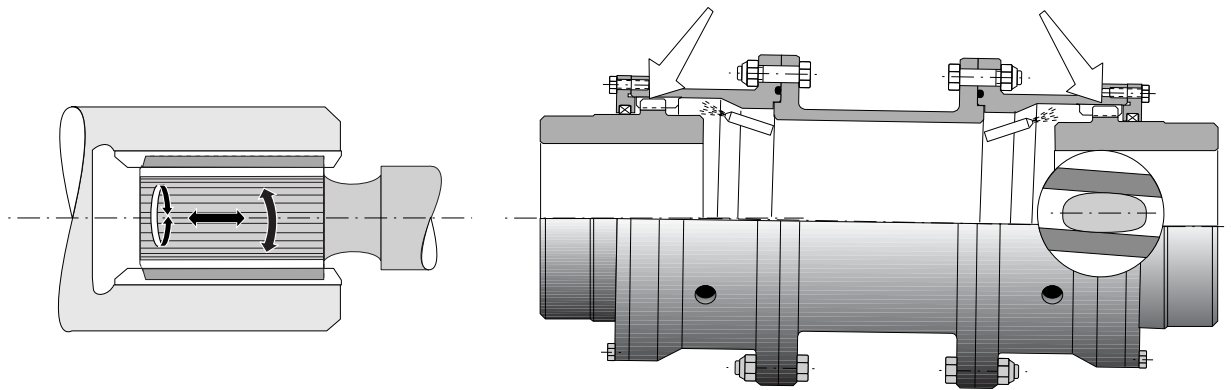


6.6 Wellenverbindungen

6.6.1 Ausgleichende Vielkeil- und Zahnkupplungen (Ausgleichskupplungen)



Vielkeilkupplungen (Vielkeilverbindung, Beispiele in Lit. 6.6.1-6 bis Lit 6.6.1-8) sind eine häufige **Wellenverbindung**. Sie ermöglichen eine stabile Verbindung auf kleinstem Raum. Der Schaft der Welle wird direkt in ein entsprechendes 'hohles' Vielkeilprofil geschoben. Eine solche Verbindung lässt **axiale Bewegungen** und damit den **Ausgleich von Wärmedehnungen** zu. Für die Übertragung großer Leistungen, z.B. in Kraftwerken nutzt man sog. **Bogenzahnkupplungen** (Bild 6.6.1-3). Sie lassen auch einen begrenzten **Achsversatz** zu.

Jeder Einfluss, der diese **Ausgleichsbewegungen** verhindert, kann zu schweren Schäden an der Kupplung und/oder den verbundenen Maschinen führen. Es besteht die Gefahr des **Blockierens der Gleitbewegung** in der Verzahnung durch Fressen (Kaltverschweißen) infolge Schmierstoffmangel/Ölmangel oder Stromdurchgang (Bild 6.6.1-3). **Verschleißstufen** in den tragenden Zahnflanken sind in der Lage, eine funktionsnotwendige Axialbewegung unzulässig zu begrenzen (Bild 6.6.1-3).

Grundsätzlich ist **an den kraftübertragenden Zahnflanken mit Mikrobewegungen** zu rechnen. Sie entstehen aus kleinen Fluchtfehlern oder Biegungen der Welle. Das führt zu **Schwingverschleiß** (Fretting, Bild 6.6.1-2, Bild 6.6.1-3 und Band 1 Kapitel 5.9.3). Er muss mit geeigneten Maßnahmen auf ein zulässiges Maß minimiert werden. Das erfordert eine dauernde, ausreichende **Schmierung**. Bei Pumpen und Reglern für **Kraftstoff** (Bild 8.1-11) dient dieser selbst der Schmierung. Damit handelt es sich um **besonders anspruchsvolle Bedingungen**. Die Schmierung zu gewährleisten ist **für den Konstrukteur eine Herausforderung**. In vielen scheinbar untergeordneten oder unkritischen Fällen übernimmt **Lecköl aus Dichtungen** diese Aufgabe. Entsprechend der meist umweltbegründeten Forderung, auch minimalen Schmierölaustritt zu vermeiden, werden Dichtungen weiter optimiert. So bleibt das von der Kupplung benötigte Lecköl aus. In einem solchen Fall kommt es, oft erst nach längeren Betriebszeiten, **zum gefährlichen Verschleiß an der Vielkeilverzahnung**. Im Extremfall wird die Verzahnung vollständig abgetragen und die

Verbindung versagt (Bild 6.6.1-2). Dann sind umfangreiche, teure Maßnahmen zu erwarten. Es handelt sich also um eine typische **Verschlimmbesserung** (Band 1 Kapitel 3.2.2).

Im Zusammenhang mit dem Verschleiß kann beim **Auswechseln der Welle** ein weiteres Problem auftreten. Auch der **Tausch eines Anbaugeräts** wie eines Generators ist eine solche Situation. Merklicher Verschleiß verhindert eine optimale **Anlage der tragenden Flanken der Keilverzahnung**. Das mag an der veränderten Position (axial und/oder am Umfang) mit unterschiedlichem Verschleiß liegen. Typisch ist, wenn im Zuge einer **Wartung** oder einer **Montage** die ursprüngliche Lage der Zahnflanken nicht wiedergefunden wurde. Diese ist besonders beim **Tausch** (z.B. gegen Neuteil) **einer Verzahnungskomponente** gegeben. Die Folge sind gefährliche **Spannungsspitzen**, örtlich konzentrierter Kraftübertragung, Kerbwirkung und eine veränderte Beanspruchung durch Biegung und/oder Torsion. Mit der verschlechterten Flankenanlage **beschleunigt sich der Verschleiß**. Dies kann auch zur Schwingüberlastung einer **Sollbruchstelle** (Band 1, Bild 5.4.4-7) führen. Sie liegt gewöhnlich im Wellenschaft in der Nähe der Verzahnung. Damit wird der frühzeitige Ausfall der Wellenverbindung wahrscheinlich.

