders bei Stählen tritt Reibkorrosion (fretting) in vielfältigen Erscheinungsformen auf.

Erscheinungsformen der Reibkorrosionsarten (nach Bartel)

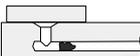
Bezeichnung	Schadensbild (schematisch)	Zustand
Graufleckigkeit durch Mikrogrübchen. Flächen unterschiedlicher Größe		trocken
Welligkeit (ondulations), teilweise metallisch blank, glatt		Öle/Fette
Grübchenbildung durch örtliche Anhäufung von Abrieb, Verdichtungszone		trocken, Öle/Fette
Aufrauhungen in Form regelmäßiger Verwalkungen. Plastische Verformungen mit Ansammlungen von Abreibpulver		trocken, Öle/Fette
turmartiges Aufwachsen einzelner stark verfestigter Kontaktpunkte von pastösem Abrieb		Öle/Fette
nickelartig aussehende Kneifstellen bei Sauerstoffarmut		trocken
Bruch von Maschinenteilen über fortschreitende Rißbildung		Öle/Fette
Kratzer /Freßstellen (engl. scuffing)		Öle/Fette
Lackschichtenentstehung, dünn gelb bis gelbbraun, Verlust der Maßhaltigkeit. Schwergängig (Quellung), Blockierung		Öle/Fette
Fresser, Heißläufer und Totalschaden durch Verstopfen ölführender Zonen infolge Passungsrost		Öle/Fette

Bild 6.1-3

Bild 6.1-3: Erscheinungsformen der Reibkorrosion (Lit 6.1-3) bei ferritischen und martensitischen **Stählen**. Unter **Einwirkung von Ölen, Schmierfetten und Gleitschichten** liegen Bedingungen für Mischreibung vor. Einige der dargestellten Effekte treten auch bei anderen metallischen Werkstoffkombinationen auf. Eine wichtige Rolle spielen Reaktionen mit den **Umgebungsmedien** wie der Atmosphäre, Ölen und Fetten. Werkstoffe die korrosionsfeste Reaktionsschichten bilden (z.B. **Ti-Legierungen**) neigen eher zu Freßstellen, Mikrogrübchen, Rissbildung und Welligkeit. Einen wichtigen Einfluß haben die **Abriebprodukte** (Bild 6.1-4). Sie verändern das Aussehen des Schadens und führen damit leicht zu **Fehldeutungen** (z.B. Verwechslung mit Anlauffarben).

Damit werden falsche Rückschlüsse auf die Betriebstemperaturen begünstigt. Von besonderer Bedeutung ist, dass Abrieb die Verschleißbedingungen mit der Zeit verändert. Häufig führt die **Volumenzunahme** der Reaktionsprodukte des Abriebs zum **Klemmen** oder gar dem Sprengen von Passungen (Passungsrost) und Steckverbindungen. Typisch ist z.B. ein **Festsitzen von Gleitflächen** (Bild 6.2-13) bei MoS₂-haltigen Gleitlacken in Meeresatmosphäre (Salzwasser). Können die Reaktionsprodukte aus dem Verschleißbereich treten (z.B. durch auswaschen oder austauben) kommt es zur **Lockerung von Festsitzen** (z.B. bei Wälzlagerinnenringen und Kugelgelenken, Bild 6.1-7).

Schema der Vorgänge beim Schwingungsreibverschleiß (Fretting)

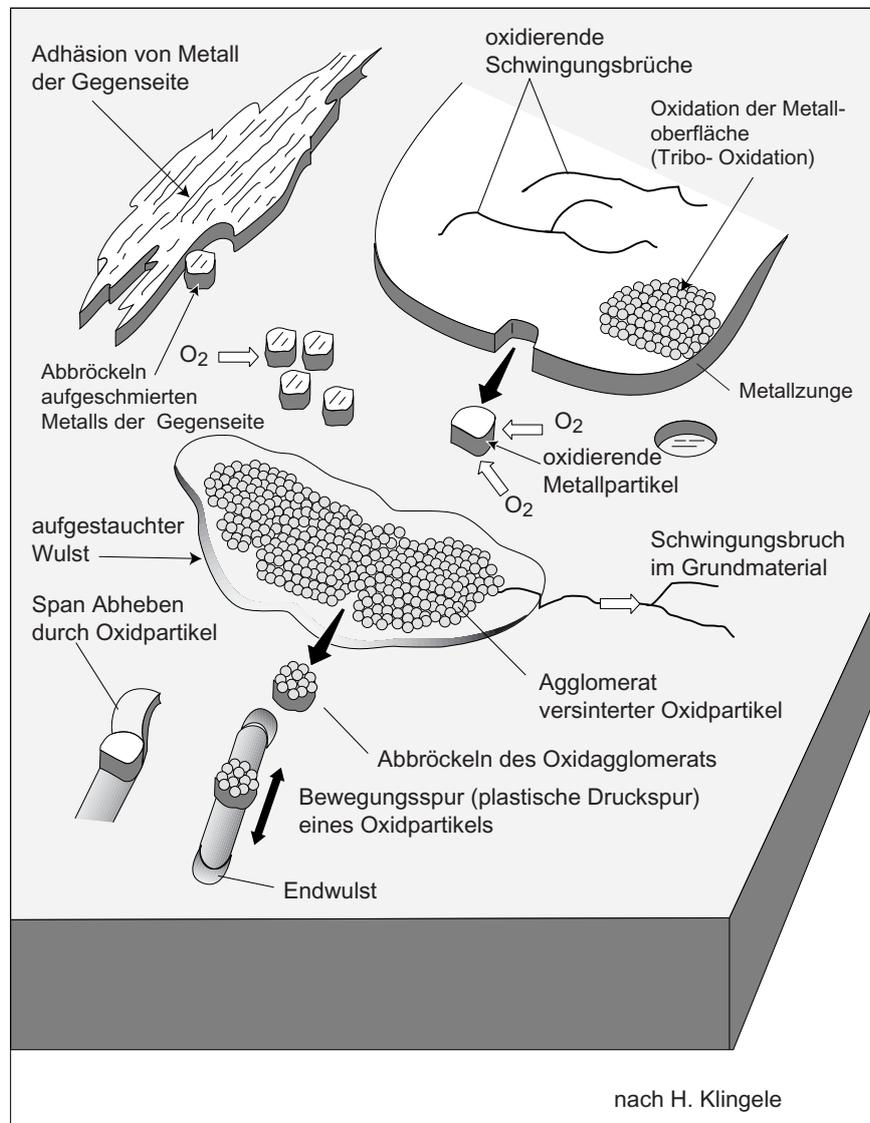


Bild 6.1-4

nach H. Klingele

Bild 6.1-4 (Lit 6.1-15): H.Klingele hat in diesem Bild den typischen **Mechanismus von „Schwingverschleiß“** (Fretting) dargestellt. Anfangs entstehen im Mikrobereich unter der oszillierenden Relativbewegung der Kontaktflächen **Verschleißpartikel** durch Abrasion, Schwingerermüdung und Materialübertrag (Kaltverschweißung/ „Fressen“). Bei der örtlichen Zerstörung von Deckschichten bilden sich zusätzlich feinste Oxidpartikel. Die Oxidation der frisch entstandenen metallischen

Oberflächen wird durch die Reibungswärme unterstützt. Frische Metalloberflächen dieser Partikel reagieren sofort mit den Umgebungsmedien wie **Feuchtigkeit, Schmiermittel und Luft**. Partikel bzw. Reaktionsprodukte werden im Kontaktspalt zerrieben und verändern sich dabei weiter durch chemische Reaktionen, versintern und verdichten. Sie werden in die Flächen eingedrückt und bestimmen bzw. **verändern den Tribokontakt**.

Typische Schadensbilder dieses Vorgangs zeigt Bild 6.1-3.

***Bild 6.1-5:** Um eine anschauliche Vorstellung über den **Verschleißabtrag** zu geben, wird dieser hier für typische technische Komponenten und Vorgänge in Abhängigkeit vom aufsummierten Verschleißweg angegeben. Verschleiß durch ausgeprägte Reibkorrosion liegt typischerweise im Bereich von 0,01-1mm Abtrag pro km Verschleißweg (siehe auch Lit. 6.1-2). Es sei jedoch daran erinnert, dass ein Verschleißweg bei **einsinniger Bewegung** nicht mit der aufsummierten Bewegung eines **oszillierenden Verschleißvorgangs** verwechselt werden darf. Bei gleichen Verschleißbewegungen ist es einsichtig, dass der Verschleißabtrag mit dem Gesamtverschleißweg ansteigt und so ein Vergleich möglich wird.*

Typische Verschleißraten für verschiedene Maschinenteile und Arbeitsvorgänge.

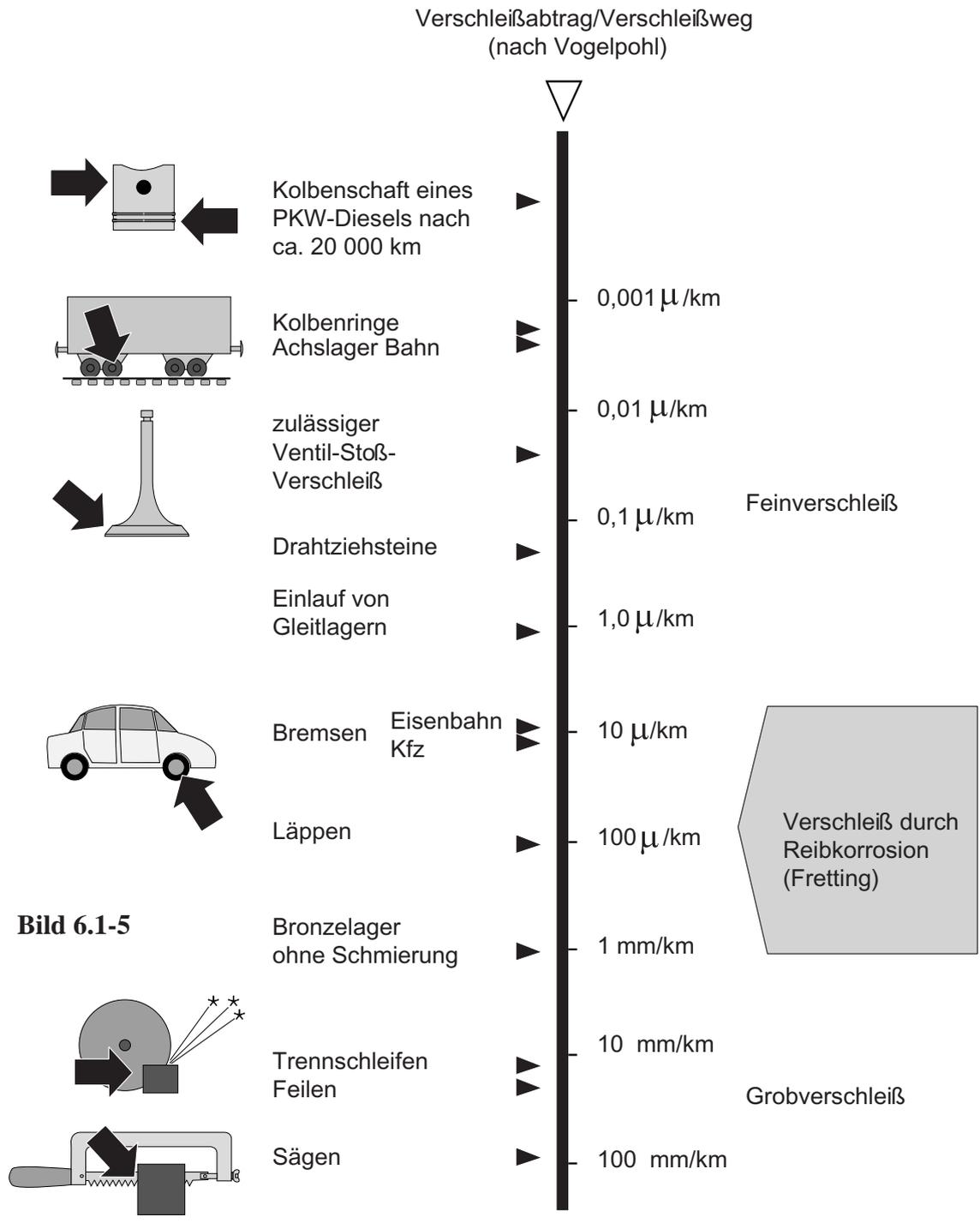


Bild 6.1-5

Verschleißmechanismen haben gewöhnlich charakteristische zeitliche Abläufe.

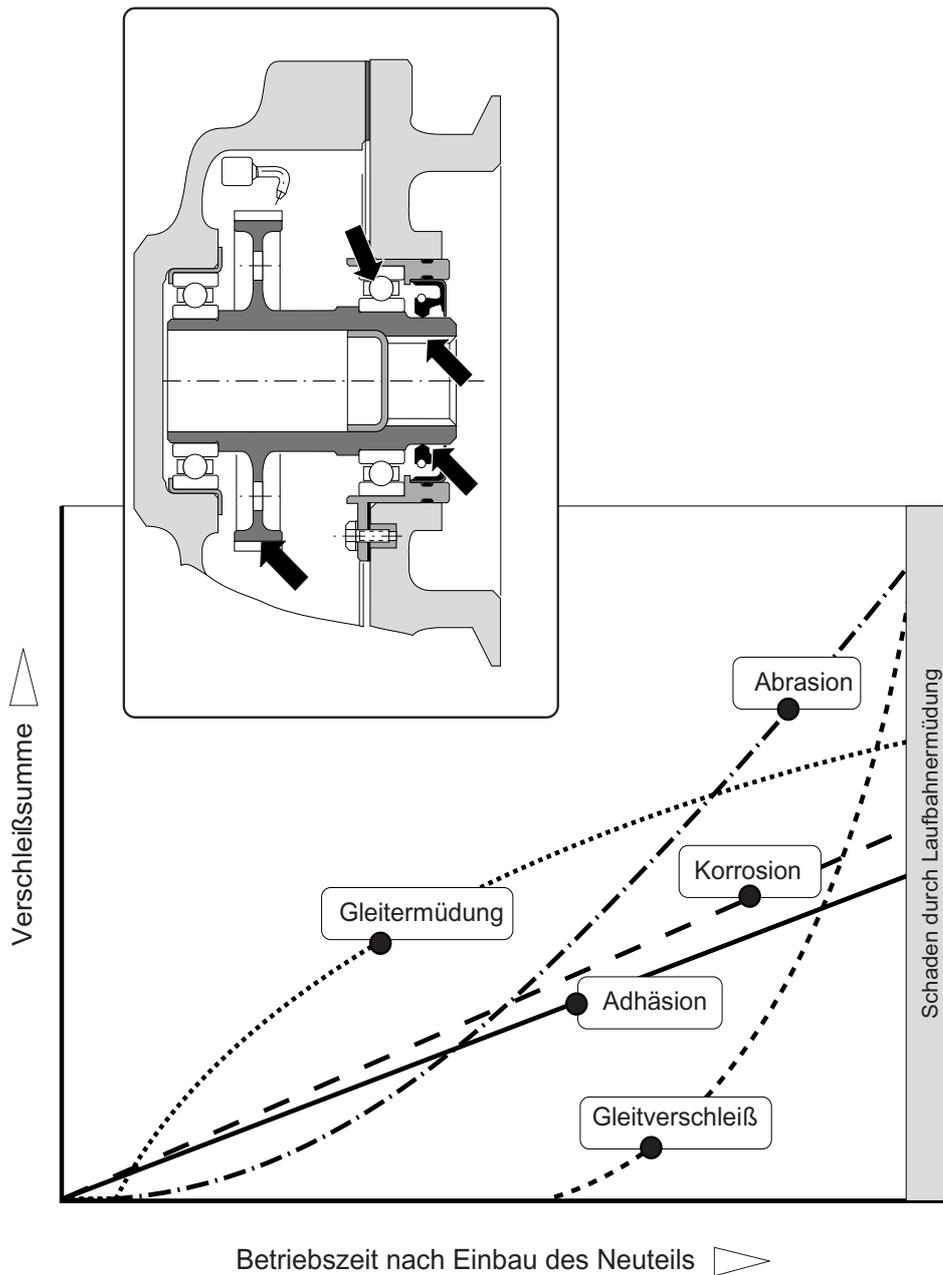


Bild 6.1-6 Schematischer zeitlicher Verschleißverlauf bei Bewegungskontakt unter verschiedenen Einflüssen (Relationen sind willkürlich).

Bild 6.1-6 (Lit 6.1-4): Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der Abriebmenge aus typischen Verschleißvorgängen **im Öl von Getrieben**. Solche Verläufe erhält man aus Ölanalysen. Sie sind für die **Abschätzung von Gesamt-, Restlebensdauern und Schadensrisiken** verschleißbeanspruchter Bauteile wichtig.

Die Verschleißmechanismen zeigen einen charakteristischen Abtrag über der Zeit. Die dargestellten Kurven stellen lediglich den qualitativen zeitlichen Verschleißverlauf dar. Die absolute Höhe des Verschleißes ist willkürlich. Umgekehrt kann der zeitliche Anstieg der Verschleißpartikelmenge im Öl zusammen mit einer Untersuchung der Partikel (z.B. Zusammensetzung und Struktur im REM) wichtige Hinweise auf den Verschleißmechanismus und das betroffene Bauteil geben.

Bei der, in der zitierten Literatur angegebenen **Gleitermüdung** (sliding fatigue wear) dürfte es sich um einen Verschleißvorgang handeln, bei dem Rauigkeitsspitzen durch Ermüdungsvorgänge abgetragen werden und damit der Abtrag mit der Zeit vermindert wird. Solche Verschleißvorgänge sind als Einlaufverschleiß bei Zahnrädern bekannt und treten als matte Bereiche außerhalb des Wälzkreises auf. Sie bedeuten in diesem Fall keine unzulässige Lebensdauerverkürzung.

In anderen Fällen kann Einlaufverschleiß auch als Hinweis auf ein Langzeitproblem dienen.

Abrasion und besonders **Gleitverschleiß** (siehe Bild 6.1-2) zeigen einen beschleunigten Schadensablauf. Diese Vorgänge führen zur Bildung abrasiver Verschleißprodukte oder zu geometrischen Veränderungen (z.B. Spielvergrößerung) die den Verschleißvorgang beschleunigen. Das bedeutet, dass das rechtzeitige Abfangen solcher Schäden nicht einfach ist.

Unter **korrosivem Verschleiß** dürfte es sich um einen Abtrag unter Korrosionsbedingungen handeln. So lange der korrosive Anteil überwiegt und keine schützenden (gegen weiteren korrosiven Angriff) oder schädigenden (z.B. stark abrasive) Reaktionsschichten entstehen, ist der lineare zeitliche Abtrag verständlich.

Adhäsiver Verschleiß (siehe Bild 6.1-2) wird hier mit einem linearen Abrieb, d.h. gleichbleibender Verschleißrate, dargestellt. Der Abrieb entsteht durch Kaltverschweißungen (Fressen) und aufreißen kleiner Bereiche der Zahnflanken. Ein derartiger Vorgang ist nur bei einer Überlastung (Durchbrechen des Ölfilms) oder bei Ölmangel zu erwarten.

Partikel aus **Wälzermüdung** (siehe Bild 6.1-2) an **Zahnradern** treten in Getriebeölen erfahrungsgemäß plötzlich auf. Sie können den bevorstehenden Ausfall des Bauteils ankündigen. Rechtzeitige Maßnahmen sind dann kaum mehr möglich.

Im Gegensatz dazu, wird meist bei der **Laufbahnermüdung von Getriebewälzlagern** ein Anstieg der Partikelmenge über längere Laufzeiten (abhängig von der Belastung) beobachtet. Dies ermöglicht eine rechtzeitige Schadenserkenkung.

Spielvergrößerung durch Verschleiß am Kugelgelenk einer Verdichterleitschaufelverstellung.

