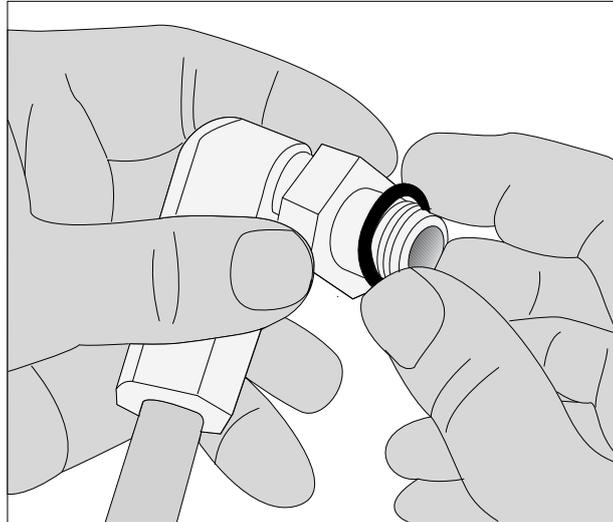


6.10.1.2 O-Ringe



Dieses Kapitel beschränkt sich auf **O-Ringe**. Sie sind für Flüssigkeiten ein besonders häufiges Dichtungselement. Das beruht wohl nicht zuletzt auf ihrer Einfachheit in Aufbau und Montage. Trotzdem sind sie nicht unproblematisch. Dies zeigen bereits viele bekannt gewordene Vorkommnisse bis zum Flugunfall, die in ursächlichem Zusammenhang mit dem Ausfall einer O-Ring-Dichtung stehen.

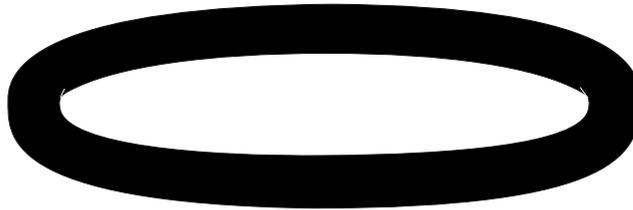
O-Ringe werden gerne dort verwendet, wo eine **Dichtung öfter gelöst und wieder fixiert werden muss**. Das erhöht jedoch die Wahrscheinlichkeit eines Problems. Typisches Beispiel sind Abdichtungen von Magnetstopfen im Ölsystem (Bild 7.1.3.1-4 und Lit. 6.10.1.2-20).

Die scheinbar einfache Anbringung der O-Ringe und die Positionierung zwischen den zu dichtenden Flächen kann sich als schwierig herausstellen. Sie erfordert anwendungsspezifische **Erfahrung, Fachkenntnis und Geschick**. Das gilt beispielsweise für das Zusammenschieben oder Einschrauben der zu dichtenden Komponenten. **Merkmale wie Fügekkräfte und Spiele** könnten eine Beschädigung des O-Rings (Bild 6.10.1.2-2) anzeigen. Fachkenntnis ist bereits gefragt, wenn der **O-Ring zum Positionieren vorzubehandeln** ist (z.B. Einfetten nach Vorschrift). Sie ist besonders gefordert, wenn der Ring ohne Beschädigung **über Kanten** (z.B. von Nuten oder Gewindespitzen, Bild 6.10.1.2-3) bei elastischer Vorspannung geschoben wird.

Auch **im Betrieb können O-Ringe beschädigt** werden (Bild 6.10.1.2-4 und Bild 6.10.1.2-7). Weil dieses Dichtelement aus einem **Elastomer** besteht, ist eine **Kompatibilität mit dem zu dichtenden Medium** unerlässlich (Bild 6.10.1.2-12). Bei **Änderung dieses Mediums** (z.B. Umstellung der Schmierölsorte oder des Kraftstoffs) ist die Kompatibilität sicherzustellen. Gegebenenfalls ist auf vom OEM geforderte Maßnahmen zu achten. Zusätzlich dürfen **temperatur- und belastungsabhängige Alterungseffekte** (Versprödung, plastische Verformungen, Bild 6.10.1.2-4) die Dichtwirkung über das vorgesehene Betriebsintervall nicht unzulässig beeinträchtigen. Ein vorgeschriebener **Tausch des O-Rings** hat im angegebenen Zeitraum zu erfolgen. Besonders nach **langen Stillstandszeiten** wie der Lagerung bzw. **‘Einmottung’** einer Maschine, ist der Zustand der O-Ringe zu überprüfen. Auch auf die Zulässigkeit einer Wiederverwendung ist zu achten. **Im Zweifelsfall gilt gewöhnlich der Tausch gegen ‘Neu’**.

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass O-Ringe sich geradezu als **SUPs** (nicht zugelassen) ‘anbieten’. Deshalb ist auf **Merkmale** wie Farbe, Elastizität, Herstellungsmerkmale (z.B. Grat, Fügestelle) **vor dem Einbau zu achten** (Lit. 6.10.1.2-20).