Weitere potenzielle Folgeschäden sind an **Wälzlagern** (Kapitel 6.3.1) und **Dichtungen** (Kapitel 6.10.2.1) der betroffenen Welle zu erwarten.

***Bild 6.6.1-1 (Lit. 6.6.1-6): Wellenkupplungen mit Vielkeilverzahnungen** werden beispielsweise im **Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen** und in **Turbomaschinen** zum Antrieb von Nebengeräten (Bild 6.4.2-4 und Bild 6.4.2-5) sehr häufig angewendet und sind bewährt. Ein großer Vorteil ist **die einfache Montage** durch axiales Zusammenschieben. Das kommt z.B. der Montage/Demontage von Anbaugeräten wie Generatoren, Reglern und Pumpen (Lit. 6.6.1-7, Lit. 6.6.1-8 und 6.6.1-9) zugute. Trotz dieser Vorteile handelt es sich bei Keilverzahnungen unter ungünstigen Betriebsbedingungen auch um eine potenzielle Schwachstelle. In erster Linie sind sie **Reibverschleiß** (Fretting, Band 2 Bild 6.1-4) ausgesetzt. Dieser führt zu einem **Abtrag der belasteten Flanken**. Im Extremfall kommt es zum Bruch des verbleibenden Zahnquerschnitts und so zum **Versagen der Kupplung** (Bild 6.6.1-2).*

Um diese Schäden zu verhindern, ist eine ausreichende Schmierung von großer Bedeutung. Sie sollte der Anwendung angepasst sein.

Vielkeilwellenverbindungen sind ein wichtiges sicherheitsrelevantes Element und unterliegen typischen Schadenseinflüssen aus Fertigung, Reparatur, Wartung und Betrieb:

- Typischer Reibverschleiß durch Mikrobewegungen in Abhängigkeit von:
- Gleit- und Schmierbedingungen
 - Mikrobewegungen
 - Korrosion: Schwitzwasser/Meeresatmosphäre
 - Verschmutzung/ Staub
 - Flächenpressung
 - Zustand der Kontaktflächen
 - Werkstoffkombination (z.B. Härte, Beschichtungen)
 - Rauigkeit /Topografie
 - Geometrie (z.B. ballig)
 - Ölmenge, -zustand

- Rissbildung im Nutgrund:
- Fertigung (Härten, Brünieren)
 - Betrieb (Schwingbruch)

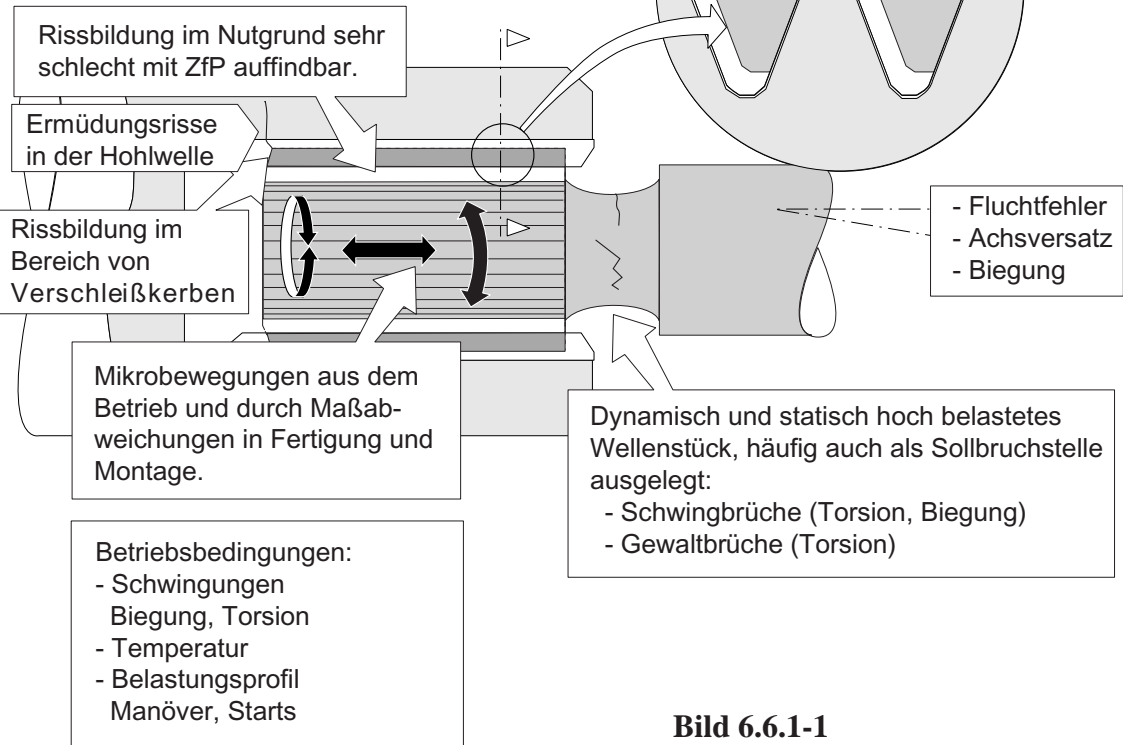


Bild 6.6.1-1

- **Schmieröl** ist bei Komponenten des Ölsystems üblich.

- **Lecköl aus benachbarten Dichtungen** (z.B. Wellendichtringe, Bild 6.6.1-4 und Kapitel 6.10.2.1). Dies ist eine häufige Schmierung. Oft ist sie **nicht bewusst**. Damit besteht die Gefahr der **Verschlimmbesserung**. Bemühungen,

auch letzte Undichtigkeiten zu unterbinden, können zu unerwarteten Ausfällen von Vielkeilverzahnungen führen (Bild 6.6.1-4). Zeigen sich solche Schäden erst nach längeren Betriebszeiten, wird das Problem verschärft. Dann ist der Umfang betroffener bzw. verbauter Komponenten/Maschinen bereits groß.