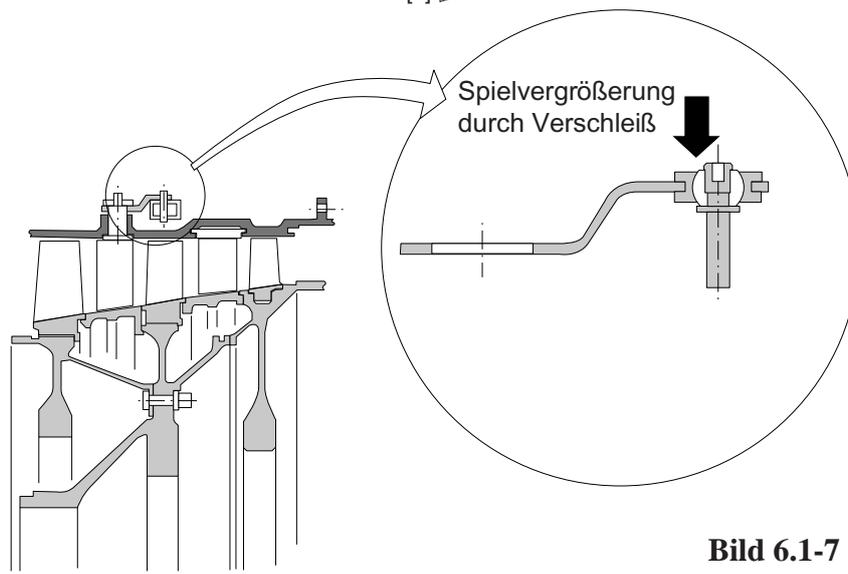
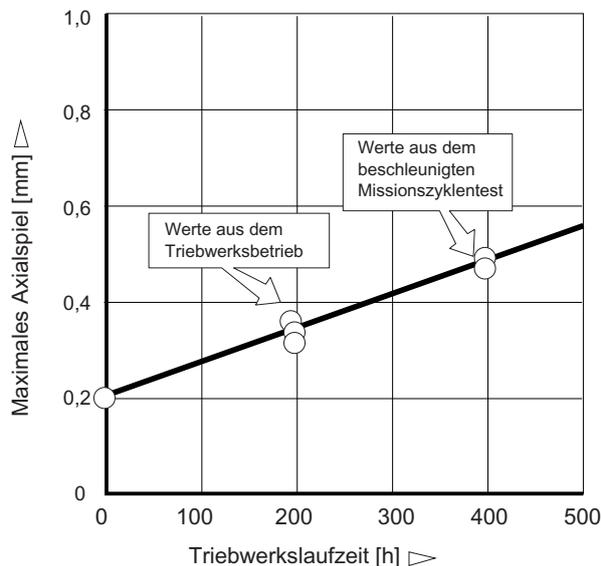


Bild 6.1-7

Bild 6.1-7 (Beispiel 6.1-1, Lit. 6.1-1): Dieses Bild zeigt die **Spielvergrößerung** (Bild 6.1-3) eines Kugelgelenks an einer Leitschaufel Verstellung im Verdichter. Solche Spielvergrößerungen sind ernst zu nehmen, weil bereits **kleine Winkelfehler in der Profilanstellung zu merklichen Störungen der Strömung und/oder Schwingungen der Schaufeln führen können**. Der Gesamttrieb (Abriebsumme = Spielvergrößerung) erfolgt linear (Diagramm oben) und lässt sich offenbar auch in Versuchs-

läufen ausreichend betriebsnah reproduzieren. Vergleicht man die Spielvergrößerung mit Bild 6.1-5 ist der lineare Verlauf typisch für einen Verschleißvorgang mit deutlichem Adhäsions- und **Korrosionseinfluss**. Für das betroffene Bauteil durchaus plausibel. Erfahrungsgemäß ist eine Dauerschmierung, insbesondere unter **Meeresatmosphäre** bei Leitschaufelverstellungen problematisch (siehe auch Band 1 Kapitel 5.4.1.2).

Die Schwingfestigkeit von Bauteilen kann unter Frettingeinfluß extrem abfallen. Besonders empfindlich sind Titanlegierungen.

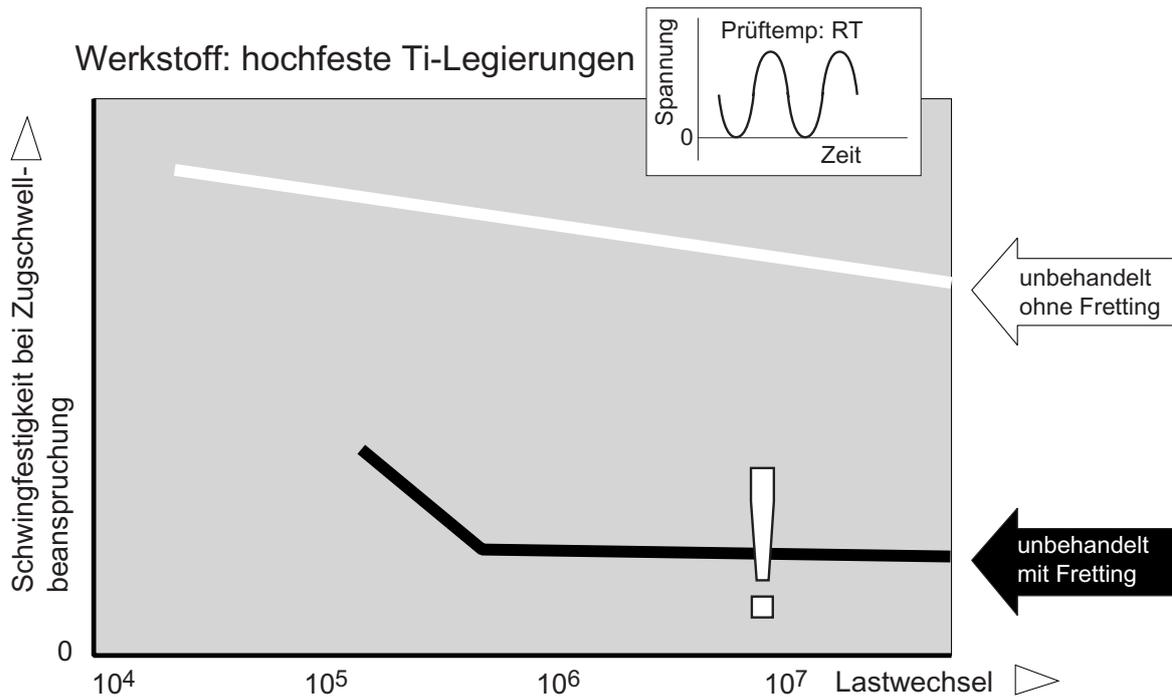


Bild 6.1-8

Bild 6.1-8: Eine wichtige und häufige Schädigung bei **Schwingverschleiß** (Fretting) ist der Abfall der Schwingfestigkeit. Von der geschädigten Oberfläche gehen **Schwinganrisse** bzw. **Schwingbrüche** aus.

Ermüdungsrisse bei **Wälzermüdung**, die zum Ausbrechen örtlicher Bereiche der Kontaktzonen (Ermüdungspittings, Ermüdungsgrübchen) führen, bilden sich dagegen üblicherweise **unterhalb der Oberfläche**.

Die metallischen Werkstoffe sind durchaus unterschiedlich empfindlich, was den Abfall der Schwingfestigkeit bei Schwingverschleiß betrifft. **Stähle** können als relativ unempfindlich gelten, während hochfeste **Titanlegierungen** einen **Abfall der Schwingfestigkeit auf bis zu 30 %** erleiden können. Dies bedeutet eine

Lebensdauerreduzierung bis zu mehreren Zehnerpotenzen.

Einflüsse auf den Schwingverschleiß

• Betriebsbeanspruchungen:

Mechanisch: Verschleißbewegung: - Gleitgeschwindigkeit/Frequenz

- Bewegungsamplitude/ Gesamtweg
- Haltezeiten (Losbrechkräfte, Stick-Slip-Effekt)
- Kräfteinwirkung (hämmernd, gleitend, wälzend)
- Flächenpressung
- Belastungsart (Zug, Druck, Schub) und Spannungsniveau im beeinflussten Querschnitt

Thermisch: - Temperaturniveau: - Werkstofffestigkeit/ Härte
 - Temperaturänderungen: - Wärmedehnungen (Größe, Frequenz),
 - Thermoermüdungsverhalten der Werkstoffe

Chemisch: -Umgebungsatmosphäre:

- Druck
- Zusammensetzung (z.B. Verunreinigungen)
- Temperatur (gebildete Oxidarten)
- Werkstoffe (Schutzfilmbildung, Schädigungen)

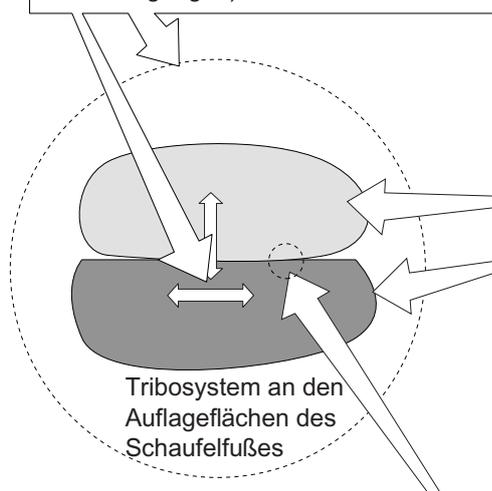
• Werkstoff:

- mechanisch: Festigkeit:
 - Statische Festigkeit (auch Zeitstand/Kriechen)
 - Schwingfestigkeit (auch Thermoermüdung)
 - Härte (Makrohärte und Mikrohärt, z.B. von Gefügekomponenten)
 - Risszähigkeit
 - Duktilität/Versprödung
 - Neigung zum Kaltverschweißen

- Gefüge: - unterschiedliche Phasen
 - Korngröße

- Chemisch: Oxidations- und Korrosionsverhalten:
 - Zusammensetzung / Legierung

- Physikalisch: - Wärmedehnung
 - Dämpfung,
 - Elastizität (E-Modul)



• Kontaktflächengeometrie:

- Spannungsverteilung und -höhe: Formkerben, Steifigkeitssprünge
- Form der Auflageflächen: Linienberührung, Punktberührung, flächige Auflage (Flächenpressung!)
- Rauigkeiten: z.B. Form und Lage von Bearbeitungsriefen
- Toleranzen: z.B. Winkelfehler und Fluchtfehler
- Profil der Kontaktfläche: z.B. glatt, Kalottenstruktur (Kugelstrahlen) oder Rillen

• Zustand der Kontaktflächen:

- Struktur: Mechanische Behandlung: z.B. kugelgestrahlt oder gewalzt
- Herstellungsverfahren (z.B. Schleifen oder Drehen):
 - Eigenspannungen, - Verfestigung,
 - Schädigung (z.B. Rissbildung)
- Beschichtung:
 - Verschleißfeste Beschichtungen („Panzerung“)
 - Gleitbeschichtungen und -Lacke

• **Fertigung:** siehe „Kontaktflächengeometrie“ und „Kontaktflächenzustand“.

Bild 6.1-9.1

Bild 6.1-9.1: Der Schwingverschleiß eines Tribosystems bzw. die durch ihn ausgelösten Schädigungen werden von einer Vielzahl Parametern beeinflusst. Hierzu gehören in erster Linie

- Betriebsbeanspruchungen
- Kontaktflächenzustand
- Werkstoffkombination

Die Komplexität des Tribosystems erfordert versuchstechnische Nachweise und viel Erfahrung um eine befriedigende Betriebssicherheit zu erreichen. Einem befriedigend sicheren rechnerisch-analytischen Ansatz entzieht sich ein solches System. Jedes Überschreiten des „Erfahrungshorizonts“ (z.B. in Flächenpressung oder Gleitschichten), birgt erfahrungsgemäß die Gefahr umfangreicher Schäden. Das besonders heimtückische dieser Schäden ist, dass sie sich häufig erst nach längeren Betriebszeiten (Inkubationszeit!) zeigen und sich dann bereits viele gefährdete Bauteile im Serieneinsatz befinden.

Einfluss der Flächenpressung in der Kontaktzone:

Die **Flächenpressung** im Makrobereich, z.B. der Schwalbenschwanzfüße von Verdichterrorschaukeln, ist in erster Linie konstruktions- (Keilwinkel, Auflagefläche usw.) und **drehzahlabhängig** (Fliehkraft, Gasbiegekräfte). Sie ist vor dem Start nahezu Null (außer bei **verklemmten Schaufelfüßen**) und erreicht bei voller Drehzahl ein Maximum. Eine hohe Flächenpressung kann eine **Relativbewegung** der Kontaktflächen verringern oder gänzlich vermeiden. Hierfür sind ausreichend hohe, den äußeren Kräften entgegenwirkende, Reibkräfte erforderlich. Kommt es zu merklichen **Mikrobewegungen** (Bild 6.1-8) so erhöht sich gewöhnlich mit ansteigender Flächenpressung Reibkraft, **Verschleiß** (Bild 6.1-10) und **Schwingfestigkeitsabfall**. Dies ist besonders dann der Fall, wenn **Gleitschichten infolge der hohen Flächenpressung zerstört oder geschädigt werden** (Beispiel 6.2-1).

Bild 6.1-15.1). Es kommt zum direkten metallischen Kontakt empfindlicher Werkstoffe (z.B. Titanlegierungen). Ein ansteigender Reibbeiwert ist ein Indiz für solche Vorgänge.

Die veröffentlichten Ergebnisse über sehr unterschiedliche Anhebungen der Schwingfestigkeit frettingbeanspruchter Titanoberflächen durch Oberflächenbehandlungen (es werden sowohl große Schwingfestigkeitsverbesserungen beobachtet als auch enttäuschend geringe Verbesserungen (Bild 6.1-19) dürften eine Ursache in unterschiedlichen Flächenpressungen bei den Versuchen haben.

Bild 6.1-9.2 (Lit 6.1-5): Eine Hauptursache für Schwingverschleiß erzeugende Mikrobewegungen sind unterschiedliche Steifigkeiten in Kontakt stehender Körper. Dadurch traten bei dynamischen Belastungen unterschiedliche elastische Verformungen an den Kontaktflächen auf. Diese führten zu entsprechenden Mikrobewegungen. Weil solche Bereiche typischerweise an **Steifigkeitssprüngen mit hoher Kerbwirkung** und zusätzlichen hohen Schubbeanspruchungen (**Anstrengung**, siehe Bild 6.1-11) liegen, besteht hier natürlich eine besondere Gefahr der **Ermüdungsrisssbildung**. Die Vorgänge sollen an Hand von zwei Beispielen genauer betrachtet werden:

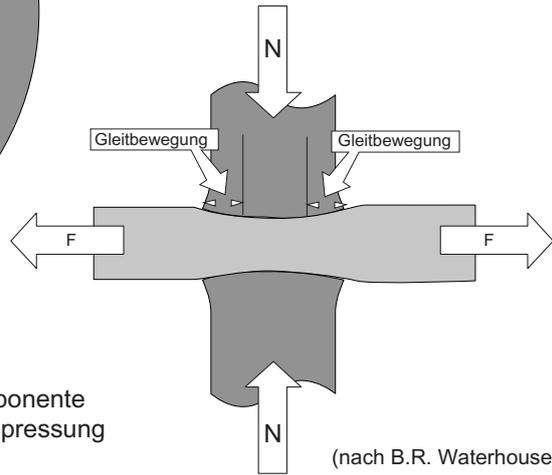
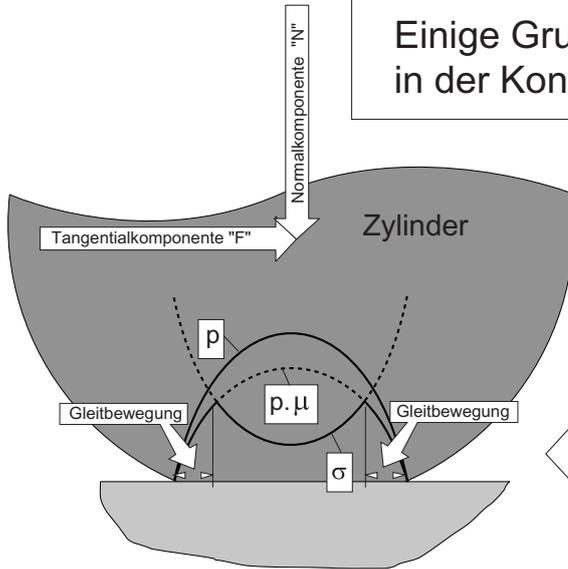
Bei der Auflage zweier Körper unter Normalkräften entsteht in Abhängigkeit von der Geometrie der Auflageflächen eine charakteristische Druckverteilung (Hertz'sche Pressung). Die Verteilung der Flächenpressung (Skizze oben links) führt zu einer entsprechenden Verteilung der Reibkräfte. Solche Bedingungen ergeben sanft **abgerundete Kanten**. Tangential wirkende Kräfte können entsprechend der Kuve „ p, μ “ aufgenommen werden. Elastische Verformungen der Kontaktflächen, die lediglich unter Normalkräften stehen, können solche Tangentialkräfte erzeugen. Überschreiten diese Tangentialkräfte in den Randbereichen der Kontaktzone die Reibkräfte, kommt es zu Relativbewegungen. Bei pulsierender Normalkraft können solche Mikrobewegungen zu Reibverschleiß führen. Dies ist ein wichtiger Schadensmechanismus bei Schwingverschleiß und **Ermüdungsbrüchen in Schaufelfüßen** (Skizze unten rechts).

Die Skizze rechts oben zeigt elastische Verformungen einer Auflagefläche auf die ein Stempel gedrückt wird. Gleitbewegungen in den Randzonen der Kanten werden hier auch **ohne Abrundung ausgelöst**. Bei dynamischer Belastung der Auflage führt dies zu entsprechend oszillierenden Mikrobewegungen und **Schwingverschleiß** (Reibrost, Fretting). Diese Beanspruchungsart ist z.B. typisch für ei-

nen eingeschrumpften Wellenbereich unter ausreichend hoher Umlaufbiegung (Skizze unten links). Auf Grund des Steifigkeitssprungs im Bereich der Austritts aus dem Schrumpfsitz tritt Fretting auf.

Der Konstrukteur hat also darauf zu achten, dass an hochbelasteten lösbar gefügten Strukturen **Steifigkeitssprünge bzw. unterschiedliche Elastizitäten minimiert** werden.

Einige Grundlagen zu den Vorgängen in der Kontaktzone eines Frettingsystems.



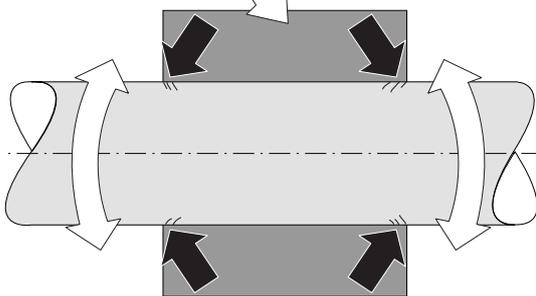
p = Flächenpressung aus der Normalkomponente
 $\mu \cdot p$ = Reibbeanspruchung aus der Flächenpressung
 σ = Tangentialspannung (nach Waterhouse)

(nach B.R. Waterhouse)

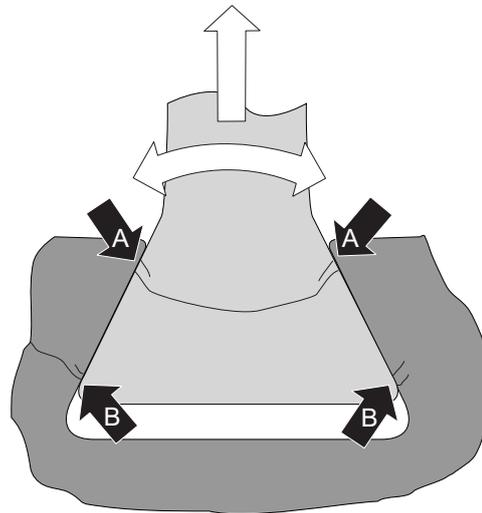
Bereiche von gleitendem und ruhendem Kontakt auf der Berührungsfäche zwischen einem Zylinder und einer Ebene unter Tangential- und Normalkräften

Deformation der Anlageflächen angedrückter ebener Backen. Bereiche mit Fretting (Gleitbewegung) stark übertrieben.

Im Vergleich zur Welle steifes Element



Typische Schwingerermüdungszonen an Steifigkeitssprüngen lösbar gefügter Bauteilkomponenten.



Typische Schwingerermüdungszonen an einer Schwalbenschwanzfuß-Verbindung. "A" Schaufelfuß, "B" Scheibenhöcker.