O-Ring, ein kleiner Ring mit großem Schadenspotenzial.



Probleme bei Wartung bzw. Montage:

- Ungeeignete Bedingungen
- Beschädigung
- Verwechslung, SUP
- Versäumter Austausch

Folgen

- Austritt von Medien:
 - Ölmangel: Lagerschäden
 - Kraftstoffmangel: Triebwerksausfall
 - Brände
- Fehlfunktionen (z.B. Regler)
- Gefahr eines "Multiple engine failure".

Bild 6.10.1.2-1

Bild 6.10.1.2-1: Der Aus- und Einbau von Komponenten mit einer O-Ring-Dichtung (z.B. an Magnetstopfen) sowie der Tausch eines O-Rings ist ein durchaus anspruchsvoller Vorgang. Typische Ursachen für wartungsbedingte Probleme sind

- **Ungünstige Montagebedingungen:** Dazu gehören schlechte Einsicht (Bild 6.10.1.2-8) und erschwerte Zugänglichkeit, beispielsweise eingebauter Aggregate.

- **Mangel an Erfahrung und Fachkunde.**

- **Beschädigung** beim Montagevorgang (Bild 6.10.1.2-2)

- **Materialprobleme, Verwechslung, SUP** (Lit. 6.10.1.2-20) mit vorzeitiger Alterung. Typische Folgen sind dann ungewöhnliche **bleibende Deformation, Schrumpfen und Rissbildung** (Bild 6.10.1.2-4).

Zu diesem Problemerkis gehört auch der **Wiedereinbau von O-Ringen**, die eigentlich gegen Neuteile zu tauschen sind. Damit kann die vorgesehene Lebensdauer deutlich überschritten und Alterungsschädigungen wirksam werden.

- **Versäumter Austausch**, z.B. nach der 'Einmottung' einer Maschine. Bild 6.10.1.2-10 zeigt dies am Beispiel eines Flugtriebwerks. Das kann auch für die **Langzeitlagerung** einer Komponente mit O-Ringen (z.B. Getriebe, Regler) bei ungünstigen Verhältnissen (z.B. hohe Temperatur) gelten.

O-Ring-Probleme können sich erfahrungsgemäß dramatisch auswirken. Bei Leckverlust eines Mediums wie Schmieröl oder Hydraulikflüssigkeit besteht die Gefahr, dass wichtige Komponenten (z.B. Lager, Regler) ausfallen. Diese nimmt zu, wenn beim gleichen Wartungsvorgang an **mehreren sicherheitsrelevanten Maschinen** das Problem auftrat (Lit. 6.10.1.2-20).

Entzündet sich austretende Leckflüssigkeit, besteht Brandgefahr für ganze Anlagen. Aggressive Medien oder **Zersetzungsprodukte** (z.B. von Hydrauliköl) auf Heißeilen sind in der Lage, gefährliche **Korrosionsschäden** auszulösen (Lit. 6.10.1.2-20).

Auch **unbemerkt abgescherte Teile eines O-Rings blockieren** kleine, eng tolerierte Querschnitte (z.B. in einem Regler) oder **verstopfen Öldüsen**.

Die scheinbar einfache Montage und Demontage einer O-Ring-Dichtung erfordert Erfahrung, Fachkenntnis und Geschick.

O-Ring wird "gekniffen":
- Beschädigung mit Leck
- Verstopfungsgefahr im Strömungsquerschnitt (z.B. Öl- oder Kraftstoffdüsen) durch abgescherte Partikel.

O-Ring Material geschädigt:
- geschrumpft,
- gequollen,
- angelöst,
- überhitzt: versprödet
- deformiert