- **Trockenschmierschichten** (z.B. Grafit- oder MoS_2 -haltig) werden für Kupplungen die nicht vom Öl erreichbar sind verwendet. Sie sind auf für Ölschmierung zu hohe Betriebstemperaturen abgestimmt. Das ist bei Kupplungen der Hauptwellen von Turbomaschinen häufig der Fall.

- **Kraftstoff** dient in **Wellenverbindungen von Reglern und Pumpen** als Schmiermittel (Bild 8.1-10 und Bild 8.1-11). Die vergleichsweise schlechte Schmierfähigkeit des Kraftstoffs (Bild 8.1-19 und Bild 8.2-4) erfordert eine besonders **sorgfältige Auswahl des Tribosystems** (Bild Band 1 Bild 5.9.1-1).

Die Schmierung beeinflusst zusätzlich den Verschleiß mit **Konsistenz und Abtransport der Verschleißprodukte**. Meist sind es Oxide, man spricht von Reibrost (Band 1 Bild 5.9.3-2). Verbleiben diese in der Verzahnung, erzeugt ihr gegenüber dem Stahl vergrößertes Volumen eine „**Sprengwirkung**“. Diese kann **Schwinganrisse und Brüche** begünstigen. Werden die Verschleißprodukte aus der Verzahnung transportiert, vergrößert sich das Spiel und so die Relativbewegungen. Es kommt dann zu **stoßartiger Belastung** (Stoßverschleiß, Band 1 Bild 5.9.1-10). Das fördert den Verschleiß weiter.

Je nach Schmierung kann zusätzlich die **Werkstoffkombination** der aufeinander liegenden Kupplungszähne von großer Bedeutung für das Verschleißverhalten sein (Bild 6.6.1-2). Das ist besonders bei **Reparaturbeschichtungen** zu berücksichtigen. Der OEM ist zu konsultieren, falls die Beschichtung in irgendeiner Weise (z.B. Vorbehandlung, Produkt, Aufbringverfahren) von Vorschriften/Handbuchangaben abweicht. Im Zweifelsfall sind **geeignete Nachweise** zu führen. Diese erfordern, wie für Verschleißvorgänge typisch, den **relevanten Betrieb** der Originalmaschine.

Die vorliegende Verschleißart wird nicht ohne Grund als **Reibkorrosion** (engl. fretting corrosion, Band 1 Kapitel 5.9.3) bezeichnet. Der Korrosionseinfluss hat für die Entstehung der Verschleißoxide große Bedeutung (Band 1 Bild 5.9.3-3). Als Elektrolyt kommt in erster Linie **Meeresatmosphäre** bzw. im Stillstand mit

Meersalz verunreinigtes Schwitzwasser in Betracht. Der feine metallische Abrieb ist bei der Entstehung chemisch höchst aktiv. Er reagiert besonders auf oxidierende und korrosive Einflüsse.

Neben den Schmierbedingungen spielen die **Mikrobewegungen zwischen den anliegenden Zahnflanken** eine entscheidende Rolle. Deshalb sollte eine erklärende mikroskopische Untersuchung (REM) vorgesehen werden. Die Mikrobewegungen können verschiedene **Ursachen** haben, die auch kombiniert auftreten:

- **Fluchtungsfehler** der Wellenanschlüsse,
- **Schwingungen** des Wellensystems,
- **Anfahrstöße**.

Die dabei entstehenden Mikrobewegungen sind besonders von der **unterschiedlichen Elastizität der Kupplungsteile** abhängig.

Rissbildung kann in Vielkeilkupplungen unterschiedliche Ursachen haben.

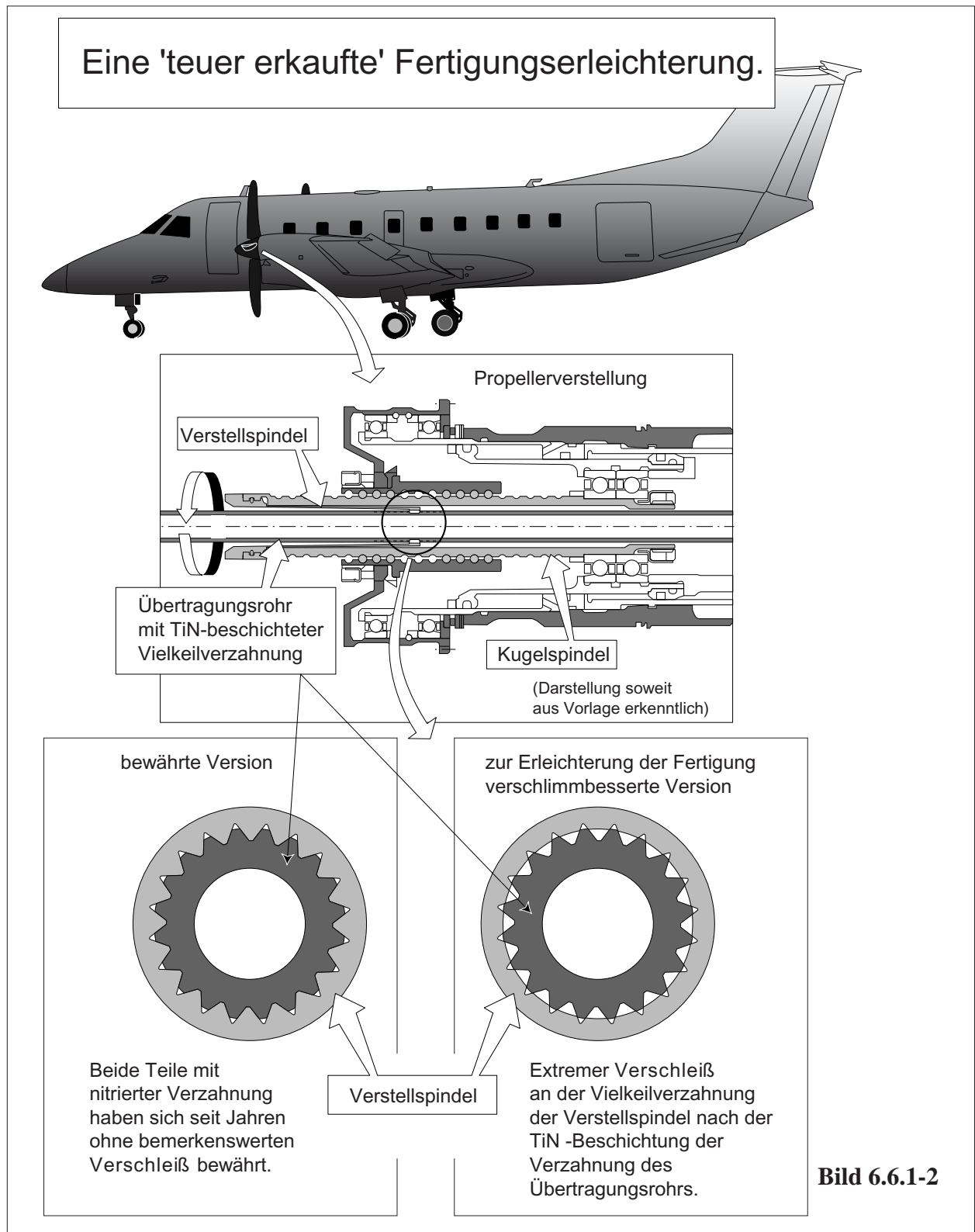
- **Herstellungsbedingt** durch Schleifen oder Brünieren (Bild 6.4.1-3).