Bild 6.1-9.2

Einfluss des Reibbeiwerts auf die Kontaktzone:

Der Reibbeiwert in der Kontaktzone ist von entscheidender Bedeutung für die Schädigung (Bild 6.1-10). Vom Reibbeiwert wird insbesondere das Spannungsniveau in der Kontaktzone beeinflusst. Von besonderem Interesse ist der Übergangsbereich (siehe Bild 6.1-9). In dieser Zone kombinieren sich gewöhnlich Zugspannungen mit Schubspannungen. Die Vergleichsspannung dieser Belastungskombination (auch Anstrengung genannt, siehe Bild 6.1-11) bestimmt die Schwingermüdung. Allgemein kann also davon ausgegangen werden, dass die Schädigung durch Schwingverschleiß mit dem Anstieg des Reibbeiwerts zunimmt (Bild 6.1-10). Dabei beeinflussen sich die Schädigung (z.B. Abrasion und Adhäsion) und der Reibbeiwert wechselseitig (Lit 6.1-17, Beispiel 6.1-1). Es ist also davon auszugehen, dass sich der Reibbeiwert mit der Belastungszeit verändert (Bild 6.1-10). Die Änderung des Reibbeiwerts wird durch eine Vielzahl von Einflüssen bestimmt (siehe Seite 16). Dies können sowohl die Werkstoffe der Reibpartner als auch Betriebs- und Fertigungseinflüsse sein. So ist es verständlich, dass die ausreichend betriebsnahe versuchstechnische Simulation des Schwingverschleißes äußerst schwierig ist. Nur für den jeweiligen besonderen Anwendungsfall ist eine praktisch nutzbare Aussage (z.B. für die Erarbeitung einer Abhilfe bei Schäden) zu erwarten.

Bild 6.1-10: Die Skizze oben links zeigt die maximalen **Hauptspannungen in einer Schwalbenschwanz-Fußverbindung**. Zu erkennen ist, dass die Hauptbelastungszonen von Schaufel („1“) und Scheibenhöcker („2“) nicht gegenüber liegen. Die maximalen Beanspruchungen in der Kontaktzone sind merklich **vom Reibbeiwert abhängig** (Diagramm oben rechts, Lit 6.1-19). Kommt es zur Kaltverschweißung (Fressen) in den Kontaktzonen, kann der Reibbeiwert deutlich über 1 liegen. Das Diagramm in der Mitte zeigt, wie sich in einem Laborversuch der Reibbeiwert in Abhängigkeit von der **Zahl der Gleitbewegungen** (d.h. tendenziell in Abhängigkeit von der Zeit) bei unterschiedlichen Tribosystemen verändert. Der erstaunlicherweise bei allen Systemen etwa nach gleicher Zahl der Gleitbewegungen eintretende exponentielle Anstieg des Reibbeiwerts (Kurven „2“ bis „7“, Lit. 6.1-7) deutet ein Versagen infolge Kaltverschweißungsvorgängen an. Dieses Verhalten lässt auf die hohe Flächenpressung im Versuchs schließen. Derartig hohe Flächenpressungen sollten in Tribosystemen wie Schaufelfußbefestigungen auslegungsgemäß vermieden werden. Die flacher werdende Kurve „1“ scheint anzuzeigen, dass sich der Gleitvorgang stabilisiert.

Es besteht die Möglichkeit, durch Behandlung der Kontaktflächen, das Verschleißverhalten zu optimieren (Skizzen unten). Jede dieser Behandlungen hat ihre spezifischen Vor- und Nachteile die hier beispielhaft dargestellt werden:

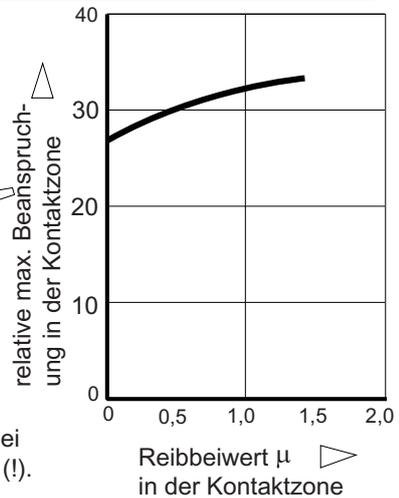
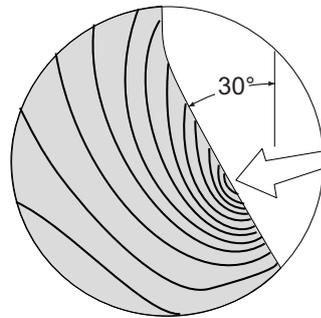
Verfestigen: Relativ einfach, auch nachträglich herstellbar (Kugelstrahlen). Problematisch kann ein Nachlassen der Wirksamkeit durch Kriechen unter Betriebstemperatur sein.

Gleitlack: Einfach und preiswert aufzubringen (z.B. Grafit). Nachteil kann eine Veränderung (z.B. Oxidation, Abrieb) und damit ein Reibbeiwertsanstieg bei erhöhten Betriebstemperaturen sein.

Metallische Beschichtung: Vorteil: festhaftend (z.B. galvanisch Verkupfern, mit Bronzen besputtern), vermeidet den direkten Kontakt mit dem Grundmaterial. Nachteil: Relativ teuer, maßliche Veränderung, bei erhöhten Betriebstemperaturen Veränderung der Gleiteigenschaften (Oxidation, Ermüdung) mit der Betriebszeit.

Lose Zwischenlage (Bild 6.3-1): Vorteil: sehr wirksam (z.B. Kupferfolie), Nachteil: kann herausfallen, schlecht montierbar, muss maßlich berücksichtigt werden.

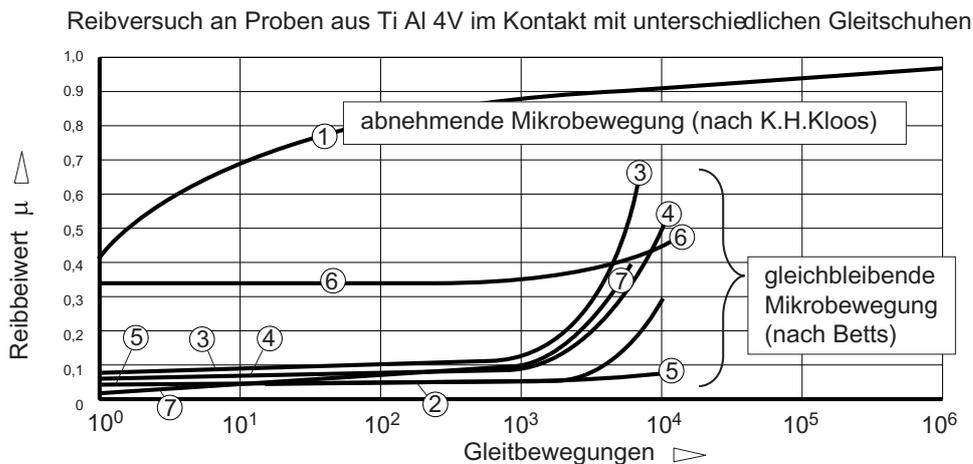
Der Reibbeiwert ist ein wichtiger Indikator für die Beanspruchung und Schädigung der Kontaktflächen.



Typische Verteilung der maximalen Hauptspannung in einer Schwalbenschwanzverbindung. (gestrichelte Linien geben Druckspannungen an) (Mat.Komb. Keramik/Metall)

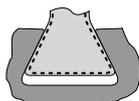
Maximale Hauptspannungen mit Schubbeanspruchung bei einem Reibbeiwert von 1,73 (!) (Mat.Komb. Keramik/Metall)

Veränderung des Reibbeiwerts mit der Zahl der Verschleißbewegungen



- "1" unbehandelt/unbehandelt
- "2" verchromt/verchromt
- "3" eloxiert/unbehandelt
- "4" eloxiert/eloxiert
- "5" verkupfert/Cu-Beilage + MoS₂ geschmiert
- "6" Al-Blech Zwischenlage unbehandelt/ungeschmiert
- "7" Al-beschichtet unbehandelt

Typische Kontaktflächenbehandlung an Schwalbenschwanzfüßen von Verdichterschaufeln



verfestigt
(z.B. kugelgestrahlt)

Bild 6.1-10



mit Gleitlack beschichtet
(z.B. Grafit)



einseitig haftende metallische Beschichtung
(z.B. CuNiIn)



lose metallische Zwischenlage
(z.B. Cu-Blech)

Bekannt ist, dass in der Niederdruckturbinen (!) eines zivilen Fantriebwerks lose Blechbeilagen auf Schwalbenschwanzfüßen (!) der Turbinen-

schauflern zum Einsatz kommen und sich offenbar bewährt haben.

Kenngrößen für die Beurteilung der Frettingbelastung am Beispiel des **Scheibenhöckers** einer Schwalbenschwanznut

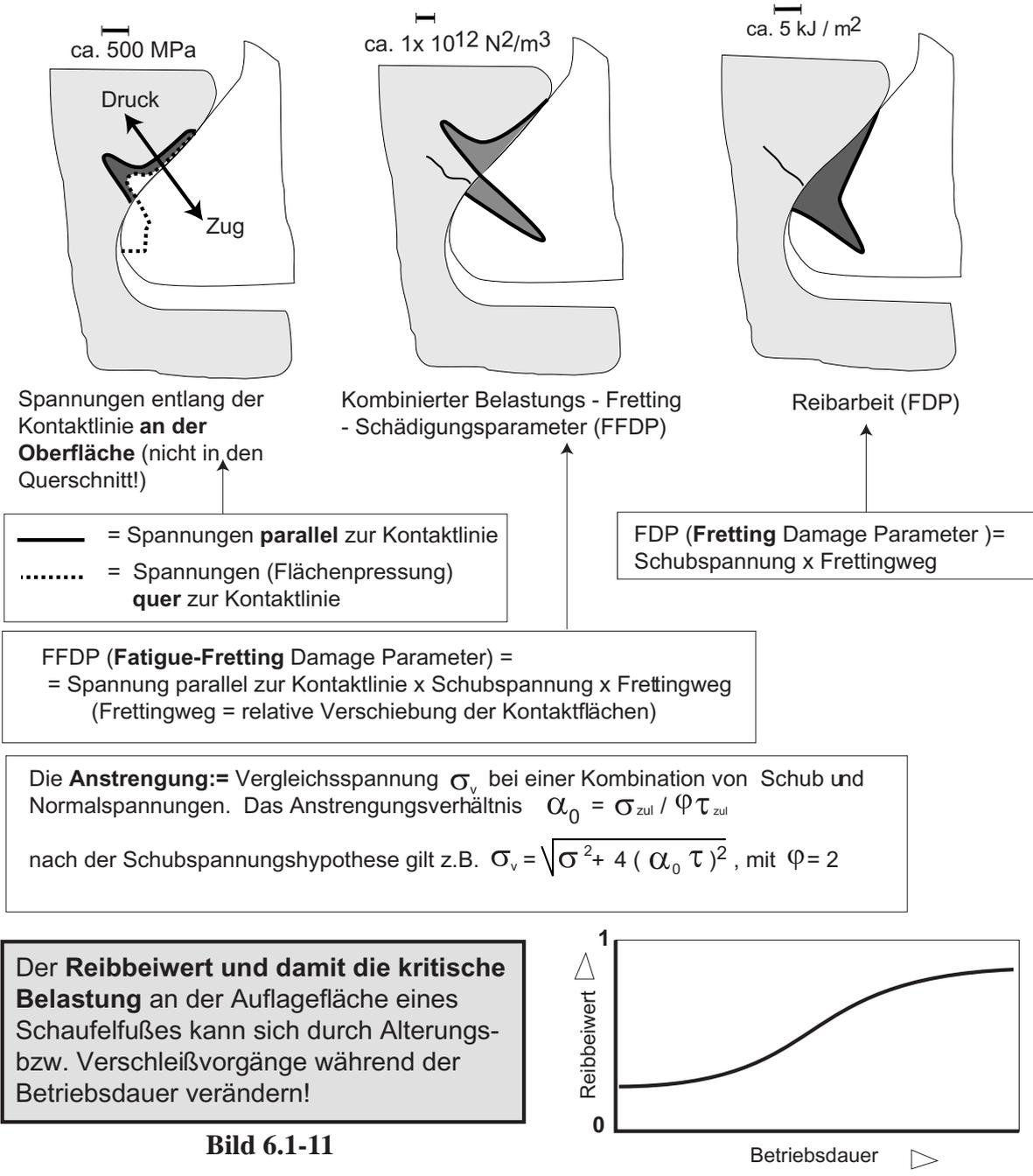


Bild 6.1-11

Bild 6.1-11 (Lit. 6.1-9): Dieses Bild zeigt die Spannungsverhältnisse im Scheibenhöcker einer Schwalbenschwanzverbindung. Ähnliche Bedingungen gelten auch für den Schaufelfuß (siehe Bild 6.1-9 und 6.1-10). In der zitierten Literatur werden Kenngrößen für die Schädigung

des Schwingverschleiß auf die Ermüdungsfestigkeit in der Kontaktzone definiert. Sie erscheinen für die Auslegung von Bauteilen, insbesondere von Schaufelfüßen geeignet.

Reibarbeit, Fretting Damage Parameter „FDP“ (Skizze unten):

Der „FDP“ ist das Produkt aus der in der betrachteten Kontaktzone herrschenden Schubspannung und dem an dieser Stelle auftretenden Frettingweg (Doppelamplitude). Der Kennwert nimmt im Bereich der Scheibe die dem Schaufelfußende gegenüber liegt (siehe Bild 6.1-9 Zone „B“) ein Maximum ein. Hier besteht erfahrungsgemäß die höchste Wahrscheinlichkeit eines Schwinganrisses im Scheibenhöcker. Der Rissfortschritt nach dem Anriss wird durch die Höhe der (Normal-) Spannung (vergleiche auch Bild 6.1-12 für den Schaufelfuß) parallel zur Kontaktlinie bestimmt. Deshalb wurde eine weitere Kenngröße (FFDP) für den Rissfortschritt zum Bauteilversagen definiert.

Kombinierter Ermüdungs-Fretting Schädigungsparameter, Fatigue-Fretting Damage Parameter (FFDP, mittlere Skizze):

Der FFDP ist das Produkt aus der örtlich herrschenden Normalspannung parallel zur Kontaktlinie, Schubspannung und Frettingweg.

Anstrengung:

Weil in der Verschleißzone sowohl Normalspannungen als auch Schubspannungen vorliegen bietet sich die daraus ergebende Vergleichsspannung nach der Schubspannungshypothese (sog. Anstrengung, siehe Angaben unten) als die bestimmende Beanspruchung für die Schwingermüdung an. Diese Spannung berücksichtigt wie die bereits genannten Parameter den Reibbeiwert in dem Schubspannungsanteil. Sie beinhaltet jedoch nicht die Reibarbeit weil der Reibweg nicht in die Formel eingeht. Aus diesem Grund ist von der Anstrengung keine so betriebsnahe Aussage zu erwarten wie von Parametern welche den Reibweg berücksichtigen.

Für die **Auslegung von Bauteilen** auf der Basis der angegebenen Kenngrößen bietet sich die folgende Vorgehensweise an:

1. **Auswertung von Bauteilen** mit und ohne Rissbildung aus dem typischen Triebwerksbetrieb und Ermittlung der jeweiligen Kenngrößen. Die Normalspannungen parallel zur Kontaktlinie und die Schubspannungen können, bei ausreichender Kenntnis des Reibbeiwerts, genügend genau berechnet werden. Der örtliche Frettingweg lässt sich durch mikroskopische Bruchflächenauswertung (REM) bestimmen. Hieraus sollten sich erfahrungsbasierte zulässige Grenzwerte ermitteln lassen.

2. Ermittlung der Kenngrößen in ausreichend betriebsnahen **Laborversuchen**.

3. Auslegung der Bauteile entsprechend den ermittelten Kenngrößen aus Betrieb und Versuch. Überprüfung ausreichender Realitätsnähe durch **Auswertung** von Bauteilen nach repräsentativer, aussagekräftiger und betriebs-typischer Beanspruchung.

Einfluss der Betriebsdauer auf die Schaufelfußbelastung: Mit **Alterungsprozessen** (Oxidation, Schweißwasser/Salz, Reaktionen mit Staubablagerungen) in Gleitschichten und Pasten im Zusammenspiel mit Schwingverschleiß bzw. Verschleißprodukten ist zu rechnen. Das **kann den Reibbeiwert verändern**. Damit verändert sich auch die **Belastung an der Auflagefläche** (Bild 6.1-12). Dieser Möglichkeit muss die **Entwicklung und Erprobung** von Gleitschichten auf kraftübertragenden Flächen, insbesondere Schaufelfüßen Rechnung tragen. Die unterschiedlichen Temperaturen in einem Verdichter können das Gleitverhalten der Schichten stufenabhängig gefährlich verändern können. Eine Beschichtung die sich in den vorderen Stufen durchaus bewährt, kann in den hinteren Stufen versagen und umgekehrt. Dabei spielt beispielsweise auch die Art der sich aus den Verschleißprodukten bildenden Oxide eine Rolle (Bild 6.1-17).

Die Belastungsverhältnisse in den Auflageflächen eines Schwalbenschwanzfußes der **Schaufel** sind komplex.

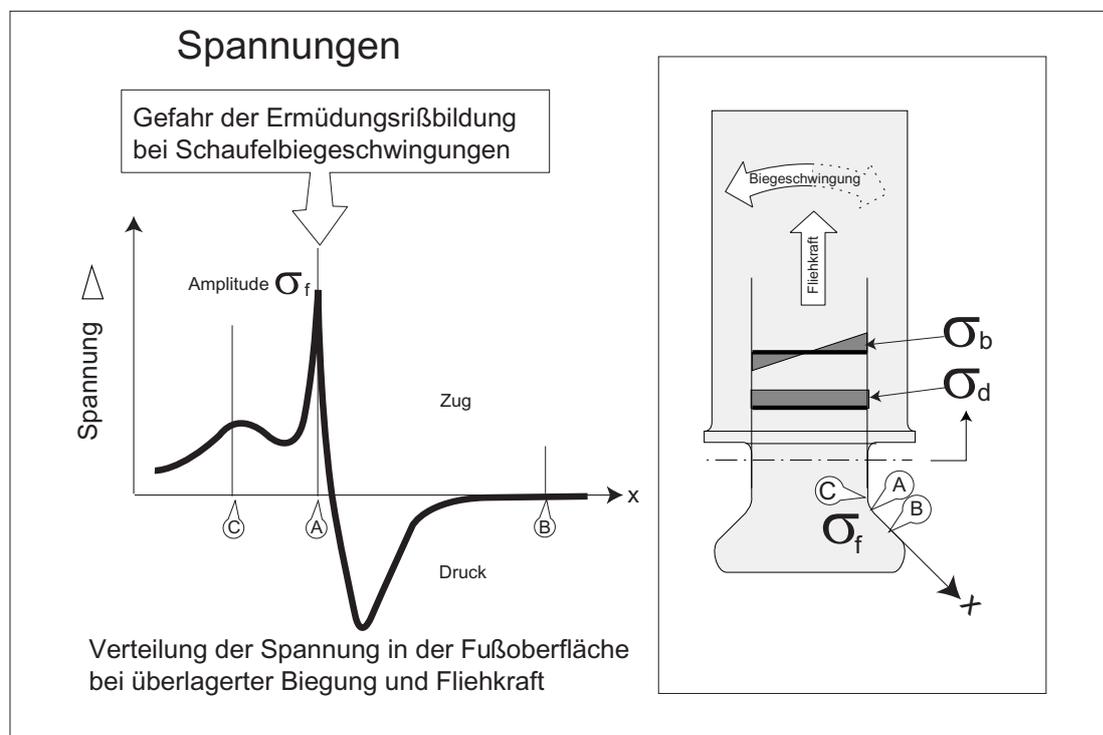
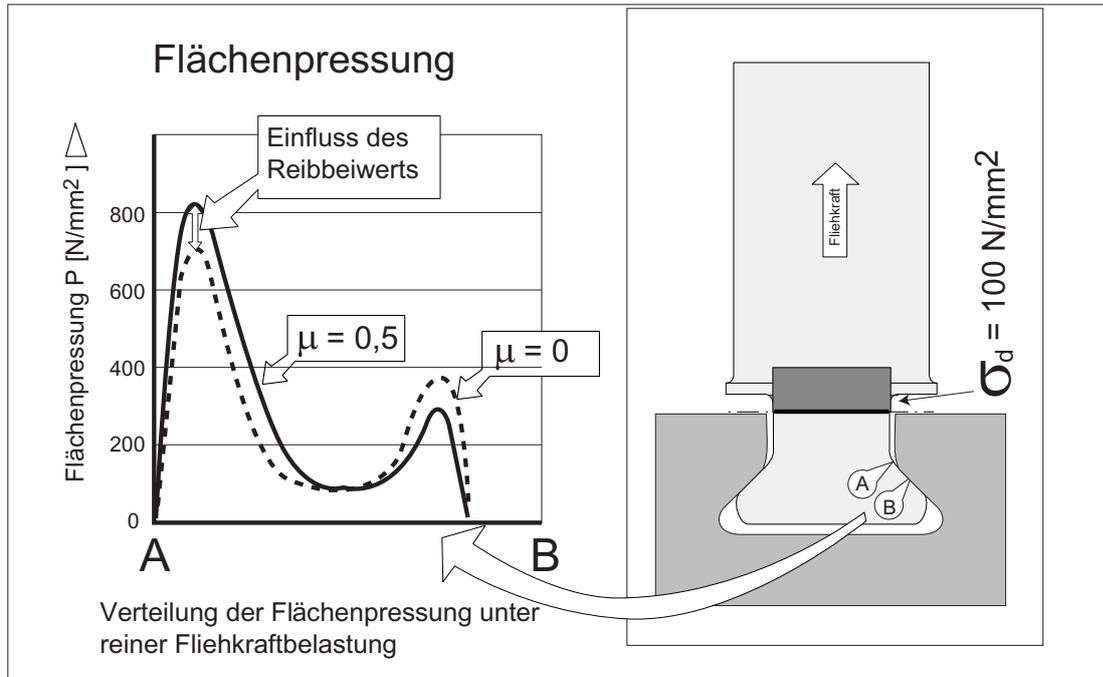


Bild 6.1-12

Bild 6.1-12 (Lit. 6.1-10): Ähnlich wie in Bild 6.1-11 für den Scheibenhöcker, verläuft die Flächenpressung aus der Fliehkraft über die Kontaktfläche des Schaufelfußes (Diagramm oben links). Das Maximum liegt in Punkt „A“ (siehe Skizze oben rechts). Der Kurvenverlauf mit zwei ausgeprägten Maxima ergibt sich aus den sich zwischen „A“ und „B“ verändernden Steifigkeiten von Schaufelfuß und Scheibenhöcker.