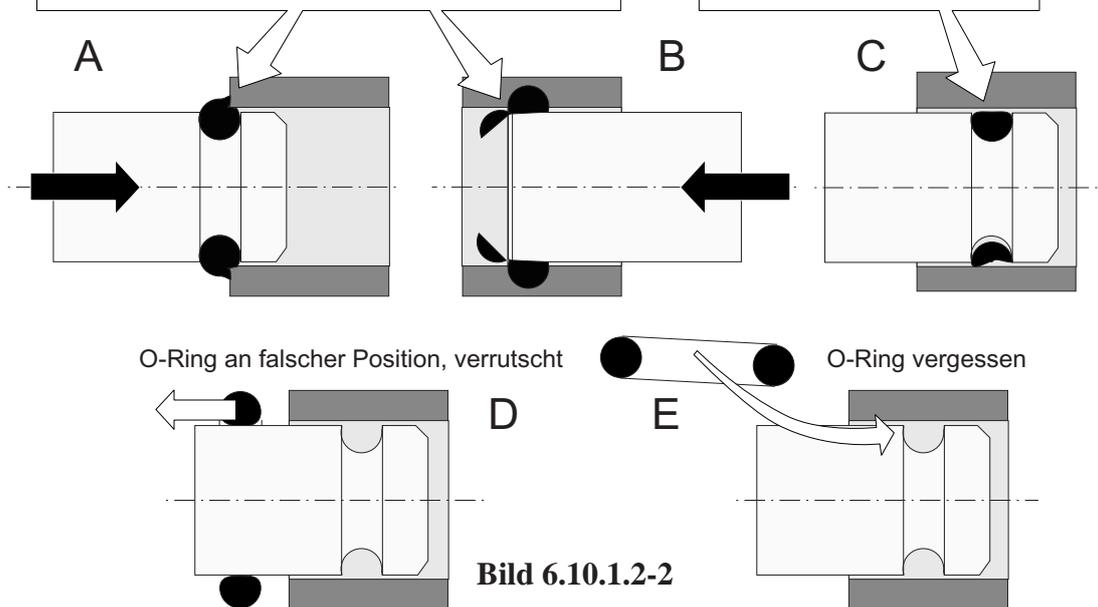


Bild 6.10.1.2- 2 (Lit. 6.10.1.2-5 bis Lit. 6.10.1.2-10 und Lit. 6.10.1.2-16): Dem Laien erscheint die **Montage eines O-Rings** einfach und unproblematisch. Dies täuscht. Sowohl das **Einbringen** des O-Rings vor dem Fügen in eine **Nut** bzw. auf den Sitz erfordert **Vorsicht und Geschick**. Muss man den Ring über **Kanten** einer Nut, Absätze oder Gewinde (Bild 6.10.1.2-3) schieben, kann er von einem **Schneidvorgang** beschädigt werden. Begünstigend wirken die übliche **elastische Aufweitung** und **entsprechend hohe Schnittkräfte**.

Eine besonders kritische Montagephase ist das **Zusammenschieben der Dichtflächen**.

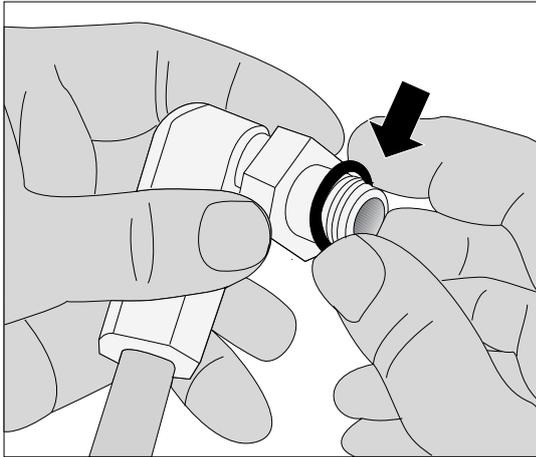
Wenn der O-Ring bereits **in der Wellennut** sitzt („A“), lässt er sich im heiklen Moment des **Einschiebens** beobachten. Sitzt der O-Ring in einer **Nut der Bohrung** („B“), ist er nicht

beobachtbar. **Ungeeignetes Handling** und/oder eine zu **scharfe Kante** kann den **O-Ring unbemerkt abscheren**. Um das zu erkennen bedarf es **Erfahrung und Gefühl**.

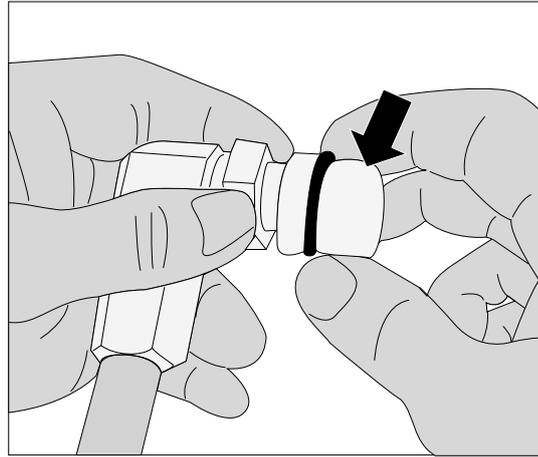
Verrutschende O-Ringe („D“) erfüllen ihre Dichtfunktion nicht mehr. Das gilt auch dann, wenn der O-Ring nur teilweise **aus der Nut verschoben** ist (Bild 6.10.1.2-7). Es ist sogar möglich, dass er bei der Montage weit verrutscht und sein **Fehlen nicht bemerkt** wird (Lit. 6.10.1.2-20).

Als ein ernstes, kaum zu erwartendes Problem hat sich das **Vergessen von O-Ringen** („E“, Lit. 6.10.1-20) herausgestellt. Eine solche Situation gilt bei einer Dichtung mit zwei O-Ringen als wahrscheinlicher (Lit. 6.10.1.2-20). Nicht selten ist eine mangelnde Berücksichtigung der **'Human Factors'** (Lit. 6.10.1.2-20) mit ursächlich.

Scheinbare Kleinigkeiten können Montageschäden verhindern.