- **Schwingrisse**. Diese können sich von Verschleißkerben in der Verzahnung auch auf der Hohlseite entwickeln. Bei Schwingüberlastung unter Torsion sind **Axialrisse am Zahnrund** zu erwarten.

- **Hohe Biegebelastungen** können Risse in einer Sollbruchstelle des benachbarten Wellenschafts auslösen.

Bild 6.6.1-2 (Lit. 6.4.1-3): Es handelt sich um den typischen Fall einer **Verschlimmbose**. Er steht zwar nur indirekt mit dem Triebwerk in Zusammenhang, ist aber **für Vielkeilkupplungen äußerst lehrreich**.

Wenige Minuten vor dem Unfall beobachteten Zeugen, dass das Flugzeug mit ca. 30-60 Metern Höhe auffallend niedrig anflug. Plötzlich entstand eine kleine Rauchwolke. Das Flugzeug rollte nach links bis die Tragflächen senkrecht standen. Darauf kippte die Flugzeugnase



nach unten. Das Flugzeug schlug auf die Landebahn und wurde zerstört. Die Überprüfung der Komponenten des linken Propellers ergab, dass die Blätter statt mit angewählten ca. 80° nur mit 3° angestellt waren.

Diese **Einstellung** entsprach nicht der Stellung der Propeller-Verstellspindel, was auf ein inneres Problem hinwies. Eine anschließende Untersuchung des ursächlich betroffenen Triebwerks ergab:

Die Wellen von Propellerregler (Propeller Control Unit = PCU) und Propeller verlaufen konzentrisch (mittlere Skizze). PCU und Propeller sind mit dem ölführenden **Übertragungsrohr**, das durch die Propellerwelle verläuft, verbunden. Das Drehmoment wird von der äußeren Keilverzahnung des Übertragungsrohrs auf die innen liegende Vielkeilverzahnung der Kugelumlaufspindel übertragen. So wird über eine Spindel der Propeller verstellt.

Das Übertragungsrohr hat **statt der bisherigen Nitrierschicht eine neu eingeführte Titanitrid-Beschichtung** auf der Keilverzahnung zur Kugelumlaufspindel. Deren Oberflächen erschienen matt. Das war auf erhöhte Rauigkeit zurückzuführen. Es handelte sich nicht um bedenklichen Verschleiß.

Dagegen zeigten die **Keilverzahnungen in den PCU Spindeln** beider Triebwerke starken Verschleiß. Im linken Triebwerk war die Keilverzahnung **nahezu abgetragen** (Skizze unten rechts). So konnten die Kupplungsteile gegeneinander frei rotieren. Eine **Propellerverstellung war damit nicht mehr möglich**.

Änderung der Oberflächenbehandlung der äußeren Keilverzahnung des Übertragungsrohrs:

Die **alte Version mit Nitrierschicht hatte keine Probleme**. Trotzdem wurde die Oberflächenbehandlung **geändert, um die Herstellung zu erleichtern**. Die Nitrierschicht musste nämlich mit Entfernen der Epsilonschicht und Richtvorgängen (Verzug beim Nitrieren) aufwändig nachgearbeitet werden.

Eine „Verbesserung“ mit einer **Titanitridschicht** lief in einem „**Produkt-Verbesserungsprogramm**“ (engl. product improvement program). Der Verzug beim alten Verfahren und damit das Richten ließ sich mit der niedrigeren Beschichtungstemperatur des **Titanitrid** vermeiden. Die Erfahrungen des Herstellers ließen, im Vergleich zur alten Schichtvariante, einen 3-4 mal niedrigeren Verschleiß erwarten. Vergleichbare Anwendungen schienen das zu bestätigen. Wegen der **niedrigen Verzahnungsbelastung**

wurde das Verschleißverhalten als zweitrangig angesehen.