Wie bereits in Bild 6.1-10 gezeigt, steigt die Spannung in der Kontaktfläche mit dem Reibbeiwert an (Diagramm oben links für $\mu=0,5$ und $\mu=0$). Die Zahlenwerte gelten für eine angenommene fliehkraftinduzierte gleichmäßige Belastung des Fußhalsquerschnitts mit 100 N/mm^2 .

Führt die Schaufel Grundbiegeschwingungen aus, so überlagert sich die Fliehkraft mit den Biegespannungen und es ergibt sich eine Spannungsverteilung in der Schaufeloberfläche des Fußbereichs (Skizze unten rechts) mit einem ausgeprägten Zugspannungsmaximum in „A“ (Skizze unten links). Die Neigung zur Bildung von Schwingermüdigungsarissen in diesem Bereich wird über die Anstrengung (Bild 6.1-11) bestimmt. Die Spannungserhöhung im Fußradius („C“) ist auf Grund der moderaten Kerbwirkung relativ gering, muss jedoch bei der konstruktiven Fußgestaltung beachtet werden.

Bild 6.1-13: Um möglichst betriebsnahe Bedingungen für den Abfall der Schwingfestigkeit unter Schwingverschleiß in den Auflageflächen von Schaufelfüßen zu simulieren werden eine Vielzahl unterschiedlicher Versuchsanordnungen unter Laborbedingungen angewandt. An Hand von drei Beispielen soll die Problematik der Versuche dargestellt werden.

Versuche mit **Reibklötzchen**:

Beim **Prüfaufbau „1“** (Skizze oben mitte) wirken zwei gegenüberliegende, **brückenförmige Reibklötzchen** auf eine Flachprobe. Diese steht unter **Zugschwellbeanspruchung** durch eine definierte Last. Bei der elastischen Verformung

der Probe erzeugen die unterschiedlichen Dehnungen zwischen Probe und Klötzchen an den Auflageflächen Schwingverschleiß (vergleiche Bild 6.1-9). Die Flachproben sind relativ billig (einfache Proben), die Parameter reproduzierbar und die Krafteinleitung vergleichsweise einfach. Eine Rissbildung erfolgt üblicherweise im Bereich der Kontaktzonen.

Beim **Prüfaufbau „2“** (Skizze oben rechts) werden nur **einfach aufliegende Reibklötzchen** verwendet. Auch hier kommt es zu Mikrobewegungen auf Grund unterschiedlicher Elastizitäten (Bild 6.1-9.2). Diese Anordnung scheint den Bedingungen am Schaufelfuß besser zu entsprechen und wird anscheinend deshalb bevorzugt.

Die Schädigung durch Rissbildung bzw. Abfall der Schwingfestigkeit hängt offenbar von der **Flächenpressung an den Kontaktstellen** der Reibklötzchen ab. Bei **Titanlegierungen** spricht man ab 500 bis 800 MPa wegen des **Schädigungseffekts in Form des Abfalls der Schwingfestigkeit von Fretting Fatigue**. Bei niedrigerer Flächenpressung befindet man sich im Bereich des **Reibverschleißes** (engl. fretting wear). Diese Effekte lassen sich pausibel mit dem von H. Klingele angegebenen **Schädigungsmechanismus** erklären (Bild 6.1-4). Dazu passt der Einfluss der Reibarbeit (Bild 6.1-11). Die ertragene Schwingfestigkeit der Probe lässt somit auf die Schädigung rückschließen. Die Abweichungen gegenüber den Bedingungen in einem Schaufelfuß bestehen in Spannungsgradienten über den Querschnitt (abfallende Spannung beim Schaufelfuß, gleichbleibend hohe Spannung im Probenquerschnitt) und in den schwer zu simulierenden Steifigkeiten des Schaufelfußbereichs. Dadurch kommt es in der Probe nicht zu dem in der Praxis an Schaufelfüßen häufig beobachteten Stillstand oder der Verzögerung des Rissfortschritts und den entsprechend längeren Zeiten bis zum Bruch. Veränderungen des Reibbeiwerts über der Betriebszeit zeigen im Versuch weniger Einfluss als im Betrieb, was eine Auswahl und Optimierung des Tribosystems merklich erschwert. Erfahrungsgemäß verhal-

Die betriebsnahe Simulation der Verschleißbedingungen im Schaufelfußbereich ist eine schwierige Aufgabe.

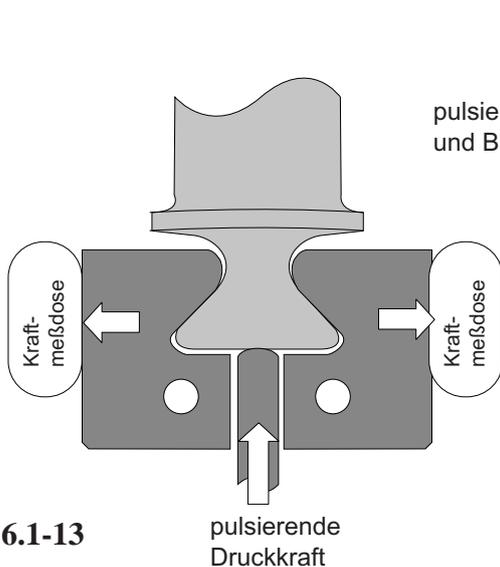
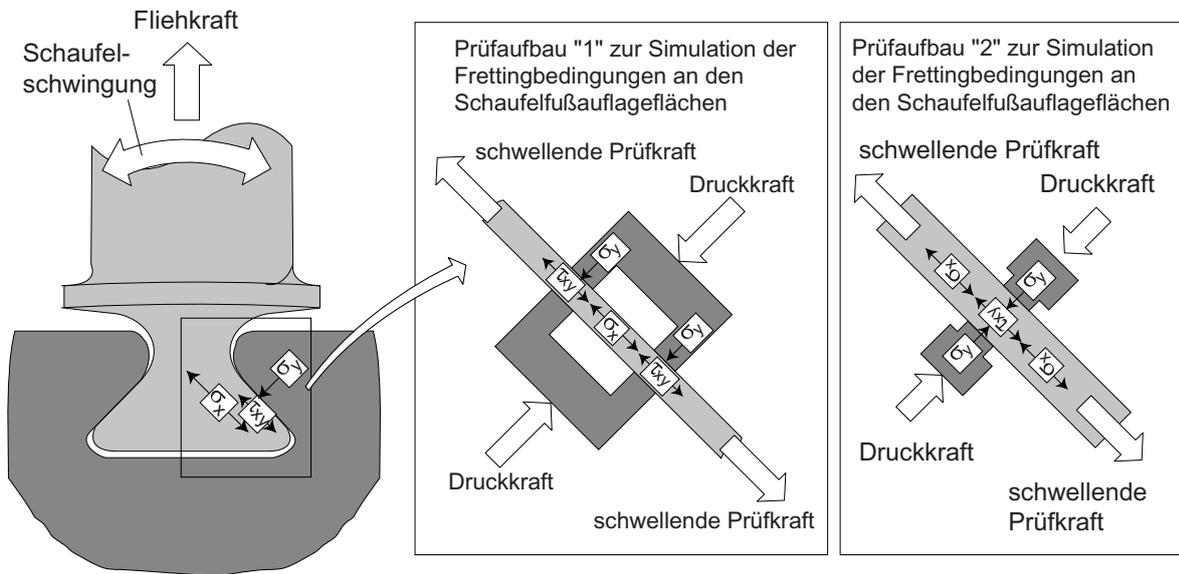
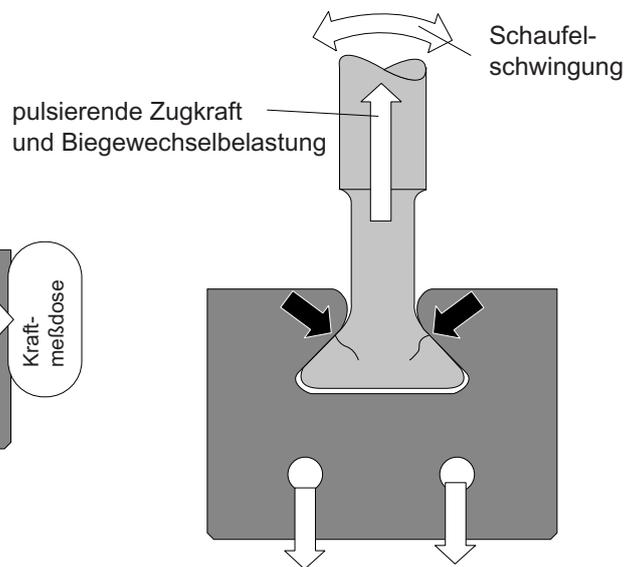


Bild 6.1-13

Messung des Reibbeiwerts an den Auflageflächen des Schaufelfußes



Untersuchung des Ermüdungsverhaltens im Schaufelfußbereich

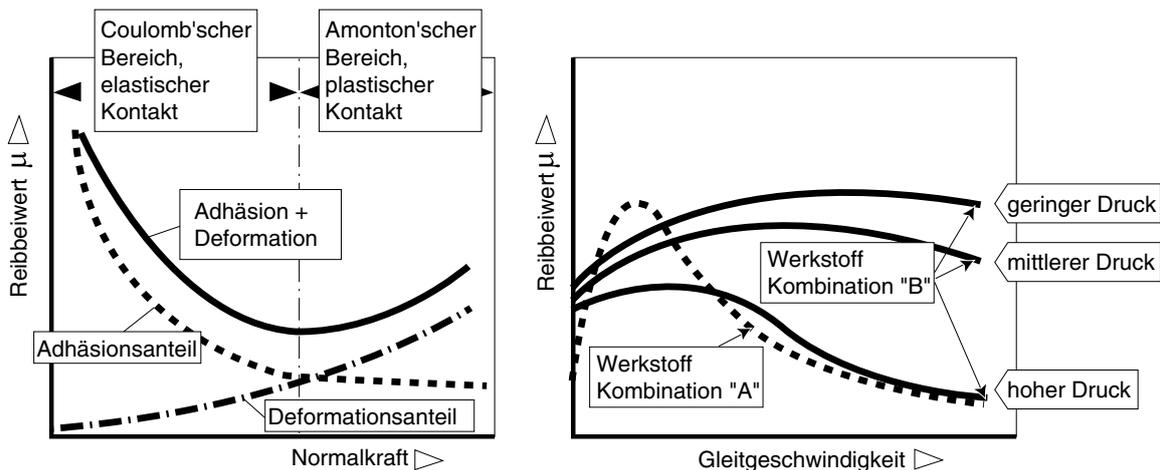
ten sich in dieser Versuchsanordnung viele Tribosysteme weitestgehend gleich, während die Praxis in den Triebwerken deutliche Unterschiede zeigt.

Betriebsnähere Ergebnisse als der Klötzchenversuch lassen erfahrungsgemäß Versuche an Proben welche **Schaufelfußgeometrie besitzen** (Skizze unten rechts) und die neben der die Fliehkraft simulierende Zugkraft eine

Biegewechselbeanspruchung simulieren, erwarten. Nachteil dieser Versuchsaufbauten sind die relativ teuren Proben und die aufwendige Krafteinleitung.

Mit einem ähnlichen Versuchsaufbau (Skizze unten links) lässt sich der **Reibbeiwert während des Versuchs kontinuierlich messen**. Dazu werden an getrennten Scheibenhöckerauflagen die Keilkräfte gemessen und in Re-

Der Reibbeiwert ist im Betrieb nicht konstant, er hängt merklich von den Betriebsbedingungen ab.



Prinzipielle Abhängigkeit des Reibbeiwerts von der Belastung (nach Kragelski)

Abhängigkeit des Reibbeiwerts von der Gleitgeschwindigkeit. Typisches Verhalten, abhängig von den Gleitpartnern und der Flächenpressung

Bild 6.1-14

lation zur Kraft, die den Schaufelfuß von unten nach außen drückt, gesetzt. Dieser Versuch ermöglicht es, Beschichtungen und Gleitlacke zu optimieren.

Bild 6.1-14 (Lit. 6.1-6): Der Reibbeiwert zwischen den Kontaktflächen spielt also eine entscheidende Rolle für das Auftreten von Schwingverschleiß. Je höher der bei Mikrobewegungen überwundene Reibbeiwert liegt um so größer sind die Beanspruchungen im Frettingbereich. Es entstehen hohe Schubbeanspruchungen in den geschädigten Kontaktflächen.

Das linke Diagramm zeigt den prinzipiellen Zusammenhang zwischen dem Reibbeiwert und der Normalkraft bei Adhäsions- und Deformationsanteil der Reibkraft. Daraus ist zu entnehmen, dass bei einer bestimmten Normalkraft der **Reibbeiwert** eines Tribosystems ein **Mini-**

mum erreicht. Unter dieser Bedingung dürfte die beste Schwingfestigkeit bei Schwingverschleiß zu finden sein. Auf diese Weise wird z.B. der Reibbeiwert an den Auflageflächen von Schaufelfüßen durch geeignete Gleitlacke möglichst niedrig gehalten. Dies kann durch eine geeignete Auswahl der Schwalbenschwanzwinkel und der Größe der Auflageflächen optimiert werden.

Der Reibbeiwert hängt werkstoffspezifisch auch von der Gleitgeschwindigkeit, d.h. von der Größe und der Frequenz der Relativbewegung der Kontaktflächen, ab (Diagramm rechts). Dies zeigt, dass für den jeweiligen Anwendungsfall das günstigste Tribosystem bzw. eine günstige Werkstoffkombination, gekennzeichnet durch einen möglichst niedrigen Reibbeiwert, zu suchen ist.

Einfluss der Belastung auf die Ermüdung durch Schwingverschleiß

Die **Spannungsverteilung** im Bereich der Kontaktzone spielt eine wichtige Rolle für die Schwingfestigkeit. So wirken sich **Frettingzonen in Form- und Steifigkeitskerben** so aus, als würde der Kerbfaktor deutlich erhöht.

Versuche, bei denen zuerst Frettingverschleiß entstand und dann eine dynamische Ermüdungsbelastung erfolgte, sind zumindest in ihrer Aussage zum Bauteilverhalten unter gleichzeitigem Fretting und dynamischer Beanspruchung zweifelhaft. Ebenso können die Ergebnisse von **Bauteilversuchen** entscheidend verfälscht werden, wenn das Belastungsniveau und das Belastungskollektiv, sowie die Belastungs- und Ruhezeiten nicht ausreichend betriebsnah gewählt wurden. Bei einem zu hohen **Belastungsniveau** kann sich z.B. die Schädigung im Frettingbereich nicht ausreichend ausbilden und so das Bauteil frühzeitig im Bereich einer mechanischen Kerbe an anderer Stelle brechen. Realistische Zeiten würden dagegen zu betriebsnahen Brüchen an den Frettingstellen führen.

Einfluss der Verschleißzeit, Schwingfrequenz und Haltezeiten auf die Kontaktzone

Mit zunehmender **Verschleißzeit** (d.h. der Zeit während die Verschleißbeanspruchung wirksam wird) bzw. Zahl der Bewegungszyklen können sich die Verschleißbedingungen in der Kontaktzone verändern. So steigt z.B. bei Ti6Al4V unter bestimmten Schwingverschleißbedingungen der Reibbeiwert von $\mu = 0,45$ beim ersten Lastwechsel auf $\mu = 0,8$ bei 10^3 Lastwechseln und gegen $\mu = 1$ bei 10^6 Lastwechseln (Bild 6.1-10). Entsprechend ändert sich mit der Zeit das Verschleißbild. Es entstehen Oberflächenverformung, Zerrüttung und Mikrorissbildung, bis im Endstadium Makrorissbildung eintritt und zum Bauteilversagen führt. Der Zeiteinfluss ist natürlich im Zusammenhang mit anderen Einflüssen wie Temperatur und Werkstoffkombination zu sehen (Bild 6.1-18). Der Verschleiß kann z.B. bei hohen Temperaturen für einen bestimmten Werkstoff sehr viel geringer sein als bei Raumtemperatur, bei 300°C aber ein Maximum annehmen. Ähnliches gilt für die Beeinflussung der Schwingfestigkeit. Es ist z.B. durchaus möglich, dass sich eine Beschichtung bei Temperaturen im Hochdruckverdichter bewährt und sich bei niedrigeren Temperaturen der vorderen Verdichterstufen spröde verhält und versagt (Bild 6.1-20). Auch hier dürfte die Bildung von Oxiden mit oder ohne „Schmiereffekt“ von Bedeutung sein. Kommt es bei Stählen zur Bildung von Reibrost (Bild 6.1-3), so kann dieser, wenn er in trockener Form vorliegt, als Pulver aus der Kontaktzone austreten; zeitabhängige Spielvergrößerung, Veränderung der Kontaktfläche und Beanspruchungsverlagerung sind die Folgen. Bleibt der Reibrost als harter, lackartiger Film zwischen den Kontaktflächen, so führt das mit der Zeit zur Spielverkleinerung und im Extremfall zum Verklemmen und Festsitzen. Solche Schäden wurden z.B. an Schubumkehrerlagern und Leitschaukelverstellungen (Bild 6.2-14) beobachtet. Falls mit dem Festsitzen die Dämpfung eines Bauteils deutlich verringert wird kann dies zu einer stärkeren Schwingerregung mit der Gefahr von Schwingerermüdungsbrüchen führen. Die Schwingerermüdung muss in diesem Fall nicht notwendigerweise auf die Frettingzone beschränkt bleiben.

Die (mittlere) **Gleitgeschwindigkeit** bei schwingender Beanspruchung ist eine Funktion der Schwingweite (Mikrobewegung) und der **Frequenz**. Während eines Schwingungsvorgangs ändert sich die Gleitgeschwindigkeit dauernd. Bei sinusförmiger Schwingung wird die Geschwindigkeit an den Umkehrpunkten Null, in „Bewegungsmitte“ hat sie ein Maximum. Die mittlere Gleitgeschwindigkeit einer oszillierenden Bewegung ist bei Verschleißvorgängen von der Gleitgeschwindigkeit einsinniger Bewegung zu unterscheiden. Beide Vorgänge können sehr unterschiedliche Verschleißmechanismen auslösen (Bild 6.1-17).