Falsch: Beschädigungsgefahr, wenn O-Ringe über scharfe Kanten wie Gewinde gezerrt werden



O-Ring mit einer Abdeckung schützen

Bild 6.10.1.2-3

Bild 6.10.1.2-3 (Lit. 6.10.1-6): Bereits die **Vorbereitung der Dichtflächen** des O-Rings wie Nut oder Gegenfläche (Buchse) ist für eine dauernde, sichere Dichtwirkung von Bedeutung. Sie müssen **sauber** sein und dürfen **keine rauhen oder scharfkantigen Beschädigungen** wie Verschleißstellen, Riefen, Kerben oder Grate aufweisen.

Vor dem Einsetzen sind **alle Berührungsflächen** des O-Rings bei der Montage geeignet zu **schmieren**. Das ist besonders wichtig, falls nicht vom abzudichtenden Medium (z.B. Schmieröl) gewährleistet. Diese Forderung gilt beispielsweise für die gesamte Länge einer Schubstange. Das **Montage-Schmiermittel** muss auch für die Betriebsbedingungen geeignet sein. So darf es das abzudichtende Medium nicht unzulässig beeinflussen. Deshalb sind **nur Schmiermittel entsprechend den Vorschriften** zu verwenden. Im Zweifelsfall ist der **OEM** zu konsultieren.

Für **bewegliche Gasdichtungen** (Pneumatik) verwendet man oft bariumverseifte Schmiermittel.

Während des Einsetzens sollte der O-Ring **nicht verdreht und** wie bereits erwähnt **nicht über scharfe Kanten** gezogen werden (Skizze oben links). Gefährlich sind Konstruktionsmerkmale wie Keilnuten, Schlitz, Anschlussöffnungen und Gewinde. Um eine Beschädigung zu verhindern, genügt die Abdeckung mit einer **Kunststoffkappe** oder einem **Kunststoffband** (Skizze oben rechts).

Der Ring sollte **beim Aufschieben nicht zu stark gedehnt werden**. Bis zum Zusammenschieben der Dichtflächen ist dem O-Ring **Zeit zu lassen, sich wieder elastisch zusammenzuziehen**. Der Grund ist, dass Elastomere nicht wie ein Metall zurückschnellen. **In der Nut sollte der O-Ring nicht über 5% seines Innendurchmessers gedehnt sein.**

Beim Einschieben in die 'Buchse' werden **Dreh- und Hin- und Herbewegungen nicht empfohlen**. Das Beschädigungsrisiko steigt damit eher.

Bild 6.10.1.2-4 (Lit. 6.10.1.2-2, Lit. 6.10.1.2-3 und Lit. 6.10.1.2-15):

Um Schäden an O-Ringen vorbeugend oder mit Abhilfen zu vermeiden ist es notwendig, **Schadensursachen und -mechanismen zu identifizieren**. Voraussetzung ist die **Bewertung des Schadensbilds**. Auf spezifische Probleme soll im Folgenden detaillierter eingegangen werden:

Chemische Zersetzung wird in erster Linie von der **Betriebstemperatur** bestimmt. Sie sollte unter der **Langzeit-Temperatur** für Elastomere, meist zwischen 135° C und 150° C (Bild 6.10.1.2-12) liegen. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass es sich um eine **Dauertemperatur** und nicht um eine kurzzeitige Maximaltemperatur (siehe Abschnitt „**Thermische Schädigung**“) handelt. Bei zu hoher Temperatur kommt es zur Veränderung der Molekülstruktur (Alterung). Die thermische Beständigkeit eines Elastomers ist selbst beim gleichen Typ stark von der individuellen Qualität abhängig. Verunreinigungen und die Vernetzung der Moleküle spielen eine wichtige Rolle. Eine Zersetzung wird auch von **Spurenmetallen** ausgelöst. Das bedeutet, dass die Qualitätssicherung sich letztendlich auf den **Hersteller und die Bezugsquelle** verlassen muss. Das kann unter dem Gesichtspunkt von SUPs von Bedeutung sein (Lit. 6.10.1.2-20).

Typische Folgen einer Alterung:

- Die **Versprödung** ist das Hauptproblem und kann als Folge eines temperaturbedingten Alterungsprozesses angesehen werden. Sie macht für **spontanes Versagen und Rissbildung bei schockartiger Belastung** besonders empfindlich. Zur Versprödung neigen „Nitrile“.

- **Festigkeitsabfall**

- **Werkstoffveränderung/Zersetzung**,

- **Rissbildung** und Risswachstum. Eine besondere Form ist **innere Rissbildung** als Folge eindiffundierter Gase (Bild 6.10.1.2-5).

- **Blasenbildung**: auch diese Schäden sind auf Gasdiffusion zurückzuführen (Bild 6.10.1.2-5).

- **Bleibende Verformung**, Kriechen. In diesem Zusammenhang steht die Abnahme der Rückfederung (engl. resilience).

- **Kohlendioxid** kann sich in manchen Elastomeren vollkommen lösen und diese mit einer **schwammartigen Struktur zum Schwellen** bringen.