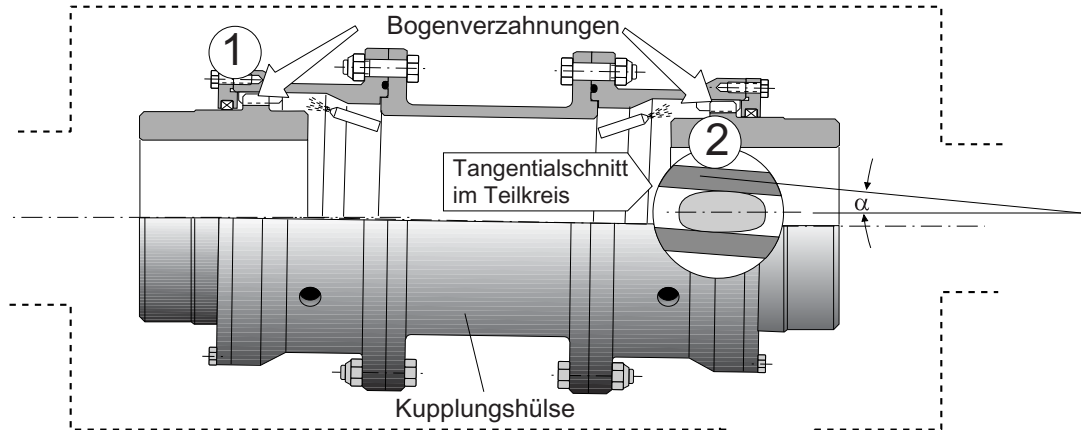
Erprobungsläufe mit dem Propellerantrieb wurden nicht (!) an dem betroffenen Triebwerkstyp durchgeführt. Nach dem Versuch waren die Kupplungszähne, wie für ungeschädigtes Titanitrid typisch, golden glänzend. Ein solcher Befund hätte einem Fachmann zeigen müssen, dass die **Prüfung des Verschleißverhaltens der Kupplungszähne mit einem unterschiedlichen Triebwerkstyp ungeeignet** war.

Der starke Verschleiß der Zähne in der Kugelumlaufspindel wurde später auf den **großen Härteunterschied** gegenüber der **Titanitridschicht auf den Zähnen des Übertragungsrohrs** zurückgeführt. Die **sehr dünne und harte TiN-Schicht kann Unebenheiten der Zahnflanken**, wie bei der ursprünglichen Nitrierschicht zulässig, **nicht ausgleichen**. Weil die **Rauigkeitsforderungen nicht angepasst** wurden, wirkte die **TiN-Schicht als Feile**.

Bild 6.6.1-3 (Lit. 6.6.1-2, Lit 6.6.1-4 und Lit. 6.6.1-5): Zum Ausgleich eines **parallelen Wellenversatzes** bieten sich besonders bei der Übertragung großer Leistungen Verzahnungskupplungen an. Dabei kann mit balligen Zähnen (bis 45 MW) auf der Wellenseite (Außenverzahnung) ein Winkel $\alpha > 1/8^\circ$ ausgeglichen werden (Detail in oberer Skizze). Die **Zentrierung des Mittelstücks** ('Kupplungshülse') erfolgt über die Verzahnung. Dienen dazu die Zahnflanken, ist die Zentrierung **abhängig vom übertragenen Drehmoment**. Bereits bei der Montage wird eine so entste-

Fortsetzung auf Seite 6.6.1-8

Schäden an Verzahnungskupplungen für die Übertragung hoher Leistungen.
nach Lit. 6.6.1- 1 und Lit. 6.6.1-2



Produkt:

- Planung, Konstruktion und Stand der Technik
- Fertigung
- Werkstoff
- Montage
- Instandsetzung

Fremdeinwirkung:

- Fremdkörper
- Überlastung

Betrieb:

- Bedienung
- Wartung

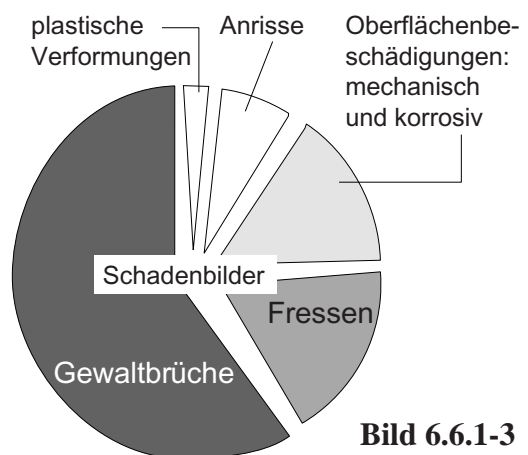
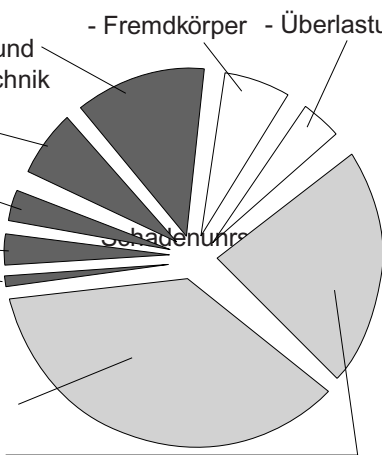
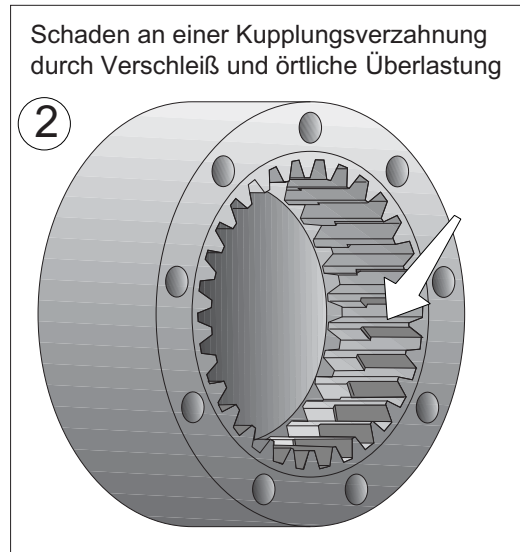
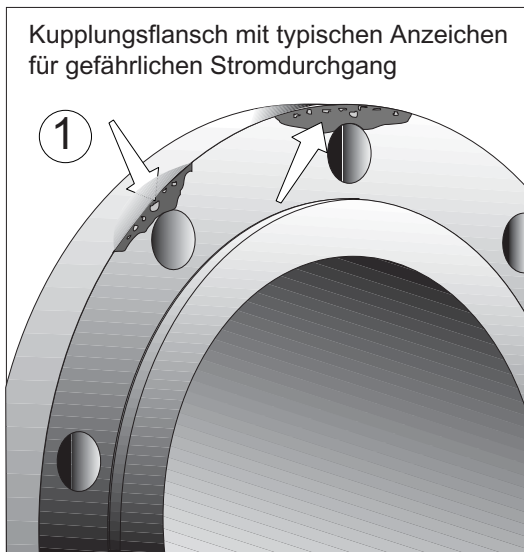


Bild 6.6.1-3



Fortsetzung von Seite 6.6.1-6

hende **Unwucht** minimiert und die Lage der Kupplungsteile **gekennzeichnet**.