Bei langsamen Bewegungen, z.B. infolge der Scheibenaufweitung während des Hochfahrens des Triebwerks mit nachfolgenden langen Haltezeiten (häufig Stunden), ist die Angabe einer mittleren Gleitgeschwindigkeit über den gesamten Bewegungszyklus wenig sinnvoll. Besser ist es, die Geschwindigkeit beim Gleitvorgang anzugeben. Diese Gleitgeschwindigkeit ist mitbestimmend für die Reibwärme an den Gleitflächen, damit hat sie einen wichtigen Einfluß auf die Oxidbildung während der Verschleißbewegung. Diese Oxide beeinflussen ihrerseits, in Abhängigkeit von ihrer Zusammensetzung (z.B. bei Stahl FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Bild 6.1-17), die Reibverhältnisse, insbesondere den Reibbeiwert und den Verschleiß. Die Geschwindigkeit der Mikrobewegung ist deshalb von besonderer Bedeutung für den Verschleißvorgang (Bild 6.1-18).

Der **Frequenzeinfluß** ist zum Teil im Amplituden-, Geschwindigkeits- und Haltezeiteneinfluss enthalten. Im allgemeinen kann man bei gleicher Amplitude einen deutlichen Anstieg des Verschleißes und der Verschleißgeschwindigkeit mit der Frequenz erwarten, da sich die Zahl der Verschleißbewegungen pro Zeiteinheit erhöht. Erfahrungsgemäß nimmt die Amplitude am Schaufelfuß mit steigender Schwingfrequenz des Schaufelblattes ab, weil die dämpfende Reibungsarbeit und so die einzuspeisende Schwingungsenergie zunehmen. Auch haben gewöhnlich Schwingungen höherer Ordnung kleinere Amplituden als die Grundbiegeschwingung und eine Schwingform (Knoten) die kaum Bewegungen im Schaufelfuß induziert. Damit lässt sich erklären, warum in der Praxis oft mit steigender Frequenz der Verschleiß kleiner wird. Wird infolge der höheren Frequenz mehr Reibungswärme erzeugt, kann dies je nach Werkstoff und eventuell vorhandenen Gleitschichten, das Verschleißverhalten ändern.

Es hat sich gezeigt, dass hochfrequente Schaufelschwingungen auf Grund der Vibration der Auflageflächen zu einem deutlichen **Abfall der Reibung** in Schaufelfüßen führen können. Dadurch entstehende höhere **Fixierungskräfte** gegen axialen Versatz der Schaufeln sind gegebenenfalls zu berücksichtigen.

Die **Haltezeiten** an den Umkehrpunkten der Schwingung („Ratterschwingungen“, „stick-slip-Effekt“) oder zwischen Zeiten in denen Schwingungen auftreten, beeinflussen die Losreißkräfte bei Beginn einer neuen Verschleißbewegung (Bild 6.1-15.2 und 6.1-21). Bei Haltezeiten im Sekundenbereich steigt der Reibbeiwert werkstoffabhängig (z.B. Härte und Festigkeit der Verschleißpartner) abhängig von der Oberflächentopografie (Form und Größe der Rauigkeit) und der Flächenpressung stark an, bis zu dem Wert der ruhenden Reibung. Dieser Vorgang beeinflusst entscheidend das Auftreten und die Frequenz von „stick-slip-Effekten“, die sich durch Geräusche, wie (Bremsen-) Quietschen oder Rattern, anzeigen. Bei sehr kurzen Haltezeiten, die z.B. am Umkehrpunkt hochfrequenter Schwingungen vorliegen, dürften die Unterschiede der Reibkräfte gegenüber der Maximalgeschwindigkeit weit weniger gravierend sein, als bei niedrigfrequenten Bewegungen mit langen Haltezeiten. Solche Haltezeiten treten während längerer konstanter Rotordrehzahl oder bei abgestelltem Triebwerk auf. Zu berücksichtigen ist, dass die Flächenpressung bei Triebwerksstillstand sehr klein ist (wenn kein Verklemmen des Schaufelfußes vorliegt). In diesem Fall hat die Haltezeit einen anderen Einfluß als bei voller Drehzahl. Abhängig von den Haltezeiten werden die Anteile von adhäsivem und abrasivem Verschleiß bei hochfrequenten Schwingungen anders als bei niedrigfrequenten sein. Es ist anzunehmen, dass sich dies z.B. auf die Verschleißprodukte und damit auf den zeitlichen Verlauf des Verschleißabtrags und auf die Verschleißkräfte auswirkt. Eine weitere Auswirkung dürfte die Haltezeit auch auf Oxidations- und Korrosionsvorgänge in der Kontaktzone haben. Der Einfluß auf den Verschleiß dürfte um so größer sein, je länger und intensiver oxidierende und korrosive Medien während der Haltezeiten Zutritt zur Kontaktzone haben. Bei Triebwerken ist dies im Stillstand, wenn die Schaufeln nicht fliehkraftbelastet und gewöhnlich locker sind, in besonderem Maß gegeben.

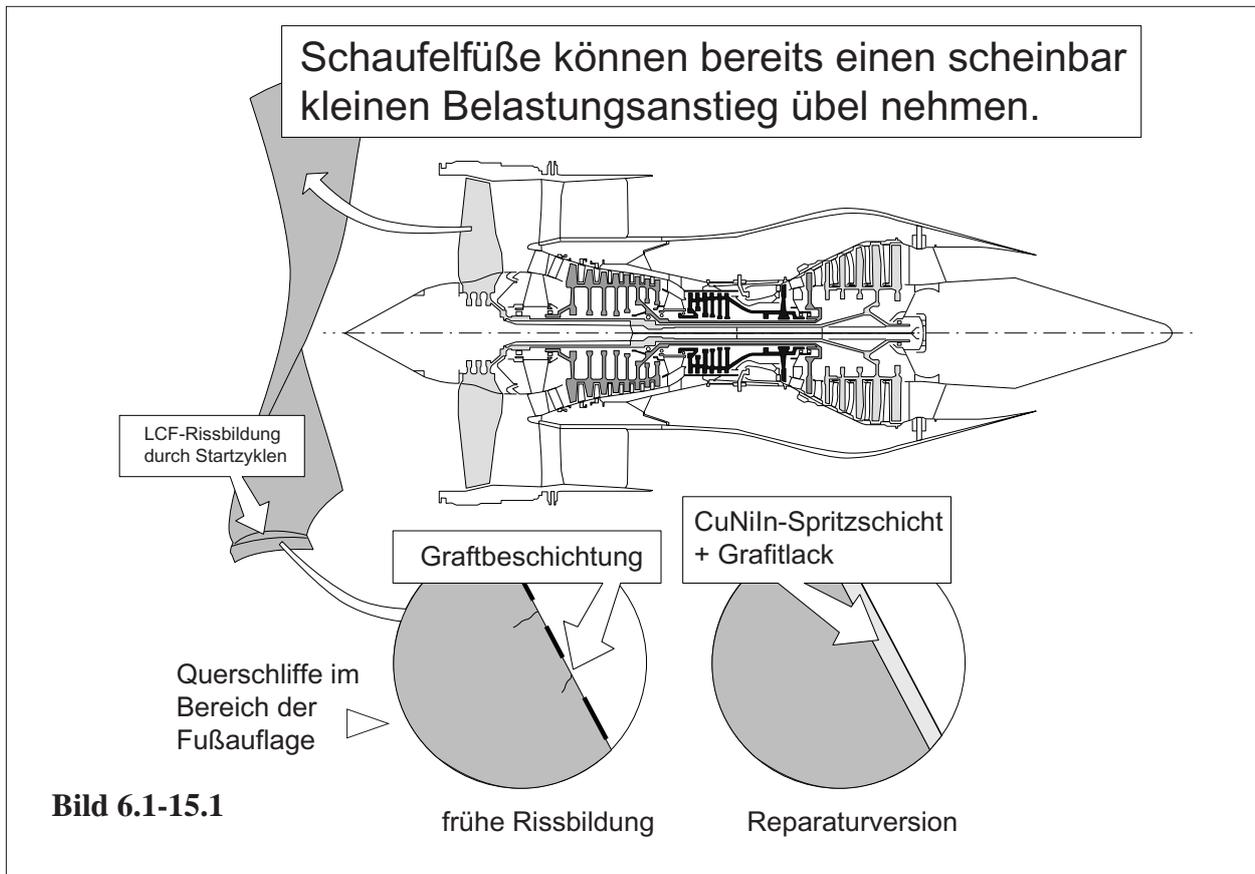
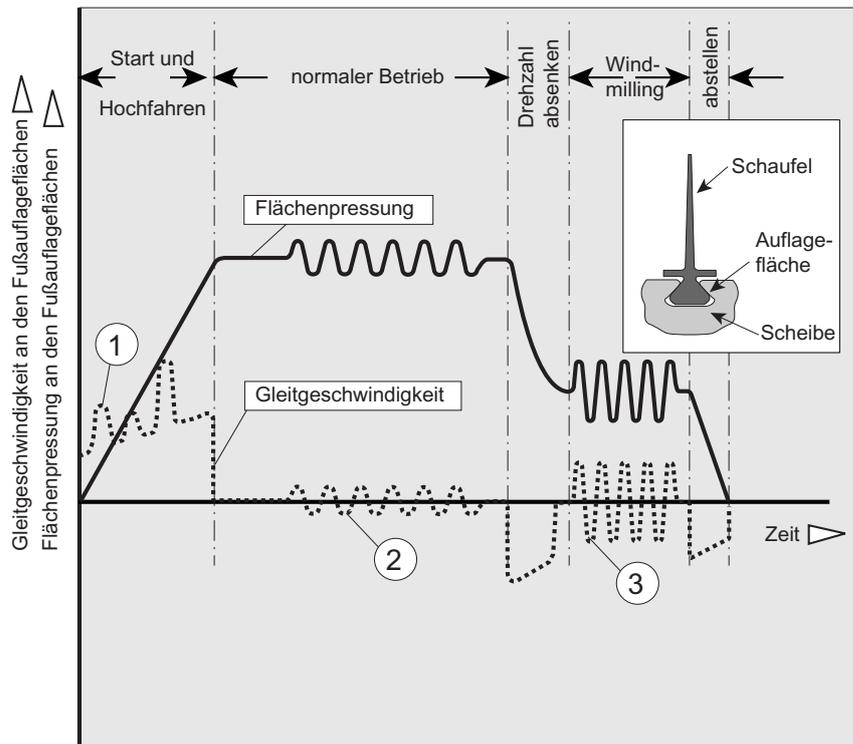


Bild 6.1-15.1 (Beispiel 6.1-1, Lit 6.1-17): Bereits eine geringe Belastungserhöhung über der, die sich in Triebwerksversionen geringerer Leistung bewährte, führte zur Ermüdungsrissbildung (LCF) an den Auflageflächen der Fan-Schaufelfüße. Es musste von einer **Grafitbeschichtung** auf eine **CuNiIn-Spritzschicht** (duktile Anpassung der Anlageflächen, Verschleißschutz) mit einem zusätzlichen **Grafitprühlack** (geringer Reibbeiwert führt zu niedrigeren Schubbelastungen in der Auflagefläche) umgestellt werden (Details unten).

Bild 6.1-15.2: Die Gleitgeschwindigkeit durch Mikrobewegungen und die Flächenpressung ändern sich während des Triebwerksbetriebs häufig und deutlich (siehe auch Bild 6.1-21). Dadurch verändern sich auch viele, den Schwingverschleiß beeinflussende Parameter. Die im jeweiligen Fall den Verschleißprozess steuernden Parameter sind in Schadensanalysen weitmöglichst zu ermitteln, um betriebsnahe Versuchsparameter zum Nachweis von Abhilfen oder Verbesserungen zu erhalten.

Beim Hochfahren des Triebwerks (Beispiel 6.1-1) sind auf Grund der Scheibenaufweitung am Schaufelfuß „stick-slip“-Bewegungen zu erwarten, die sich in entsprechenden Änderungen der Gleitgeschwindigkeit zeigen. Schwingt die Schaufel bei diesem Vorgang hochfrequent, so kann dies zu einer merklichen Absenkung der Reibbeiwerte führen (ähnlich wie das Abgleiten von Sand auf einer vibrierenden schrägen Fläche, Bild 6.1-16). Bei ho-

Die Verschleißbewegungen können an der gleichen Bauteilzone in den verschiedenen Betriebsphasen deutlich unterschiedlich sein.



- ① starke Gleitgeschwindigkeitsschwankungen auf Grund des "Stick Slip"-Effekts.
- ② Schaufelschwingungen in normaler (nicht zur Ermüdung führender) Größe, bedingen wegen der hohen Flächenpressung am Fuß lediglich (wenn überhaupt) kleine Relativbewegungen und -geschwindigkeiten.
- ③ Periodische Gleitbewegungen infolge von Schaufelschwingungen. Wegen der relativ niedrigen Pressung an der Schaufelfußauflage (z.B. bei niedriger Drehzahl bei Windmilling) können die Gleitgeschwindigkeiten relativ hoch werden.

Bild 6.1-15.2

hen Drehzahlen ist üblicherweise die Fliehkraft so hoch, dass größere Relativbewegungen an den Auflageflächen der Schaufeln verhindert werden. Bei Schaufel- und/oder Scheibenschwingungen kommt es trotzdem auf Grund der Steifigkeitsunterschiede zu Mikrobewegungen.

Die relativ niedrigen Drehzahlen bei einem im Flug abgeschalteten Triebwerk, das lediglich vom Fahrtwind angetrieben wird (**Windmilling**), ergeben nur geringe Anpresskräfte. So können Schaufelschwingungen große hochfre-

quente Relativbewegungen bei niedriger Flächenpressung erzeugen. Hierbei ist ein örtliches Abheben und wieder aufschlagen (Hämmern) der Kontaktflächen möglich. Diese Verschleißform kann sich werkstoffspezifisch von reinem Gleitverschleiß unterscheiden, z.B. durch Ausbrüche infolge Schwingermüdung. Windmilling begünstigt so Schwingverschleiß am Schaufelfuß und gegebenenfalls an Clapperauflagen.

Der Abfall des Reibbeiwerts bei Relativbewegungen der Auflageflächen kann die axiale Schaufelfixierung unerwartet hoch belasten.

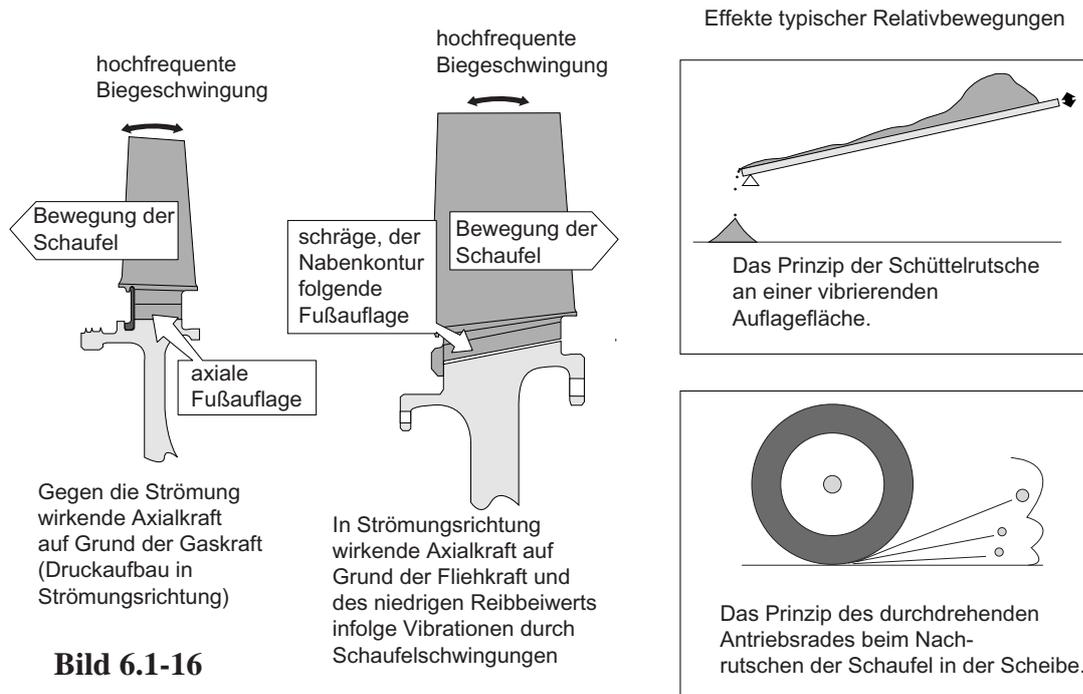


Bild 6.1-16: Der Reibbeiwert beeinflusst die Belastung der axialen Fixierung von Rotorschaukeln. Bei Verdichterschaukeln tritt üblicherweise eine aus den Gaskräften resultierende Axialkomponente gegen die Strömungsrichtung (nach vorne, siehe auch Bild 6.2-5.2) auf. Bei Turbinenschaukeln zeigt die Kraftkomponente in Strömungsrichtung (nach hinten).

Führt man sich die eigentlich triviale Tatsache vor Augen, dass die Reibkraft richtungsunabhängig ist wird verständlich warum beim **Gleiten der Auflageflächen** zusätzlich einwirkende Kräfte keinen Widerstand durch Reibkräfte erfahren. Der **Reibbeiwert ist zu diesem Zeitpunkt nahe Null**.

Ein solcher Zustand tritt bei gefügten Bauteilen, insbesondere bei Rotorschaukeln, in zwei typischen Fällen auf:

Vibrieren die Schaufeln und/oder die Scheibe ausreichend stark, so dass Mikrobewegungen an den Auflageflächen entstehen, werden die Reibungskräfte, ähnlich wie bei einer **Schüttelrutsche** (Skizze rechts oben), deutlich reduziert. Wandern als Folge die Schaufeln axial, werden die Fixierungen unerwartet hoch belastet. Dieser Effekt ist dann besonders ausgeprägt, wenn große Schaufeln, wie Fanschaufeln, auf Grund der Nabenkontur mit schräg nach außen verlaufenden Fußauflageflächen versehen sind (mittlere Skizze). Ist in diesem Fall die axiale Fliehkraftkomponente deutlich größer als die der Gaskraft, erfolgt ein möglicher Schaufelversatz in Strömungsrichtung.

Der selbe Effekt, jedoch deutlicher, wurde im Vertikalschleuderstand (im Vakuum, d.h. ohne Gaslast) beobachtet. Hier kam es beim **Hochfahren** eines Fanrotors mit schrägen Fußauflageflächen, ohne dass merkliche Vibrationen einwirkten, zu einem **plötzlichen axialen Versatz der Schaufeln** in

vertikaler Richtung nach oben unter Aufzehrung des Axialspiels von einigen Zehntel Millimetern. Offenbar führte die **Aufweitung der Verdichterscheibe unter den Fliehkräften zu einem Nachrutschen der Schaufeln mit einem entsprechenden Abfall des Reibbeiwerts. Dieser Vorgang lässt sich mit dem Verlust der Führung drehender Antriebsräder** (Skizze rechts unten) vergleichen. Der Versatz trat bei den einzelnen Schaufeln zu unterschiedlichen Zeiten ein, was zu großen Unwuchten führte. Die massiven Haltenasen erfuhren derart hohe Stoßbeanspruchungen, dass es zu deutlichen plastischen Verformungen kam. Erst eine Verstärkung und ein in axialer Richtung spielfreier Einbau konnten das Problem lösen.

Beispiel 6.1-1 (Lit 6.1-17, Bild 6.1-15.1):

Zitat: „.....(the OEM) is to issue service bulletins to all..... operators which will revise, and in most cases alleviate, the tight inspection intervals for the engine’s fan blades which have been in place since the failure of a blade on a Emirates (aircraft) in Melbourne, Australia earlier this year.

Intensive tests conducted by the engine maker have confirmed the failure was caused by differential **stresses imposed on the blade root by patchy lubricant**, rather than by a fundamental design flaw, as some operators had initially feared.

The fix is the use of Metco 58, a copper-nickel-indium alloy coating material, which had been introduced into the ...fan blade production process last July. **The failed blade was an earlier production unit which had been coated with a graphite-based paint called PL 237.** Tests showed that under high thrust settings, this becomes patchy and causes stresses to build up in the blade root, resulting in cracks.

...a fleet wide inspection of all fan sets (124 aircraft in service plus spares) revealed four cracked blades....after the completion of tests the UK Civil Aviation Authority is likely to

‘move the inspections out to 1,200 cycles in most cases...