Thermische Schädigung wird hier als Folge einer **Überhitzung** verstanden. Sie tritt ein, wenn die Temperatur überschritten wurde, bei der sich in kurzer Zeit das **Elastomer zersetzt**. Eine solche Situation liegt vor, wenn nach dem Abstellen einer Maschine (z.B. Gasturbine, Motor mit Turbolader) die Öl- oder Luftkühlung fehlt. Das führt zu starkem Aufheizen aus den benachbarten Heißeilen („**Heat Soaking**, Bild 6.10.1.2-6).

Kompressionsverformung ist eine **plastische (bleibende) Verformung** des O-Rings unter den **Druck-Anlagekräften**. Im Zusammenhang mit **Temperaturwechseln** und der dabei entstehenden **Volumenänderung** des Rings kann ein Leck entstehen (Bild 6.10.1.2-7). Besonders **Fluor-Elastomere** (Fluorkautschuk) neigen bei typisch hohen Einsatztemperaturen zur **Kriechverformung**.

Explosiver Druckabfall: In das O-Ring Elastomer **eindiffundiertes Medium**, besonders Gas, sammelt sich unter der Oberfläche in Fehlstellen wie Mikroporen. Bei einem plötzlichen Druckabfall expandiert das Gas oder es kommt bei Flüssigkeiten zur **Dampfbildung**. Die Folge sind Schädigungen wie **Blasen, Risse und Löcher**.

Extrusion (Bild 6.10.1.2-14) geht auf eine Überlastung des O-Rings durch die **Druckdifferenz am Dichtspalt** zurück (Bild 6.10.1.2-7).

Einbauschäden entstehen auf unterschiedliche Weise. Am häufigsten sind **Schnitte** und **abgescherte Bereiche**, die auf **Unachtsamkeit beim Zusammenschieben** der Dichtflächen zurückzuführen sind (Bild 6.10.1.2-2 und Bild 6.10.1.2-3).

Fortsetzung übernächste Seite

Schäden an O-Ringen und ihre ursächlichen Einflüsse



Abrasion

Schadensbild:
Abrieb durch gleitende Bewegung. Flache Anlageflächen.
Kratzer und eingedrückte Partikel.

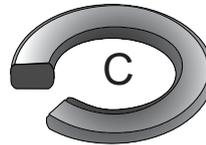
Ursächliche Einflüsse:
- Raue Dichtflächen
- Zu hohe Temperaturen
- Erosive Partikel im Öl
- Schwingbewegungen
- Nicht ausreichende Glätte des O-Rings.



Chemische Zersetzung

Schadensbild:
In verschiedenen Graden Blasen, Risse, Löcher. Oft sind diese Merkmale nur mit einer Messung der physikalischen Eigenschaften erkennbar.

Ursächliche Einflüsse:
- Ungeeignetes O-Ringmaterial für die thermische und/oder chemische Beanspruchung. (Materialverwechslung? Boguspart?)



Kompressionsverformung

Schadensbild:
An den Auflageflächen abgeflachter Querschnitt.

Ursächliche Einflüsse:
- Ungeeignetes O-Ringmaterial, (Materialverwechslung? Boguspart?)
thermisch oder chemisch bedingte Volumenvergrößerung/ Quellen.
Ungenügend ausgehärtet.
- Zu starke Kompression: Maßlich ungeeigneter Ring (Verwechslung?)
- Zu kleine Nut/Spaltweite.



Explosiver Druckabfall

Schadensbild:
Das vom O-Ring absorbierte Gas dehnt sich beim Druckabfall aus und erzeugt auf der Seite des Druckwechsels Blasen, Pocken, Löcher.

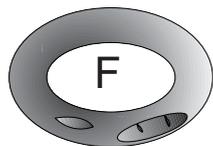
Ursächliche Einflüsse:
- Schnelle Druckwechsel
- Ungeeignetes, zu weiches O-Ringmaterial (Materialverwechslung? Boguspart?)



Extrusion

Schadensbild:
Die Druckdifferenz presst freiliegende Teile des O-Rings durch den Dichtspalt.
Auf der Niederdruckseite zackige, zerfetzte Ränder.

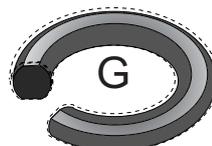
Ursächliche Einflüsse:
- Zu großer Spalt
- Ungeeignetes, zu weiches O-Ringmaterial (Materialverwechslung? Boguspart?)
- Schädigung des O-Ringmaterials durch Betriebseinflüsse



Einbauschaden

Schadensbild: Kleine Schnitte, Kerben, Ausschnitte

Ursächliche Einflüsse:
- Scharfe Ecken, Grate oder Schneiden (Gewinde)
- Ungeeignete Maße des Rings
- Wenig elastischer oder weicher Ring (z.B. gequollen)
- Verunreinigung des Rings (z.B. Span)
- Einbau (Kneifen)



Ausgasen, Herauslösen von Bestandteilen

Schadensbild:
Identifikation schwierig. Verkleinerung der Ringmaße

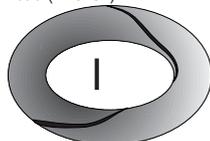
Ursächliche Einflüsse:
- Ungeeignetes O-Ringmaterial, zu weich, Elastomer mit Weichmacher (Materialverwechslung? Boguspart?)
- Ungeeignetes Reinigungsmittel



Überkomprimiert

Schadensbild:
Parallele flache Anlageflächen, gegebenenfalls mit Umfangsrissen.