Um die Reibungskräfte beim Betrieb der Kupplung ausreichend gering zu halten und unzulässige Erwärmung zu verhindern, lässt sich eine **Öldurchflussschmierung** nutzen.

In Lit. 6.6.1-2 finden sich Angaben über Ursachen und Art von **Schäden an Kupplungen** (Tortendiagramme) aus den 70er-Jahren. Die Tendenz gilt für industrielle Anlagen und dürfte auch heute noch Gültigkeit haben. Besondere Probleme:

Die sichere **Abdichtung und Zuführung der Schmiermittel** zu den Verzahnungen ist konstruktionsabhängig. Dabei geht es nicht nur um Reibungsminimierung und Kühlung, auch Schmutz aus dem Öl (Kapitel 7.1.3.1) kann sich absetzen und die Ausgleichsbewegungen der Verzahnung blockieren.

Unwuchten entstehen durch mangelhaftes Auswuchten und Verlagerung der Kupplungskomponenten unter Last.

Ein großer Anteil von **Montagefehlern** ist auf eine ungenügende **Ausrichtung** zurückzuführen. Dadurch entstehen unzulässige Unwuchten mit Schwingungen des gesamten Systems. Zusätzlich kann der Verschleiß in der Verzahnung (Skizze „2“ unten rechts) gefährliche Ausmaße bis zum Versagen annehmen.

Bei einer Verbindung zu elektrischen Anlagen wie Motoren und Generatoren ist **Stromdurchgang** unbedingt zu vermeiden. Schmelzkrater durch Lichtbögen in der Verzahnung behindern die funktionsnotwendigen Bewegungen. Damit werden Lager in den angeschlossenen Maschinen überlastet. Zusätzlich senken die Schmelzkrater die Schwingfestigkeit drastisch ab (Band 1 Kapitel 5.12). So kann es zum **Bruch der Verzahnung und Kupplungskomponenten** kommen. Das gilt auch für die Verzahnung und die Lager angeschlossener Getriebe. In manchen Fällen sind unzulässig hohe Temperaturen in **Flanschbereichen** als Folge des Stromdurchgangs bereits äußerlich an örtlichen **Anlauf-farben** erkennbar (Skizze „1“ unten links).

Zu **Fremdeinflüssen** gehören:

- **Partikel** im Schmiermittel (Kapitel 7.1.3).
- **Überlastungen**, oft als Folgeschäden in gekoppelten Maschinen.

Vermeidung von Schäden an Kupplungen

Vielkeilkupplungen

Vielkeilkupplungen sind ein äußerst häufiges Maschinenelement. Sie ermöglichen einen axialen Ausgleich von Wellenbewegungen. Dagegen sind sie **nicht geeignet**, eine merkliche **Schiefstellung** bei **nicht fluchtenden** oder **achsversetzten Wellen** auszugleichen. Mit der konstruktiven Gestaltung, Fertigungs- und Werkstoffwahl sowie der Auslegung schafft der **Konstrukteur** eine Voraussetzung für den schadenfreien Betrieb. Das gilt besonders für Vielkeilverbindungen, die nicht, wie viele andere Ausgleichskupplungen, als fertiges Maschinenelement von speziellen Herstellern bezogen werden. Der besondere **Schadensmechanismus**, den es zu vermeiden gilt, ist **Schwingverschleiß** (Fretting) der kraftübertragenden Zahnflanken (Bild 6.6.1-2). Hier spielen Werkstoff (z.B. Oberflächenbehandlung, Beschichtung), Fertigung (z.B. Maßhaltigkeit) und nicht zuletzt die Schmierung im Betrieb wichtige Rollen (Bild 6.6.1-4). Weil die Haltbarkeit gewöhnlich auf anwendungsspezifischer Erfahrung beruht, können bereits scheinbar nebensächliche Änderungen Schäden auslösen. Dazu gehört die Beeinflussung des Schmiermittelzutritts. Erfahrungsgemäß ist z.B. die Verbesserung einer Dichtung (z.B. Radialdichtring) zur Kupplung äußerst problematisch, wenn dabei, meist unbewusst, der notwendige **Leckschmierstoff** ausfällt (Bild 6.6.1-4).

Unter günstigen Umständen lässt sich ein Verschleißschaden der Verzahnung rechtzeitig erkennen, d.h. bevor es zum 'Durchdrehen' der Kupplung kommt. Besteht die Möglichkeit der **visuellen Prüfung** im zusammengebauten Zustand, können **austretende Verschleißprodukte** (meist dunkel als **Reibrost**) den Schaden ankündigen (Bild 6.6.1-5). Ist das '**Umfangsspiel**' bereits mit der Hand fühlbar, steht ein Versagen dicht bevor.

Befindet sich die Kupplung in einem Ölkreislauf, können Ablagerungen gegebenenfalls an einem **Magnetstopfen** vor einem Ausfall den Schaden anzeigen (Bild 6.6.1-6).

Bei der **Montage** einer bereits gelaufenen Vielkeilkupplung ist auf Verschleiß zu achten. In jedem Fall sollte die **Lage der Welle zur Hülse** gekennzeichnet sein/werden. So kann beim Zusammenbau die Anlage der Flanken eher gewährleistet werden. Lage und Art der Kennzeichnung dürfen keine gefährliche Kerben erzeugen.