Under an amendment to a Federal Aviation Administration airworthiness directive issued in February, operators have been required to inspect....at intervals as often as every 200 cycles in the case of the higher thrust... (engine) versions.

Even the lower powered (engines)...required inspection every 400 cycles...

Tests proved that the phenomenon only affected the higher power engines...

The fan root requires lubricating because, under acceleration, the energy of the fan forces the disc to dilate. The blade, which has a curved root, then sits further out in the dovetail fitting. Under deceleration, the blade root slides back as the disc returns to its original shape.

Lubrication is required to ease the friction between the blade root and the dovetail, and the cracks occurred when the original lubricant became patchy under high thrust loads. **This allowed parts of the surface to stick**, which caused differential stresses to build up and eventually cracks to appear.“

Kommentar: Der betroffene Triebwerkstyp ist ein modernes großes Fantriebwerk mit hohem Bypass-Verhältnis. Der schädigende Vorgang wird in Bild 6.1-15.2 beschrieben. Dieser Fall demonstriert wie sehr die kritische Fußbelastung von der Auswahl des richtigen teilespezifischen Tribosystems abhängt.

In Lit 6.1-18 wird berichtet, **dass der Metco 58 Belag durch Flammgespritzten aufgebracht wird. Danach wird wieder eine Grafit-Gleitschicht jedoch als Aerosol aufgebracht.** Es wird auch hier betont, dass die Rissbildung nur an besonders hoch belasteten Triebwerkversionen auftrat. Dies zeigt, dass gerade an den **Auflageflächen von Verdichterschaufeln aus Titanlegierungen kleine Belastungserhöhungen zu gravierenden Schäden** führen können.

Korrosive und oxidierende Einflüsse auf den Schwingverschleiß

Korrosive Einflüsse wirken aus der umgebenden Atmosphäre, wenn kein ausreichend dichter Kontakt der Anlageflächen besteht. Bei Verdichterschaufeln handelt es sich in erster Linie um eine Salzlösung, die durch **Schwitzwasserbildung** in **Meeresatmosphäre** entsteht. Reiboxidation wird bei korrosionsempfindlichen Werkstoffen, wie Al-Legierungen und Stählen, gewöhnlich mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit verstärkt.

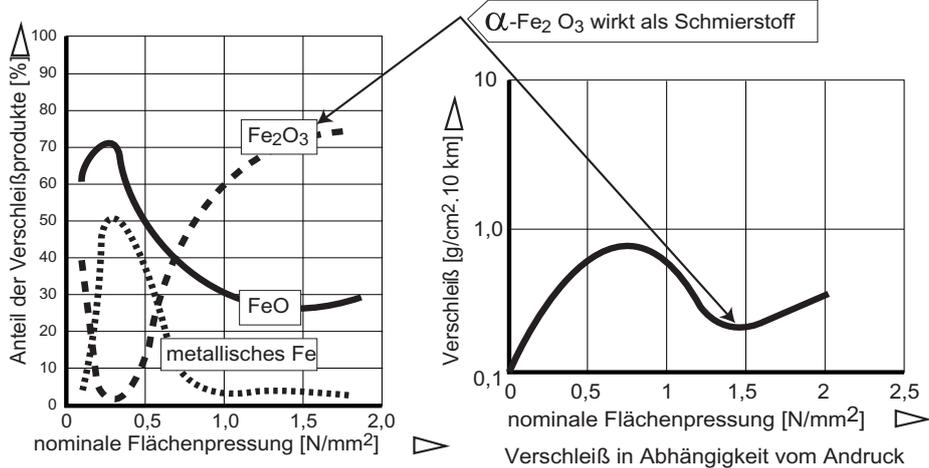
Wenn in den hinteren Verdichterstufen merkliche Schwingungen auftreten, sind die Betriebstemperaturen bereits so hoch, dass kein wässriges Korrosionsmedium mehr vorliegt.

Eine weitere Schädigungsmöglichkeit besteht in der **Zersetzung von Gleitschichten** durch die Betriebstemperaturen und/oder die Reibungswärme und die mechanische Beanspruchung im Fertigungsprozeß. An den Reibflächen im Verdichter sind Temperaturen von 200-500°C üblich. „Temperaturblitze“ im direkten Kontakt der Rauigkeiten liegen jedoch weit höher. Dies erhöht die Oxidationsneigung frisch erzeugter metallischer Verschleißflächen. Der zum Verdichteraustritt hin steigende **Luftdruck** (je nach Triebwerk heute deutlich über 30 bar) erhöht entsprechend das Sauerstoffangebot und die Oxidationsneigung (Bild 6.1-17).

Verschleißprodukte, insbesondere Oxide beeinflussen das Verschleißverhalten. Sie können den Verschleißvorgang beschleunigen. Wirken sie jedoch als Gleitschicht, wird dadurch erst ein befriedigendes Betriebsverhalten erreicht. Bei Superlegierungen, insbesondere auf Kobaltbasis (in Brennkammern) gewährleistet die Bildung von Oxiden ein gutes Verschleißverhalten bei erhöhter Temperatur (Bild 6.1-18).

***Bild 6.1-17:** Die Art und Menge der Verschleißprodukte kann je nach Werkstoff entscheidend von der Flächenpressung beeinflusst sein (Diagramme oben). Bei Versuchen ist deshalb auf betriebsnahe Flächenpressung zu achten. Stähle zeigen eine besonders ausgeprägte Bildung von Oxiden (Fe_2O_3 und Fe_3O_4) mit unterschiedlichen Verschleißseigenschaften. In der Kontaktzone ist, entsprechend dem unteren Diagramm, bereits bei relativ niedrigen Gleitgeschwindigkeiten mit örtlichen Schmelztemperaturen zu rechnen. Wird die Grenzdicke der Oxidschicht durchbrochen kommt es zum mechanischen Abtrag.*

Das Verschleißverhalten wird entscheidend von der Art bzw. dem Verhalten der Verschleißprodukte bestimmt.



Zusammensetzung der Verschleißprodukte in Abhängigkeit vom Druck (nach Dies und Mailänder).
 Materialkombination: weicher Stahl/Cr-Stahl vergütet,
 kein Schmierstoff

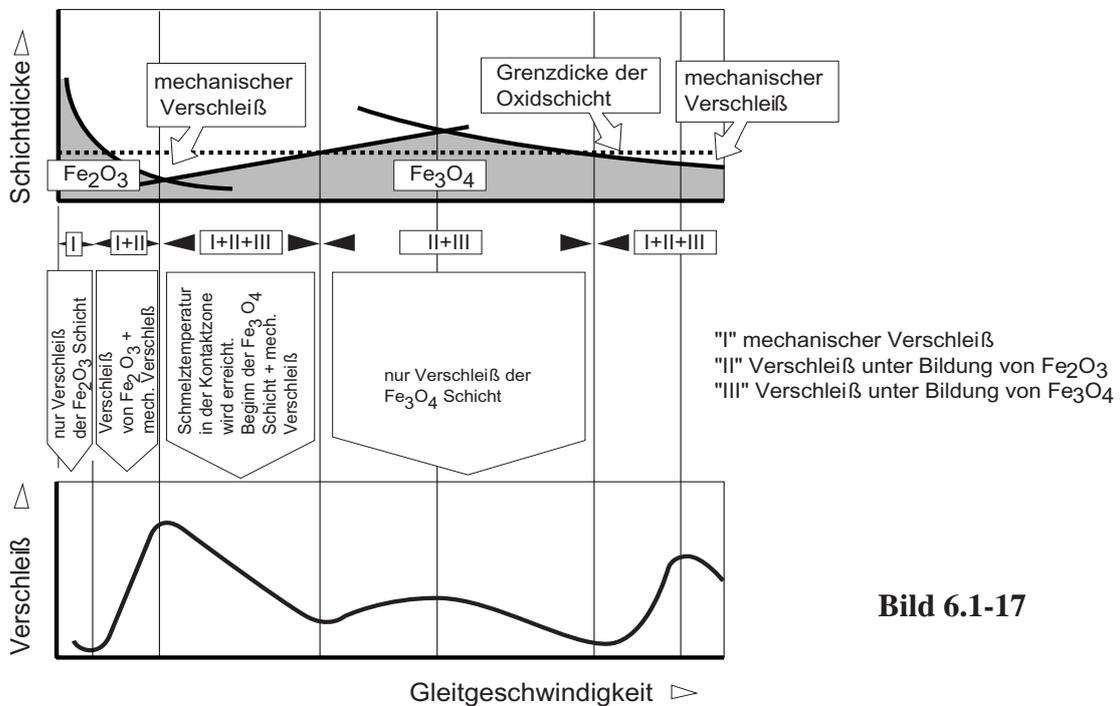


Bild 6.1-17

Verschleiß und Verschleißprodukte in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit beim Verschleißsystem Stahl auf Stahl (nach Yashimoto)

Werkstoffeinfluss auf den Schwingverschleiß

Ein Werkstoff erfährt durch Fretting unterschiedliche Schädigungen.

Der Abtrag bei abrasivem oder adhäsivem Verschleiß, der durch Pittingbildung infolge von Ermüdungsrissen unter der Oberfläche verstärkt werden kann, führt zu Maßänderungen.

Abfall der Schwingfestigkeit durch makrorissbildende Ermüdungsvorgänge. Die Schwingfestigkeit wird durch das Anstrengungsverhältnis (Bild 6.1-11) charakterisiert. Beide Schädigungsformen werden von Faktoren beeinflusst, deren Auswirkung von der Werkstoffpaarung abhängt:

- Neigung zum Kaltverschweißen („Fressen“) und zur Legierungsbildung erhöht die Reibkräfte und den Verschleiß. Superlegierungen und besonders Titanlegierungen neigen zu diesem Schadensmechanismus.

- Mit steigender Härte bzw. Festigkeit verringert sich im allgemeinen die abrasive Verschleißwirkung. Eine Kaltverfestigung kann sich unterschiedlich auswirken. Erhöht sie die Reaktivität steigt der Verschleiß. Die Festigkeitssteigerung wirkt dagegen verschleißmindernd.

- Der Abfall der Schwingfestigkeit durch Fretting steigt mit der Kerbempfindlichkeit des Werkstoffes.

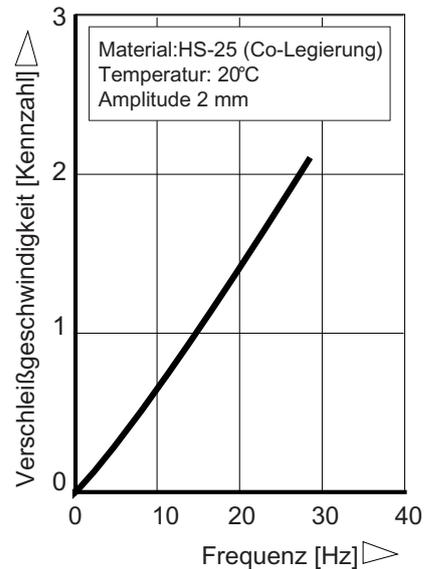
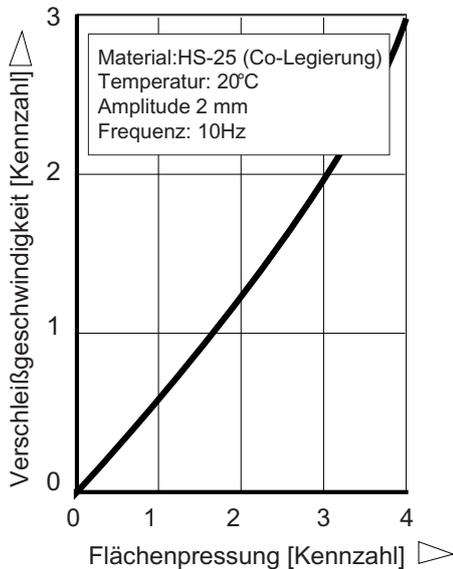
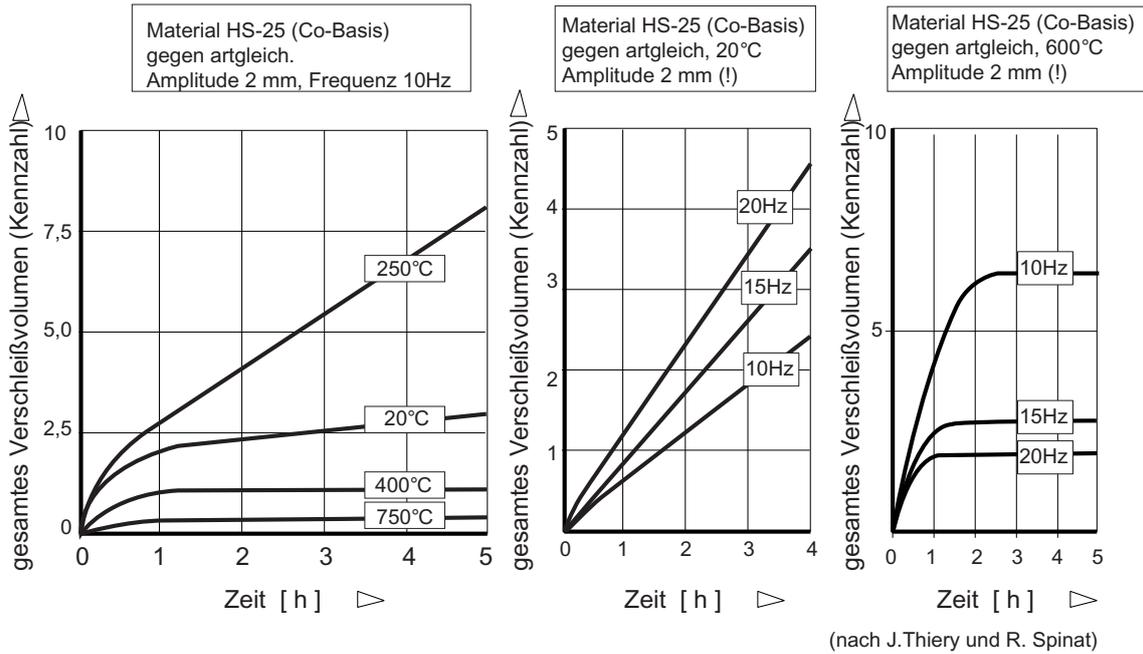
- Die Bildung von Oxiden beeinflusst das Gleitverhalten entscheidend. Oxide können wie ein Trockenschmierfilm wirken (Bild 6.1-15 und 6.1-18), sie können aber auch zum Verklemmen und Fressen führen (Bild 6.2-14). Es kann deshalb entscheidend sein, dass **Neuteile die im Betrieb merklich oxidieren vor dem Einbau voroxidiert** werden. Damit verbessert sich in der für das Frettingverhalten entscheidenden Anfangszeit von ca. 100 Bewegungszyklen der Widerstand gegen eine Schädigung durch Kaltverschweißen („Fressen“). Dieser Effekt ist besonders bei Bauteilen für **zyklische Schleuderversuche im „Vakuum“** zu berücksichtigen.

- Je niedriger die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärme eines Werkstoffes, um so ausgeprägter die Aufheizung durch Reibung in den Kontaktzonen. Die Folge sind Spannungsänderungen (Wärmespannungen, Eigenspannungsänderungen), Gefügeveränderungen (z.B. Aufhärten, Anlassen) und Festigkeitsabnahme (z.B. Abbau von Verfestigungen, Oxidation).

- Je geringer die Gefügestabilität des Werkstoffes, um so eher verändern ihn die reibungsbedingte Wärmeeinwirkung und/oder die Verformungsprozesse. Gefügeumwandlungen wie Überalterung (bei Al-Legierungen), Aufhärten oder Anlassen bei martensitischen Stählen, Veränderung der Gefügeanteile bei Titanlegierungen und Bildung von Verformungsmartensit bei austenitischen Cr-Ni-Stählen sind die Folgen.

Besonders empfindlich gegenüber Frettingermüdung verhalten sich Titanlegierungen (Bild 6.1-19). Der Abfall der Schwingfestigkeit kann 20% des Wertes ohne Fretting erreichen. Mit steigender Betriebstemperatur fällt nach Bild 6.1-18 die Schwingfestigkeit bei Fretting weiter ab. Ähnliches gilt für hochfeste Al-Legierungen. Weniger empfindlich sind dagegen Cr-Stähle und Ni-Basis-Schmiedelegerungen. Verschleißversuche an einer Vielzahl von Werkstoffkombinationen mit und ohne Gleitschichten wurden veröffentlicht. Metallische Zwischenlagen (Kupfer) mit gleichzeitiger Gleitlackbeschichtung zeigen die besten Versuchswerte. In der Praxis haben sich im unteren Temperaturbereich kugelgestrahlte Oberflächen und Gleitschichten auf Grafitbasis bewährt (Bild 6.1-19). Bei erhöhten Temperaturen, die zu einer beschleunigten Oxidation des Grafitlacks führen würden, scheinen metallische Spritzschichten (Bronzen) auf Schaufelfüßen aussichtsreich.

Eine Vielzahl von Parametern wie Temperatur, Frequenz und die Größe der Relativbewegung, Gleitgeschwindigkeit und Flächenpressung können das Frettingverhalten merklich beeinflussen.



Verschleißgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Flächenpressung und Frequenz bei Frettingbeanspruchung.

Bild 6.1-18

Beschreibung von Bild 6.1-18 nächste Seite

Bild 6.1-18 (Lit 6.1-14): Für eine Kobaltbasislegierung, wie sie z.B. bei Turbinenleitschaufeln der Hochdruckstufen oder in Brennkammern zur Anwendung kommt, wird der Schwingverschleiß in Abhängigkeit von Temperatur, Flächenpressung, Verschleißfrequenz und Zeit dargestellt.

Bei 250 °C ist ein Schwingverschleißmaximum zu beobachten (Diagramm oben links). Mit steigender Betriebstemperatur nimmt der Schwingverschleiß deutlich ab und liegt merklich niedriger als bei Raumtemperatur. Ursache für dieses Verhalten ist die Bildung verschleißmindernder Oxide.

Mit steigender Schwingfrequenz nimmt der Verschleiß bei 20°C im Bereich von 10-20 Hz näherungsweise linear zu (Diagramm oben mitte und unten rechts). Dieses Verhalten stimmt mit der Zunahme des Verschleißwegs plausibel überein, wenn man von einem adhäsiven und abrasiven Verschleißmechanismus ausgeht. Der deutliche Anstieg der Verschleißgeschwindigkeit mit der Flächenpressung bei niedrigen Temperaturen ist ein weiteres Indiz für metallischen Kontakt, Verschleißfläche und dabei ablaufende Freßvorgänge. Dies unterstützt die Annahme, dass der relativ hohe Verschleiß bei niedrigen Temperaturen auf fehlende schmierende Oxide zurückzuführen ist.

Im Temperaturbereich von 600°C (Diagramm oben rechts) ist genau das umgekehrte Verhalten wie bei 20°C zu beobachten. Mit steigender Schwingfrequenz nimmt das Verschleißvolumen deutlich ab. Dies läßt auf einen anderen Verschleißmechanismus schließen, der zum Aufbau einer Verschleißschicht (wahrscheinlich einer Oxidschicht) führt.