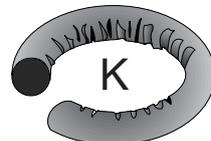
Ursächliche Einflüsse:
- Ungeeignetes O-Ringmaterial, thermische oder chemische Volumenveränderung (Materialverwechslung? Boguspart?)
- Maßlich ungeeigneter Ring (Verwechslung?)
- Zu kleine Nut.



Spiralschaden

Schadensbild: Am Umfang spiralförmige Schnitte oder Markierungen

Ursächliche Einflüsse:
- Schwieriger oder zu enger Einbau, Einbaufehler
- Langsame hin und her gehende Bewegung der Sitzflächen.
- Unelastisches Elastomer
- Oberflächenfehler wie Rauigkeit oder Herstellungsgrat
- Ungenügende Schmierung



Thermische Schädigung

Schadensbild: Radiale Risse im Bereich der thermisch beanspruchten Flächen. Härteabfall (Erweichung), möglicherweise mit spiegelglatter Oberfläche

Ursächliche Einflüsse:
- Ungeeignetes O-Ringmaterial (Materialverwechslung? Boguspart?)
- Extreme Ausschläge von Temperaturzyklen.
- Reibungserwärmung bei hochfrequenten Schwingungen

Bild 6.10.1.2-4

Fortsetzung von Seite 6.10.1.2-5

Auch sog. **Spiralschäden** lassen sich dazu zählen. Sie stehen im Zusammenhang mit einer **Verdrillung des O-Rings**. Ursache ist ein **drehendes Zusammenschieben**.

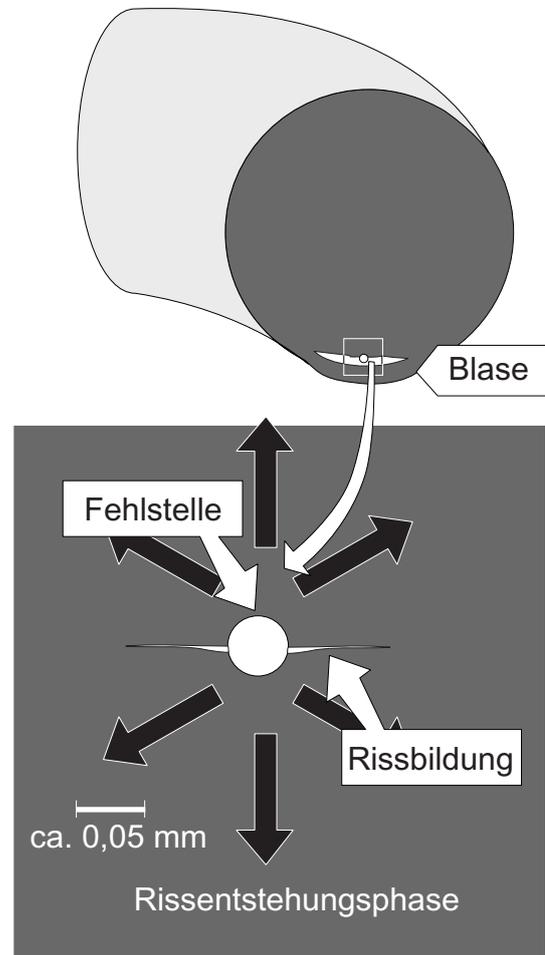
Ausgasen und/oder Herauslösen von Bestandteilen zeigt sich im **Schrumpfen** auf Grund des **Volumenverlusts**. Bei hohen Temperaturen kommt es zu einem **chemischen Zersetzungsprozess**. Er lässt Anteile des Dichtungsmaterials flüssig oder gasförmig werden. Besonders thermoplastische Urethane sind für eine solche Schädigung empfindlich.

Dringt **Wasserdampf oder überhitztes Wasser** in die Poren die sich beim Ausgasen bilden, entsteht eine **schwammartige Struktur**. Ist der O-Ring **nicht genügend abgestützt**, muss mit einem schnellen Dichtungsschaden gerechnet werden.

Bild 6.10.1.2-5 (Lit. 6.10.1.2-12): Die Entstehung von **Blasen** und **inneren Rissen** ist auf eine **Diffusion des abdichtenden Mediums** zurückzuführen. Diese Diffusion verläuft zu **Fehlstellen** wie **winzigen Poren** mit denen (ca. 3 Vol %) in Elastomeren zu rechnen ist. Das dort angesammelte Medium führt zu **Druckanstieg und Zugspannungen senkrecht zur Oberfläche** (engl. not net modal flow). Die **Rissbildung** verläuft dann parallel zur Oberfläche. Weitet der Riss sich auf, entsteht an der Oberfläche eine **Blase** (engl. Blister).