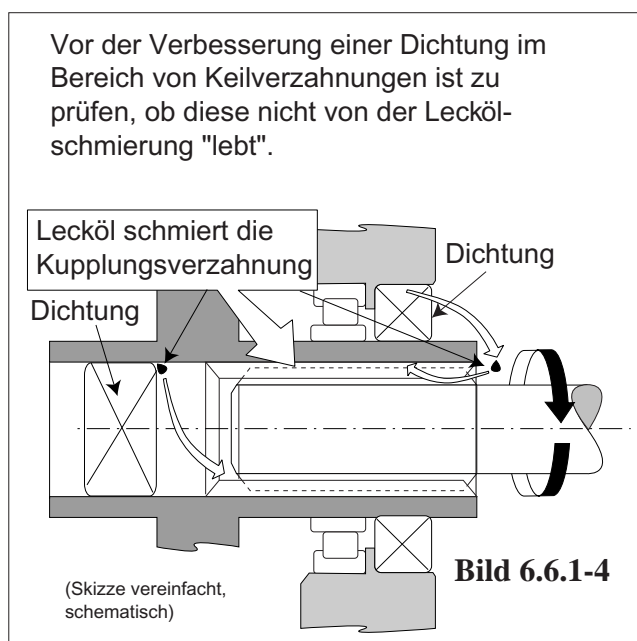


Bild 6.6.1-4: Die Schmierung von Keilverzahnungen der Antriebswellen von Anbaugeräten muss in manchen Fällen allein das Lecköl gewährleisten. Besonders bei älteren Maschinentypen, für die Erfahrungen nicht mehr vorliegen, ist bei einer Nachrüstung Vorsicht geboten. Hier können „Verbesserungsmaßnahmen“ zur Vermeidung des Lecköls zum überraschenden Versagen durch Verschleiß führen. Dann ist das Schadenspotenzial besonders groß. Das ist der Fall, wenn ein solcher Schaden erst nach längerer Betriebszeit auftritt. Das bedeutet, dass eine Vielzahl Maschinen betroffen sein können.

Schmierungsbedingte äußere Merkmale von Frettingverschleiß in Vielkeil-Kupplungen.

"Ausbluten" von "Reibrost" bei flüssiger Schmierung und Pasten

Pulverförmiger "Reibrost" bei trockener Schmierung

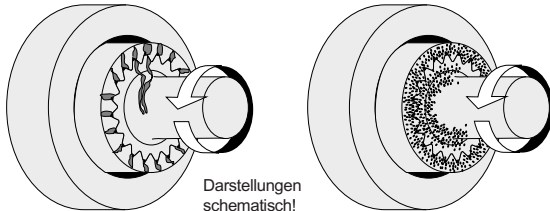


Bild 6.6.1-5

Bild 6.6.1-5: In günstigen Fällen gibt es vorzeitige Hinweise auf Schäden an Vielkeilkupplungen.

Beim Schadensablauf durch Verschleiß der Verzahnung entstehen gewöhnlich, zumindest bis zum endgültigen Versagen, keine größeren Späne. Verschleißprodukte sind feine Eisenoxide, gemischt mit Schmiermittelresten (Band 1 Bild 5.9.3-2 und Bild 6.1-4). Sie lassen durch vergrößertes Spiel und Vibrationen einen Schaden vor dem totalen Ausfall erkennen. Dabei kann es, je nach **Betriebseinflüssen und Tribosystem** (Werkstoffkombinationen, Bild 6.6.1-2), zu **unterschiedlichen Schadensbildern** kommen. Ein visueller Befund ist natürlich von der Zugänglichkeit abhängig. Diese ist in vielen Fällen bei entsprechend gezielten Wartungsarbeiten gegeben.

Verschleißt eine mit **Lecköl** geschmierte Vielkeilkupplung (Bild 6.6.1-4), sind am Kupplungsaustritt **rotbraune Spuren** einer Flüssigkeit oder Paste erkennbar. Sie können Merkmale des Abschleuderns aufweisen (Skizze links).

Bei **Trockenschmierschichten** oder fehlender Schmierung entsteht **Verschleiß in Pulverform**. Das **rotbraune bis schwarze Pulver rieselt aus der Kupplungsverzahnung** und verteilt sich puderartig in der benachbarten Umgebung (Skizze rechts).

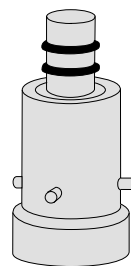
Der feine Verschleißabrieb lässt **im Ölsystem selbst kaum warnende Ablagerungen an Magnetstopfen** (Bild 6.6.1-6) oder **Filtern**

(Bild 7.1.3.1-2) erwarten. Die Chance für einen Hinweis besteht über den Trend der abriebbedingten **Ölverunreinigungen** (Kapitel 7.2). Dabei können neue, das Öl kontinuierlich überwachende Systeme (Lit. 6.6.1-11) vorteilhaft sein.

Befindet sich die Kupplung im **Kraftstoff**, beispielsweise in Reglern und Pumpen, ist eine rechtzeitige Erkennung anhand der Verschleißprodukte kaum möglich.

Auch wenn keine Späne am Magnetchipdetektor hängen, ist ein gefährlicher Verschleiß (Fretting) an magnetischen Stahlteilen (Steckkupplungen) möglich.