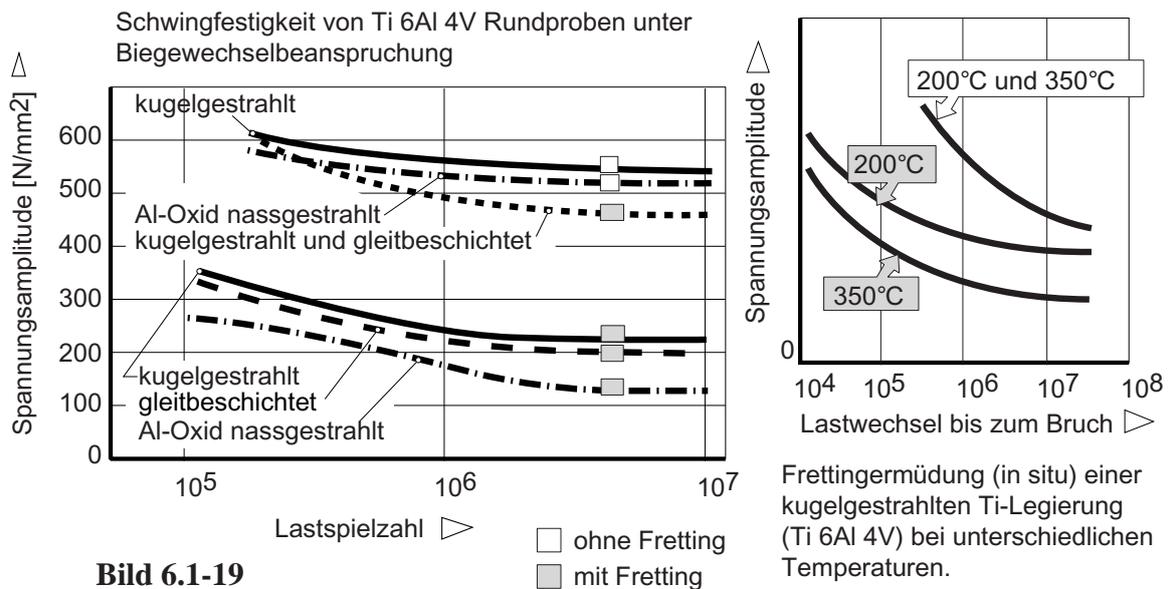
Beobachtungen weisen darauf hin, dass eine **Voroxidation** bei Nickellegierungen den Verschleiß der Schaufelfüße und den Verschleiß in den Scheibennuten drastisch vermindern kann. Dabei sind die ersten ca. 100 Start/Abstell Zyklen von entscheidender Bedeutung für den Langzeitverschleiß. Dieses Verhalten ist auch bei **zyklischen Schleuderversuchen in Prüfständen** zu berücksichtigen.

Bild 6.1-19: Die **Frettingempfindlichkeit** der Titanlegierung Ti 6Al 4V steht hier als typisches Beispiel für diese Legierungsgruppe. Die Untersuchungen (Diagramm links, Lit. 6.2-1) wurden mit Andruckklötzchen und Flachproben (Bild 6.1-13) bei Raumtemperatur durchgeführt. Ohne Frettingeinfluss erhält man kugelgestrahlt oder abrasivgestrahlt nahezu gleich hohe Schwingfestigkeitswerte. Nur kugelgestrahlt oder nur gleitbeschichtet ergibt unter Frettingeinfluss ähnlich schlechte **Schwingfestigkeiten von ca. 30 % des Wertes ohne Fretting**. Dies ist erstaunlich, da üblicherweise davon ausgegangen wird, dass Kugelstrahlen alleine für die Anhebung der Schwingfestigkeit unter Fretting verantwortlich ist. Zumindest für die vorliegenden Verschleißparameter (z.B. Raumtemperatur) gilt die **positive Wirkung des Kugelstrahlens** offenbar nicht. Den größten Schwingfestigkeitsabfall zeigen erwartungsgemäß abrasiv gestrahlte Proben unter Fretting, da hier, bei hoher Rauigkeit, keine nennenswerte Verfestigung vorliegt und in die Oberfläche eingelagerte Abrasionspartikel die Schädigung unterstützen können.

Am besten verhalten sich Proben bei denen die Oberfläche kugelgestrahlt und gleitlackbeschichtet wurde. Diese Proben erreichen unter Fretting ca. 80% der Schwingfestigkeit ohne Fretting. Eine Erklärung für dieses Verhalten wäre die Reservoirwirkung der Kalottenstruktur der Oberfläche in Kombination mit der Gleitlackbeschichtung. Auch hier scheint sich wieder der entscheidende Einfluss eines niedrigen Reibbeiwerts zu zeigen. Ein niedriger Reibbeiwert vermindert die Anstrengung und wirkt so schwingfestigkeitsverbessernd (Bild 6.1-11 und 6.1-12).

Im rechten Diagramm ist zu erkennen, dass zumindest bis Temperaturen um 350°C mit steigender Temperatur im Gegensatz zu nicht frettingbeeinflussten Proben ein weiterer Schwingfestigkeitsabfall eintritt. Anscheinend bilden sich noch keine schützenden Oxidschichten.

Titanlegierungen haben sich als besonders frettingempfindlich erwiesen. Kugelstrahlen und Gleitlackbeschichtung haben sich zur Behandlung der Kontaktflächen bewährt.



Es sei darauf hingewiesen, dass diese Angaben noch keinen Schluss auf das Verhalten im Grenzbereich der Einsatztemperatur um 500°C zulassen, weil dann eine merkliche Oxidation erfolgt (siehe Bild 6.1-20). Ob sich Gleitlack auf die Schwingfestigkeit günstig auswirkt, dürfte entscheidend von der Flächenpressung (Durchreiben der Schutzschicht) und der Temperatur (Oxidation des Gleitlacks) abhängen. Die Abnahme der Schwingfestigkeit als Folge eines **Nachlassens der Verfestigung des Kugelstrahlens (Kriechen bei erhöhter Temperatur)** ist dagegen für Titanlegierungen offenbar weniger kritisch. Kugelgestrahlte Proben weisen offenbar eine lediglich geringfügig höhere Schwingfestigkeit mit und ohne Fretting auf als abrasiv gestrahlte Proben ohne deutlichen Verfestigungseffekt.

Bild 6.1-20: Wie stark das Verhalten eines Werkstoffs bei **Schwingverschleiß von den Betriebseinflüssen**, insbesondere der Betriebstemperatur, abhängig ist, soll dieses Beispiel zeigen. Eine mit einer metallischen Verschleißschutzschicht versehene Verdichterro-

schaufel aus einer hochfesten Titanlegierung verhält sich unter Frettingbedingungen im hinteren Verdichterbereich („B“) zufriedenstellend, während die unbeschichtete aber kugelgestrahlte Schaufel nach kurzen Betriebszeiten durch Schwingermüdung im Frettingbereich versagt.

Es kommt unter der hohen Flächenpressung lediglich zu einer plastischen Verformung der Schutzschicht ohne Rissbildung in der Schicht oder dem Grundmaterial. Eine unzulässige Oxidbildung wird nicht beobachtet. Offenbar ist der Reibbeiwert bzw. die Anstrengung über die Betriebszeit so niedrig (Bild 6.1-10 und 6.1-11), dass eine Schwingermüdung nicht erfolgt. Die erhöhte Betriebstemperatur, möglicherweise zusammen mit einem relativ großen Sauerstoffangebot (hoher Druck), dürften das erwünschte Verhalten dieses Tribosystems entscheidend beeinflussen. Interessanterweise führt die für den hinteren Verdichterbereich typische relativ hohe Betriebstemperatur nicht zu einem starken Abfall der Schwingfestigkeit unter Fretting, wie er Bild 6.1-19 bei Extrapolation zu entnehmen wäre.

Das Betriebsverhalten von Schaufelfußbeschichtungen hängt entscheidend von den Betriebsparametern ab. Was sich in einer Stufe bewährt, kann in einer anderen Stufe versagen.

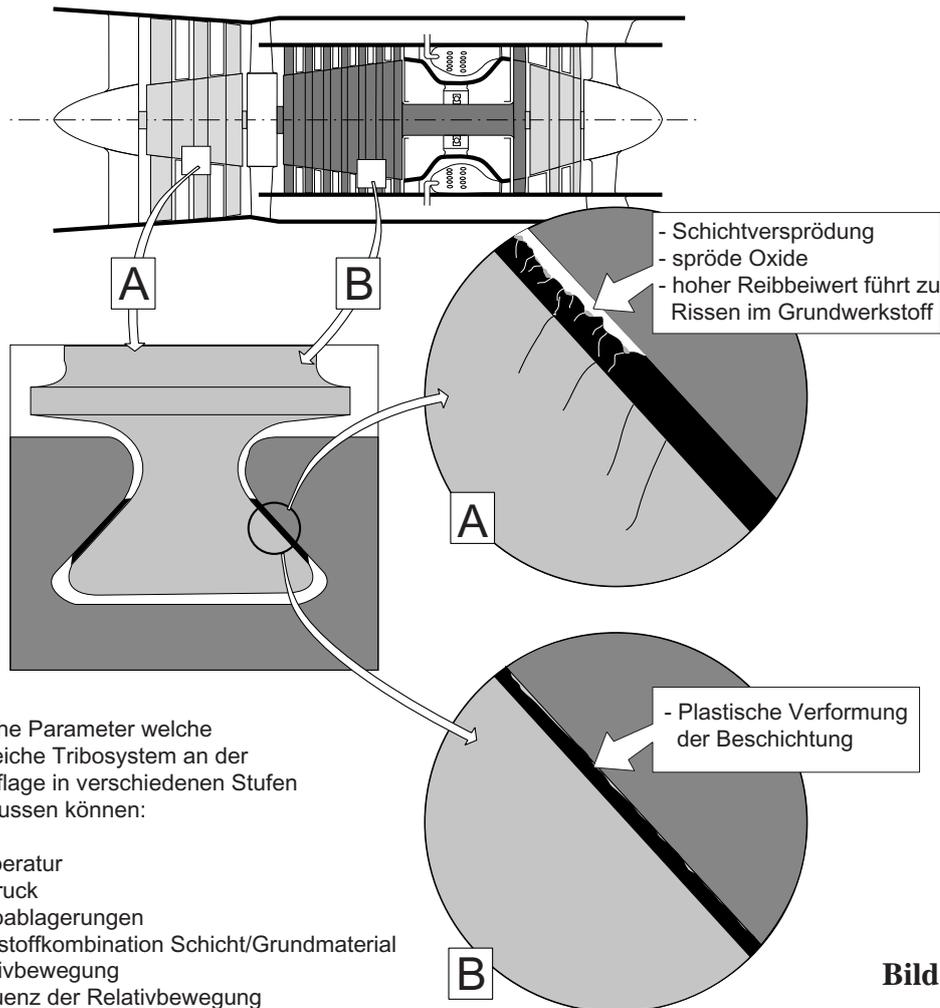


Bild 6.1-20

Beim Einsatz der gleichen Werkstoffkombination im vorderen Verdichterbereich („A“), d.h. bei niedrigeren Temperaturen, tritt eine Zerrüttung der Verschleißschicht mit eingedrückten Oxiden und Rissbildung auf. Der Grundwerkstoff zeigt ebenfalls Anrisse, was auf einen hohen Reibbeiwert bzw. eine hohe Anstrengung deutet. Erstaunlich ist die relativ starke Oxidbildung trotz der niedrigen Betriebstemperatur. Offenbar handelt es sich um eine Oxidform, die sich bei den vorliegenden Temperaturen spröde verhält und keine Schmiereigenschaften aufweist. In einem wech-

selseitigen Zusammenspiel zwischen Metallabrieb und Oxidbildung dürfte es zu hohen Reibbeiwerten kommen.

Bild 6.1-20.1 (Lit. 6.1-20): Im Auflagebereich der Zwischenstufendichtungen (engl. Spacer) an den Scheiben einer bestimmten Verdichterstufe (Skizze unten rechts) wurde nach langen Laufzeiten (über 13 000 Startzyklen) starkes **Fretting und Rissbildung** festgestellt. Anscheinend handelt es sich um **LCF-Risse** die von dem **Fretting** ausgelöst wurden (engl. fretting induced fatigue). Dieses steht offenbar im Zu-

Auch manche Korrosionsschutzschichten stehen im Verdacht eine Frettingschädigung zu begünstigen.

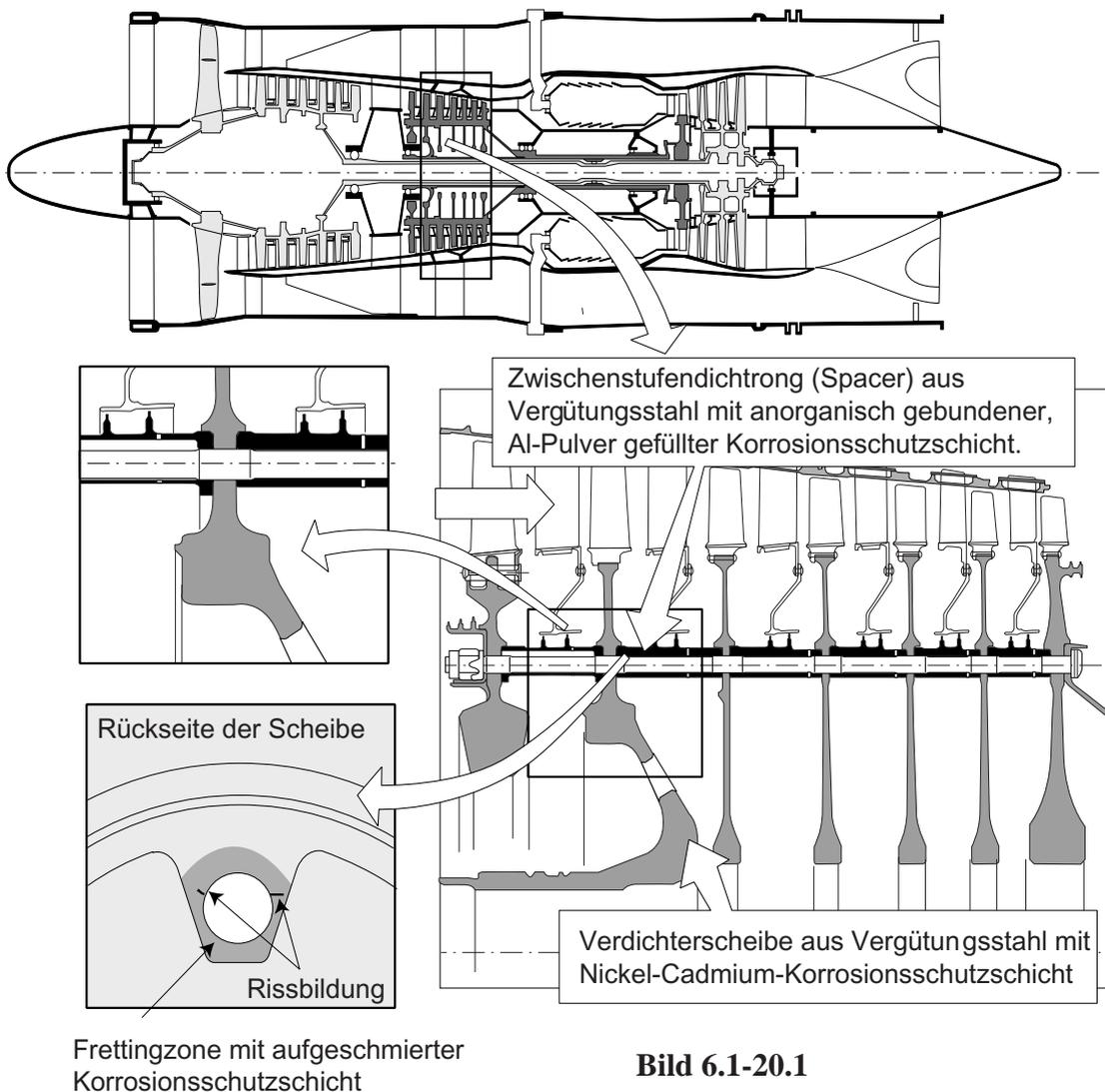


Bild 6.1-20.1

sammenhang mit **abgelöster Korrosionsschutzschicht** des Spacers. Es handelt sich um einen anorganischen Binder (Phosphat) der mit Al-Pulver gefüllt ist. Die Schicht wird in älteren Triebwerkstypen an einer Vielzahl von statischen und rotierenden Bauteilen aus hochfesten Stählen angewendet. Zumindest an freien Flächen hat sich die Schicht bestens bewährt und ist erfahrungsgemäß problemlos. Das gilt nicht für die Gegenschicht aus **Nickel-Cadmium (NiCd)** auf der Scheibe. Kommt Cd direkt mit dem Stahl der Scheibe in Kontakt, ist dies

äußerst bedenklich (Band4 Bild 16.2.1.8.3-8). Bei Betriebstemperatur kann Cd als LME (Lötrissigkeit) oder SMIE (Diffusion) **Risse auslösen**. Das dürfte der Fall sein, wenn die dünne Ni-Trennschicht unter dem Cadmium durch Fretting beschädigt wird. Möglich ist aber auch, dass bereits Fretting allein die Schwingfestigkeit für die Rissbildung ausreichend absenkte. Leider geht der Schadensmechanismus aus den vorhandenen Unterlagen nicht hervor.

Einfluß der Verschleißbewegung auf den Schwingverschleiß:

Abhängig von der Art der Verschleißbewegung, z.B. überwiegend **hämmernd, gleitend, abwälzend** oder einer Kombination dieser Bewegungen, treten unterschiedliche Oberflächenbeanspruchungen auf. Bei gleitender Bewegung (parallel zur Oberfläche) ist eher ein abrasiv geometrieverändernder Verschleißeffekt zu erwarten, beim Hämmern kann dagegen rissbildende Ermüdung überwiegen. Es liegen Erfahrungen vor, dass gerade Hämmerverschleiß besonders festigkeitsmindernd wirken kann. Die Entstehung und der Transport von Verschleißpartikeln ist ebenfalls von der Bewegungsart abhängig. Auf den Kontaktflächen von Schwalbenschwanzfüßen kommt es bei Schaufelschwingungen und Drehzahländerungen zu örtlich unterschiedlichen und sich verändernden Flächenpressungen. So kann eine Kippbewegung des Fußes bei niedrigen Fliehkräften (z.B. Windmilling oder Start / Abstellphase) zu den Scheibenhöckerkanten hin bevorzugt eine hämmernde Beanspruchung ermöglichen, während in Flächenmitte Gleitbewegungen überwiegen (Bild 6.1-21). Bei hohen Fliehkräften sind dagegen bei Schaufelschwingungen eher gleitende Mikrobewegungen zu erwarten.

Beim Anfahren eines Triebwerks, treten durch die elastische Aufweitung der Scheibe und damit elastischer Verformung im Fußbereich von Schaufel und Scheibennut in erster Linie gleitende Bewegungen auf.

Falls es während der Verschleißbewegung zu einem Abheben der Kontaktflächen und damit zu einer „**Pumpwirkung**“ kommt, von der Umgebungsmedien (z.B. Luft oder Wasser) in den Spalt gefördert werden und / oder Verschleißprodukte aus dem Spalt transportiert werden, so sind dadurch verständlicherweise vollkommen andere Bedingungen (korrosiv, adhäsiv usw.) gegeben als bei ständig dicht anliegenden Berührungsflächen, insbesondere dann, wenn eine duktile, abdichtende Zwischengleitschicht vorhanden ist (z.B. Fett oder Gleitlack).

In diesem Zusammenhang ist auch der der Einfluss der **Amplitudengröße** auf den Verschleiß zu berücksichtigen. Sind auf der Kontaktfläche Gleitfilme, wie z.B. Oxidhäute, vorhanden, so kommt es ab einer bestimmten, werkstoffspezifischen und von der Flächenpressung (Bild 6.1-17) abhängigen Mindestamplitude zur Zerstörung dieser Gleitschicht und damit zum metallischen Kontakt, was starken adhäsiven und abrasiven Verschleiß zur Folge hat (Bild 6.1-10). Gewöhnlich steigt der Verschleiß mit der Schwingweite deutlich an. Die Bewegungsamplitude hat darüber hinaus aber auch einen großen Einfluß auf Form, Transport und Ablagerung der Verschleißprodukte (Oxide, metallische Partikel, Gleitschichtrückstände). Die makroskopische Verschleißbreite (Breite der Frettingzone in Richtung der Gleitbewegung) entspricht nur in den seltensten Fällen der Schwingweite der Verschleißbewegung. Die Schwingweite der Mikrobewegungen ist gewöhnlich sehr viel kleiner und kann durch eine mikroskopische Untersuchung (REM) der Verschleißzone abgeschätzt werden.

Bild 6.1-21: In den unterschiedlichen Betriebsphasen können charakteristische Frettingbewegungen (Bild 6.1-14) auftreten. Dabei können niedrig- (z.B. Drehzahländerungen) und hochfrequente (z.B. Schaufelschwingungen) Mikrobewegungen unterschiedlicher Größe auftreten. Neben Gleitbewegungen sind auch Hämmerbewegungen denkbar, wenn bei nied-

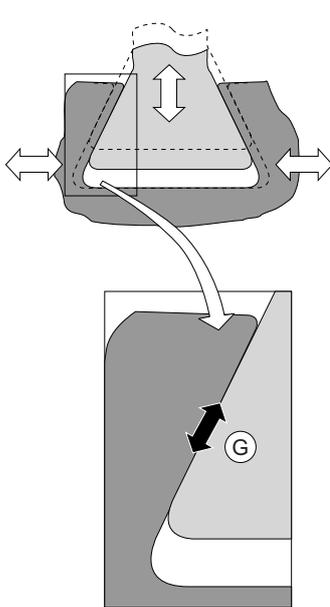
riger Fliehkraft Schaufelschwingungen auftreten. Die Lage der Frettingzonen kann sich dabei auch charakteristisch ändern.