Für die Blasenbildung sind **besonders weiche Duromere** (niedriger Schubmodul bzw. **niedrige Härte**) empfindlich. Die Neigung zur Blasenbildung kann in einem engen Temperaturbereich mit einem **Füller** deutlich herabgesetzt werden.

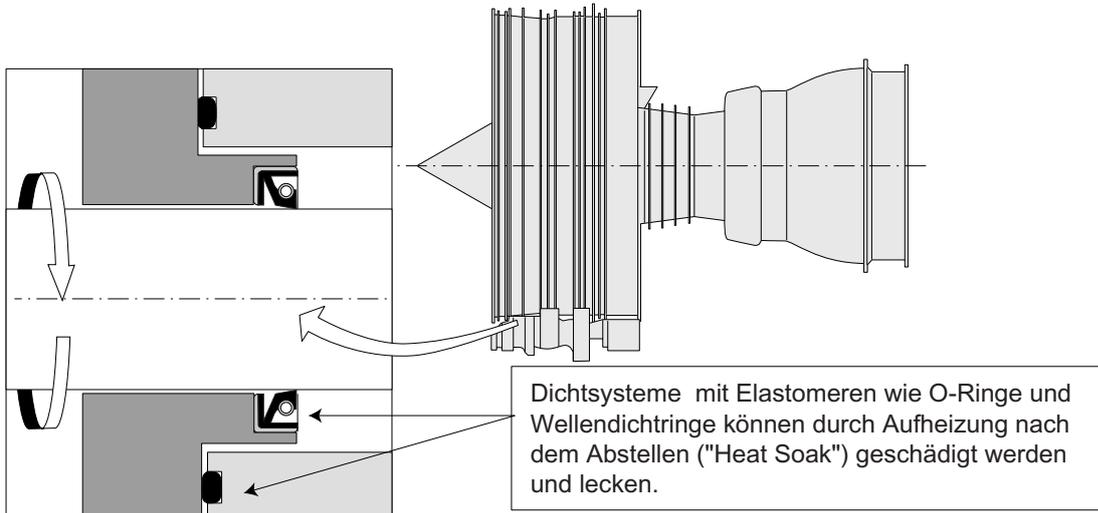
Modell innerer Rissbildung und der Entstehung von Blasen in O-Ringen.



Unter Druck stehendes, abdichtendes Medium diffundiert in Fehlstellen/Poren bis zum Diffusionsgleichgewicht. Übersteigt der Druck einen kritischen Wert, kommt es zur Blasenbildung.

Bild 6.10.1.2-5

Ursache für unzulässige Leckagen kann die Schädigung von Elastomerdichtungen durch Überhitzung nach dem Abstellen einer heißen Maschine sein.



Nach 'scharfer' Fahrt besteht bei abruptem Abschalten des Motors die Gefahr einer Überhitzung und Zerstörung der Gleitlager des Turboladers.