Keine magnetischen Späne am Chipdetektor



Trotzdem: Rostbraunes Öl weist auf oxidierten Verschleißabrieb hin

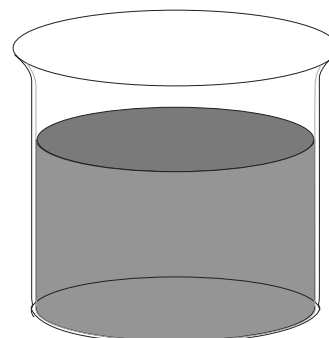


Bild 6.6.1-6

Bild 6.6.1-6: Der Verschleißmechanismus an Vielkeilverzahnungen lässt sehr feine Partikel aus Eisenoxid entstehen. In vielen Fällen gelangt der Abrieb nicht in das Schmieröl. Dann ist eine Detektierung des Schadens im Anfangsstadium nur mit einer gezielten Überprüfung beim Wartungsvorgang erfolgversprechend (Bild 23.2.2-5 und Beispiel 23.2.2-1). Selbst wenn die Verschleißpartikel in das Schmieröl gelangen, ist die Chance, dass diese in Filtern oder an Magnetstopfen auffallen, eher gering. Erfolgversprechender ist in einem solchen Fall der Trend von Ölanalysen (Bild 22.3.4-6 und Bild 22.3.4-9).

Risikominimierung bei Zahnkupplungen

Der **Konstrukteur** hat für die folgenden Eigenschaften zu sorgen (Lit.6.6.1-2):

- **Lösen der Kupplung** nach Ausbau der Axiallager mit axialer Verschiebung **ohne Zerlegung der Peripherie** wie Gehäusen und ohne Beeinflussung der Ausrichtung. Im günstigen Fall sollte eine Verschiebung der Kupplungshülse genügen.
- Eine Zerlegung lässt sich beim Öffnen auf die Kupplungskomponenten beschränken.
- **Ausrichtung** (Kapitel 6.5) bzw. deren Kontrolle möglichst auf **Messuhren** beschränken. Geeignete **Vorrichtungen** sind vorzusehen. Sinngemäße Anpassung falls berührungslose Techniken wie **Laserstrahlen** zur Anwendung kommen.
- **Wuchtung** der komplett zusammengebauten und verspannten Kupplung im Neuzustand vor der Auslieferung. Falls nicht möglich oder ausreichend aussagefähig, sind die Voraussetzungen für eine **Betriebswuchtung** zu schaffen. Diese sollte bei voller Drehzahl, maximalem Übertragungsmoment und betriebstypischer Ausrichtung sowie Erwärmung erfolgen. An der Kupplungshülse ist die Möglichkeit einer örtlichen **Materialentnahme** durch Zerspanung (z.B. Bohren) vorzusehen.
- **Trennung** der angeschlossenen Maschinen für Prüfläufe, Notbetrieb und Wuchtvorgänge.
- Nach Möglichkeit **Aufstellung aller Maschinen auf einer Fundamentplatte**. So lässt sich ein für die Kupplung schädigender Höhenversatz durch Wärmedehnungen vermeiden.
- Ausreichende Sicherheit gegen plastische Verformungen und Rissbildung bei Überlast. Das gilt für das maximal zu erwartende Übertragungsmoment. Es ist besonders bei Betriebssituationen wie Anfahren und Kurzschluss in elektrischen Maschinen zu erwarten.
- Bevorzugung der **Ölumlaufschmierung** (Druckölschmierung). Bei Fett- und Ölfüllungen besteht im Falle der **Undichtigkeit** (O-Ring-Dichtungen! Kapitel 6.10.1) die Gefahr, dass die Verzahnung zerstört wird. Dann können äußere Anzeichen durch austretenden Schmierstoff an der Verkleidung der Kupplung zu spät sein. Der **Ölstrahl der Schmierung ist so auszurichten**, dass Schmutzpartikel aus der Verzahnung gewaschen werden. Dazu sind genügend feine **Ölfilter** vorzusehen.

Literatur zu Kapitel 6.6.1

- 6.6.1-1** G.Niemann, „Maschinenelemente - Erster Band“, 1961, Fünfter berichtiger Nachdruck, Springer-Verlag Berlin / Göttingen / Heidelberg, Kapitel 19.3, Seite 298-300.
- 6.6.1-2** „Handbuch der Schadenverhütung“, Allianz Versicherungs-AG München und Berlin 1972, Kapitel 8.4, Seite 376-387.
- 6.6.1-3** National Transportation Safety Board, Safety Recommendation to A-98-67 - 70, Seite 1-5.
- 6.6.1-4** F.Rossig-Kruska, „Kraftwerkskomponenten - Wellenkupplung“, Kapitel aus „Stationäre Gasturbinen“, ISBN 3-540-42831-3, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003, Seite 105-112.
- 6.6.1-5** L.Balling, „GT-Kraftwerke“, Kapitel aus „Stationäre Gasturbinen“, ISBN 3-540-42831-3, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003, Seite 73.
- 6.6.1-6** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken, problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 2, ISBN 3-00-008429-0, www.Turboconsult.gmx.de, 2001, Kapitel 6.2 und Kapitel 6.3.
- 6.6.1-7** D.J.Wulpi, „Failures of Shafts“, „Metals Handbook - Volume 11 - Failure Analysis and Prevention“, ASM 1986, ISBN 0-87170 - 007 - 7, Seite 459 - 489.
- 6.6.1-8** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken, problemorientierte Triebwerkstechnik“, Band 5, ISBN 978-3-00-025780-3, www.Turboconsult.gmx.de, 2001, Bild 22.2.2-16.
- 6.6.1-8** I.E.Traeger, „Aircraft Gas Turbine Engine Technology, Second Edition“, Verlag : Glencoe/McGraw-Hill 1994, ISBN 0-07-065158-2, Seite 260.261, 398, 403, 423-435, 442, 500, 531, 549.
- 6.6.1-9** „The Jet Engine“, Rolls-Royce.plc. 1986, 994, ISBN 0-902121-2-35, Ausgabe 1996, Seite 67-71.
- 6.6.1-10** M.J.Kroes, T.W.Wild, „Aircraft Powerplants, Seventh Edition“, Verlag : Glencoe/McGraw-Hill 1990, ISBN 0-02-801874-5, Seite 304, 313, 454, 468.
- 6.6.1-11** D.Aslin, „Monitoring Bearing and Gear Failures in Aircraft Gas Turbine Engines“, Zeitschrift „Sensor Business Digest“, December 2001, www.sensorsmag.com/articles, Seite 1-7.