Änderungen der Stillstandszeit können die Reibbedingungen deutlich beeinflussen (Diagramm unten). Die Reibkraft ist z.B. bei kurzen Stillstandszeiten von deren Dauer deutlich abhängig.

Betriebsphasenspezifische Frettingbedingungen

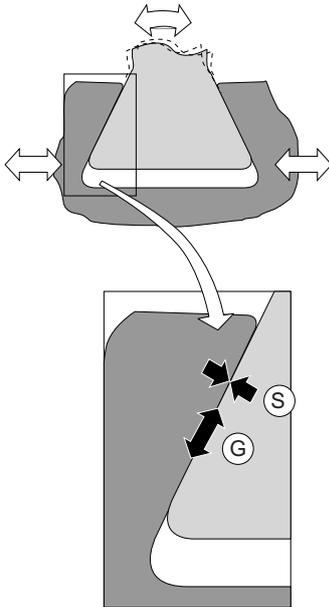
Phase "1":
Drehzahländerungen
(Anfahren/Abstellen)

niedrigfrequent



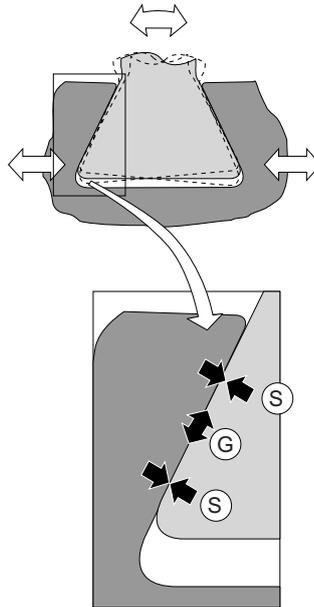
Phase "2":
hohe Drehzahl +
Schaufelschwingung

hochfrequent



Phase "3":
niedrige Drehzahl
(z.B. Windmilling) +
Schaufelschwingung

hochfrequent.



"G" Gleitverschleiß, "S" Stoßverschleiß (Hämmern)

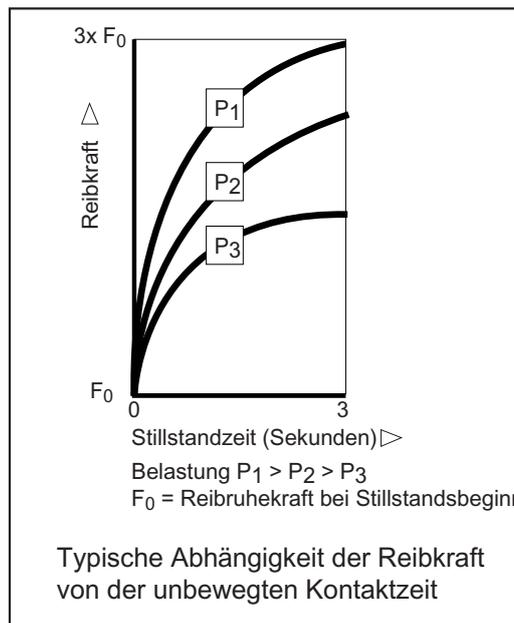


Bild 6.1-21

Einfluss der Kontaktflächengeometrie auf den Schwingverschleiß:

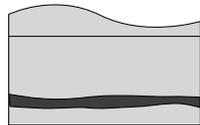
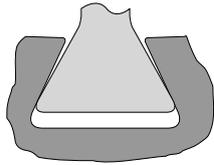
Meist besteht bei technischen Oberflächen der direkte Kontakt zwischen den Auflageflächen in begrenzten Zonen oder Inseln, die nur einen Bruchteil der gesamten Auflageflächen darstellen, und in denen wiederum Kontakt in erster Linie über Rauigkeitsspitzen vorliegt. Die Kontaktzonen ergeben sich aus der **geometrischen Gestalt** der Kontaktflächen (z.B. plan, einfach gewölbt, sphärisch), aus Maßungenauigkeiten (Bild 6.1-22) und aus elastischen und plastischen Verformungen. Zum Einfluss der Topografie der Kontaktflächen, wird bei der Darstellung der Fertigungseinflüsse Stellung genommen. Untersuchungen haben gezeigt, dass das Werkstoffvolumen, welches unter Spannungen durch den Verschleißvorgang steht, offenbar von großer Bedeutung für die Verminderung der Schwingfestigkeit sein kann. Bei großen Berührungsflächen, d.h. großem beanspruchten Volumen (in einer oberflächennahen Zone unter den Berührungsflächen), in denen Fretting auftritt, ist die Ermüdungsgefahr deutlich größer als bei kleinen Berührungsflächen (bei gleichen Verschleißbedingungen wie der Flächenpressung). Eine anschauliche Begründung einer Verbesserung des Ermüdungsverhaltens gezielter **Oberflächenstrukturierung** gegen Fretting ist, dass die frettingbeanspruchten Zonen auf diese Art von den mechanisch dynamisch hoch beanspruchten Zonen getrennt sind, sodass nicht beide Effekte gleichzeitig an einer Stelle schädigend wirksam werden können. Aus diesem Grund haben sich profilierte, z.B. **gerillte Kontaktflächen** als vorteilhaft erwiesen (Bild 6.1-23). Bei Al-Legierungen wurde so die Schwingfestigkeit gegenüber einer glatten Auflagefläche verdoppelt. Dieses Erkenntnis kann auch den äußerst günstigen Kugelstrahlereffekt zumindest in Fällen erklären, bei denen die Kontaktwerkstoffe keine deutliche Verfestigung bei plastischer Oberflächenbehandlung, aber trotzdem eine Schwingfestigkeitserhöhung unter Schwingverschleiß zeigen. Bisher wurde keine Serienanwendung gerillter Oberflächen an frettingbeanspruchten Auflageflächen bekannt.

Die **Fertigung** von Kontaktflächen ist von erheblicher Bedeutung für das Verhalten einer Verschleißpaarung. So ist die Lage der Verschleißstelle (Bild 6.1-22) und die Höhe der Flächenpressung abhängig von den Fertigungstoleranzen (z.B. den Winkeln der Schwalbenschwanznut und dem Fluchten der Auflageflächen). Selbst beim Einhalten der geforderten Toleranzen, ist innerhalb dieses Bereichs eine merkliche Abweichung von der Idealform zu erwarten (z.B. gewölbte statt plane Konturen), welche die Form und Lage der Verschleißzonen beeinflusst. Wichtig ist auch die fertigungsbedingte absolute und mittlere Rauigkeit sowie das Rauigkeitsprofil. Hierzu gehören Form und Vorzugsrichtung des Rauigkeitsprofils zur Gleitbewegung. So kann die Rauigkeit die Verschleißwirkung verstärken oder vermindern, auch in Hinblick auf die Schwingermüdung. Das günstige Verhalten kugelgestrahlter Flächen (Bild 6.1-19) auf die Ermüdungsvorgänge bei Fretting ist nicht zweifelsfrei geklärt. Einerseits werden Verfestigungen und Eigenspannungen für diesen Effekt verantwortlich gemacht, andererseits gibt es jedoch, wie bereits oben erwähnt, deutliche Hinweise, dass zumindest bei hochfesten Titanlegierungen die „Kalotten-Topografie“ entscheidend ist. Dies wird, wie bei einer Profilierung durch Rillen, auf das kleinere angestregte Volumen an den Spitzen und auf „Depotwirkung“ der kalottenförmigen Eindrücke für den Abrieb zurückgeführt. Hierzu ist die Beobachtung interessant, dass erst ab einer kritischen Kontaktflächengröße in Abhängigkeit von der Schwingbeanspruchung Ermüdung eintritt. Bei zusätzlicher Gleitlackbehandlung ist eine Reservoirwirkung der Kalotten wahrscheinlich. Versuche haben gezeigt, dass kugelgestrahlte Proben aus einer hochfesten Titanlegierung ohne Fretting sogar niedrigere Schwingfestigkeiten aufweisen können als unbehandelte Proben. Bei Frettingeinfluss waren diese Proben jedoch deutlich schwingfester als die unbehandelten. Dieses Verhalten lässt sich durch den Topografieeinfluss einleuchtend erklären.

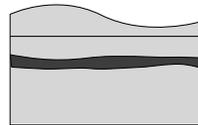
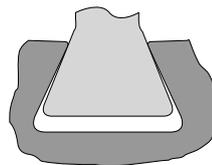
Verschleißbilder an den Schaufelfüßen ermöglichen Rückschlüsse auf die Auflagebedingungen und Belastungen.

Verschleißbilder (schematisch) an Schaufelfüßen als Folge von Winkelfehlern

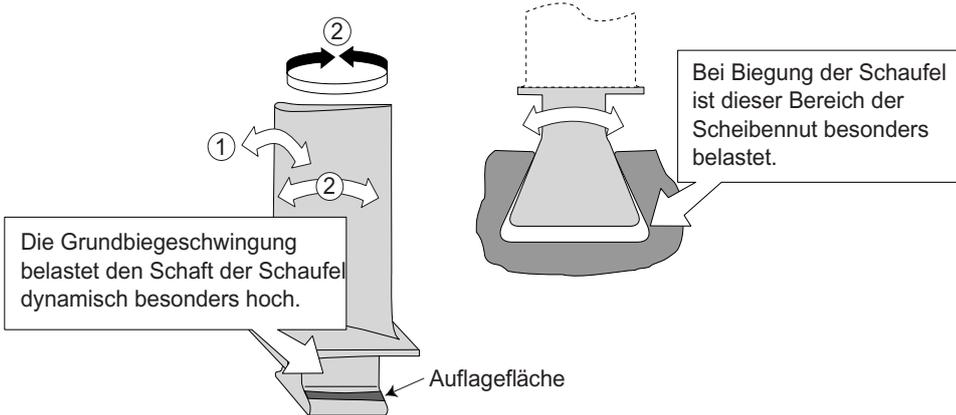
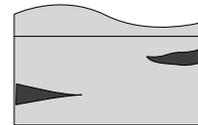
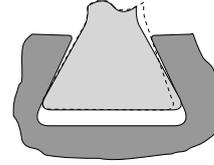
Schwalbenschwanzwinkel des Schaufelfußes größer als bei der Scheibennut



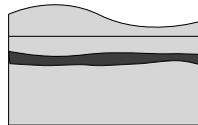
Schwalbenschwanzwinkel des Schaufelfußes kleiner als bei der Scheibennut



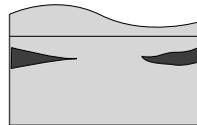
Auflageflächen windschief



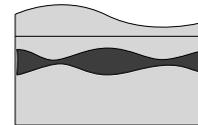
Verschleißbilder (schematisch) an Verdichterschaufeln bei unterschiedlichen Schwingformen



"(Flach-) Biegeschwingung" ("1")



"Hochkant Biegeschwingung" Torsionsschwingung ("2")



Kombinierte Beanspruchung

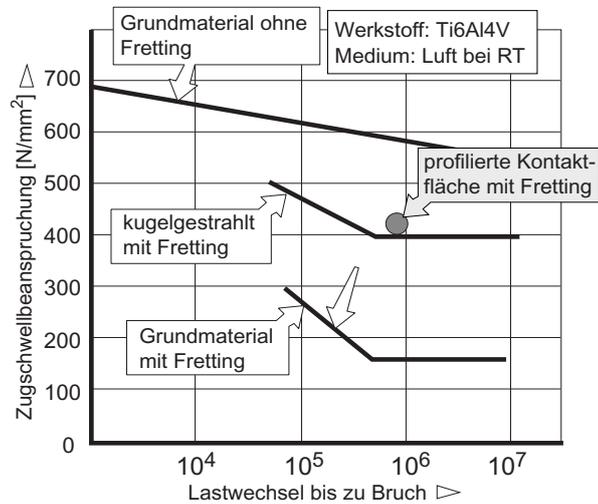
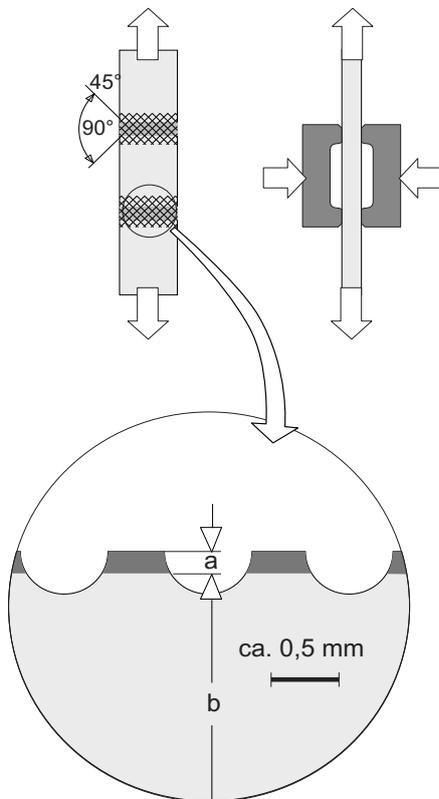
Bild 6.1-22

Bild 6.1-22: Typische, schematisch dargestellte Verschleißbilder an Schaufelfüßen. Durch Fertigungstoleranzen wie Winkelfehler der Auflageflächen können die in den oberen Skizzen dargestellten Bilder entstehen. Solche Bilder können sich mit Verschleißzonen die durch eine Schwingung der Schaufel bedingt sind (Skizzen unten) überlagern. Je nach dem wo

sich der durch Schwingermüdung besonders beanspruchte Bereich (bei einer Rotorschaufel zum Schaft hin oder bei der Scheibennut radial innen, siehe Bild 6.1-10) befindet, ist die Gefährlichkeit der Schädigung einzuschätzen.

Die Oberflächentopografie scheint bei Frettingermüdung eine wichtige Rolle zu spielen.

möglichst weitgehende Entkoppelung von frettingbeanspruchtem und mechanisch beanspruchtem Bereich



◀ Schnitt durch die Riffelung

a = frettingbeanspruchter (Oberflächen-) Bereich
b = durch äußere Kräfte dynamisch beanspruchter Bereich

Einfluß der Oberflächentopografie auf das Frettingermüdungsverhalten einer AlCuMg-Legierung

(nach R. Bramhall)

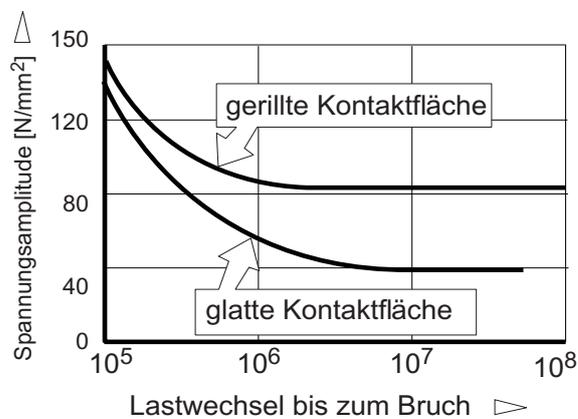


Bild 6.1-23

Bild 6.1-23: Einige Beobachtungen zum Verhalten frettinggeschädigter Titanlegierungen gegenüber Schwingermüdung deuten darauf hin, dass zumindest unter bestimmten Betriebsbedingungen der verfestigende Effekt des Kugelstrahlens weniger zur Milderung des Schwingfestigkeitsabfalls bei Fretting beiträgt als die typische Kalottenstruktur (siehe Seite 6.1-48). Dies hat zu Frettingversuchen mit gezielt profilierten Auflageflächen geführt. Im Klötzchenversuch (Bild 6.1-14) konnte mit im Kreuzmuster eingepressten Rillen eine ähnliche Verbesserung wie an kugelgestrahlten Flächen erreicht werden (Diagramm oben rechts). Es gibt mehrere Ansätze für eine Erklärung dieses Effekts die möglicherweise auch kombiniert zur Wirkung kommen:

- Ablagerungsmöglichkeit für Abrieb oder Reservoir für Gleitmittel.

- Trennung des frettingbeanspruchten Bereichs vom mechanisch hochbeanspruchten Grundwerkstoff.

- Verkleinerung des unter der Anstrengungsbeanspruchung stehenden Volumens (Detail Mitte links).

Auch bei hochfesten Aluminiumlegierungen wurde der Verbesserungseffekt gerillter Kontaktflächen bei Frettingbeanspruchung beobachtet (Skizze unten).

Literatur zu Kapitel 6.1

- 6.1-1** M. Nakao, M. Ikeyama, S. Abe, „Analytical Condition Inspection and Extension of Time Between Overhaul of F3-30 Engine“, ASME-Paper 91-GT277 des Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition Orlando, Fl June 3-6, 1991.
- 6.1-2** H.Uetz, J.Föhl, „Erscheinungsformen von Verschleißschäden“, VDI-Berichte Nr. 243, 1975, Seite 143-156.
- 6.1-3** A.A. Bartel, „Reibkorrosion“, VDI-Berichte Nr. 243, 1975, Seite 157-170.
- 6.1-4** W.T. Sawyer, Office of Naval Research (Code 463), Department of the Navy, Arlington, Virginia, „Proceedings of the 6 th Meeting of the Mechanical Failure Prevention Group“, MFPG Technical Report No. 9, November 2-4, 1971.
- 6.1-5** R.B. Waterhouse, „Physics and Metallurgy of Fretting“, Agard-CP-161, 1974
- 6.1-6** J.W. Kragelski, „Reibung und Verschleiß“, VEB Verlag Technik Berlin, 1979, Seite 269-291.
- 6.1-7** R.K. Betts, Fa. General Electric, „Wear and Fretting Fatigue Resistant Coatings“, AFML-TR-74-18, 1973.

- 6.1-8** K.H. Kloos, E. Broszeit, „Verschleißschäden durch Oberflächenermüdung“, VDI-Berichte Nr. 243, 1975, Seite 189-204.
- 6.1-9** M.J.He, C.Ruiz, „Fatigue Life of Dovetail Joints: Verification of a simple Biaxial Model“, Zeitschrift „Experimental Mechanics“, June 1989, Seite 126-131.
- 6.1-10** H.A. Jergeus, Stal-Laval Turbin AB, „Microslip initiated Cracks in Compressor Blade Attachments“, Paper des Rimforsa Research Seminar on Material Science, 15-18 August 1977.
- 6.1-11** R.B. Waterhouse, „Fretting Corrosion“, Pergamon Press, 1972.
- 6.1-12** W.J. Harris, Rolls -Royce (1971) Ltd. Small Engine Division, „The Influence of Fretting“, AGARD-CP-161, Oct. 1974, Seite 7-1 bis 7-11.
- 6.1-13** D.H. Buckley, NASA Lewis Research Center, „Effect of Various Material Properties on the Adhesive Stage of Fretting“,AGARD-CP-161, Oct. 1974, Seite 13-1 bis 13-17.
- 6.1-14** J.Thiery, E.R. Spinat, SNECMA, „Comment Reduire L’Usure des Pièces non Lubrifiées dans les Turbomachines“, AGARD-CP-161, Oct. 1974, Seite 6-1 bis 6-13.
- 6.1-15** 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.
- 6.1-16** L.Engel, H. Klingele, „Rasterelektronische Untersuchungen von Metallschäden“, ISBN 3-446-13416-6, Carl Hanser Verlag München Wien, Seite 171
- 6.1-17** Guy Norris, „R-R eases Trent 800 inspections“, Zeitschrift „Flight International“, 5-11 June 2001.
- 6.1-18** S.W. Kandebo, „Rolls-Royce Resolves Trent 800 cracks“, Zeitschrift „Aviation Week & Space Technology“, June 4, 2001, Seite 52.
- 6.1-19** R.J.Schaller, C.Visser, S.Lien, „Ceramic Rotoating Blades: Some Critical Design Parameters for Gas turbine Applications“, ASME-Paper No. 74-GT-96, der Gas turbine Conference, Zurich Switzerland, March 31-April4, 1974, auch veröffentlicht in „Journal of Engineering for Power“, July 1975, seite 319 bis 325.
- 6.1-20** Special Airworthiness Information Bulletin des Aircraft Certification Service , Washington, DC. Nach FAA Dokument No. NE-02-22 vom 26. March 2002.Seite 1-3.