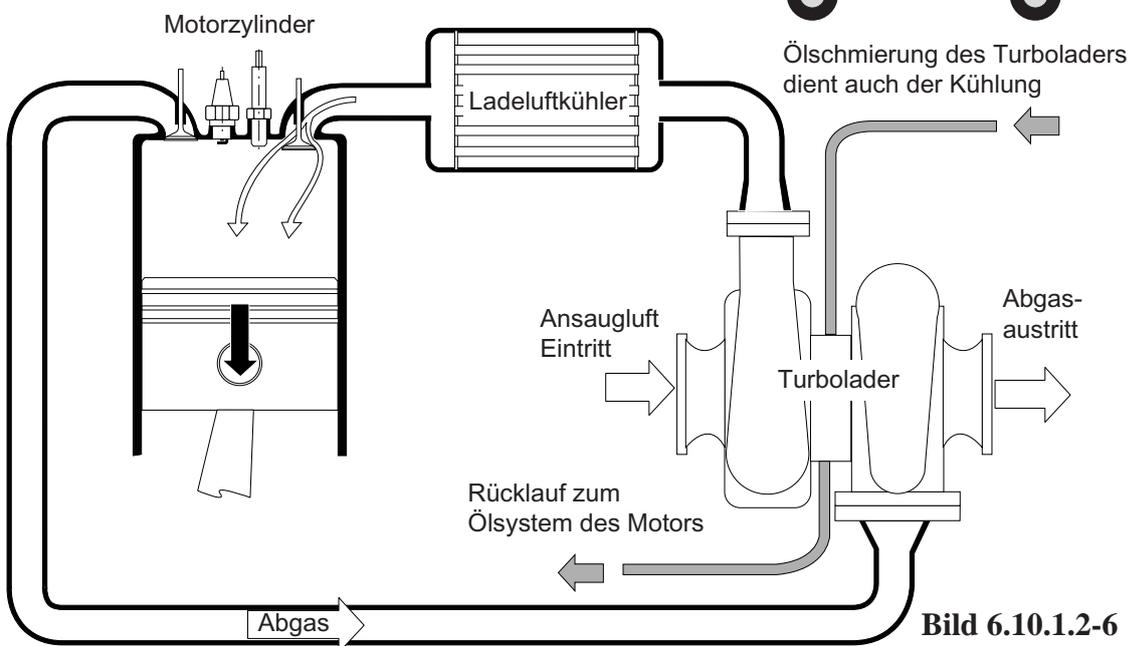


Bild 6.10.1.2-6 (Lit. 6.10.1-5): Beim **Abstellen einer thermischen Maschine wie Motoren (Rahmen unten) mit Turboladern oder einer Gasturbine/Triebwerk** (Skizzen oben) kommen auch der Öldurchfluss und die Kühlluft zum

Stillstand. Dadurch kann die Wärme aus heißeren Teilen zu den Dichtungen vordringen (**heat soaking**). Sind diese Temperaturen für das eingesetzte Dichtungselastomer zu hoch, ist mit **bleibender Verformung** und/oder Schä-

digungen wie Versprödung und **Rissbildung** zu rechnen (Bild 6.10.1.2-4). An Pumpen wird bei Wellendichtringen gewöhnlich eine **minimale Leckage** von etwa ein Tropfen pro Minute (entspricht 3 ml/h) toleriert. Auch dies wird möglichst noch verhindert, falls Lackierung (besonders störend da von außen sichtbar!) und Beschichtungen gefährdet sind. Es ist jedoch zu bedenken, dass eine Alterung des O-Rings schnell zu unzulässiger Leckage von mehreren Tropfen pro Minute führen kann.

Bild 6.10.1.2-7 (Lit. 6.10.1.2-18): O-Ringe sind neben der Belastung aus der **Druckdifferenz im Medium** von einem weiteren Mechanismus **mechanisch beansprucht**.

Üblicherweise ist ein O-Ring **in eine Umfangsnut eingebettet**. Er wird von der Dichtfläche **elastisch zusammengedrückt** und liegt dort wie in der Nut flächig an („A“).

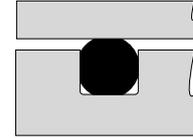
Kommt es im Betrieb zur **Erwärmung**, **dehnt sich das Elastomer** deutlich stärker (ca. eine Größenordnung) aus als die metallischen Bauteile. Diese Volumenvergrößerung führt zu einem Anstieg der **Kompression des Rings** („B1“). Die **Pressung** formt den Ring **plastisch** (Kriechen) an.

Kühlt nun der Dichtungsbereich, beispielsweise beim Abstellen der Maschine, **schrumpft das Ringvolumen** entsprechend. Ist die **plastische Verformung** so groß, dass die **elastische Rückfederung des Ringmaterials nicht mehr ausreicht den Spalt zu schließen**, kommt es zum **Leck** („C1“).

Ein solcher Vorgang kann zu einem weiteren Schadensbild, der **Scherung** führen. In diesem Fall wird das **Dichtungsmaterial in den Dichtspalt über die Nutkante zur Niederdruckseite gepresst** („B2“). Das wird von einem alterungsbedingten Festigkeitsverlust begünstigt. Dabei kann der Ring zumindest **örtlich abscheren** und ein **Leck** entstehen („C2“).

Mechanismen die zum Versagen einer O-Ring-Dichtung führen.

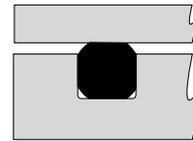
A Einbauzustand, elastische Anformung.



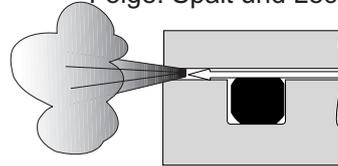
Kompression



B1 Erhöhte Betriebstemperatur, Dichtung dehnt sich stark aus. Folge: Plastische Anformung.



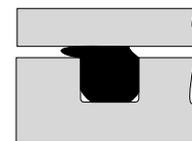
C1 Bei der Abkühlung schrumpft die verformte Dichtung. Folge: Spalt und Leckage.



Scherung



B2 Bei hoher Betriebstemperatur und großem Druckabfall wird die Dichtung abgescher.



C2 Ausblasen der abgescheren Lippe. Folge: Spalt und Leckage.

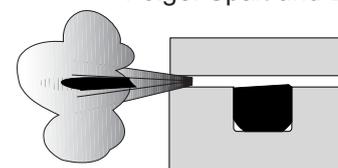


Bild 6.10.1.2-7

Bei einem vermuteten inneren O-Ring-Schaden ist die Chance einer Dokumentation durch Röntgen vor dem Zerlegen zu nutzen !

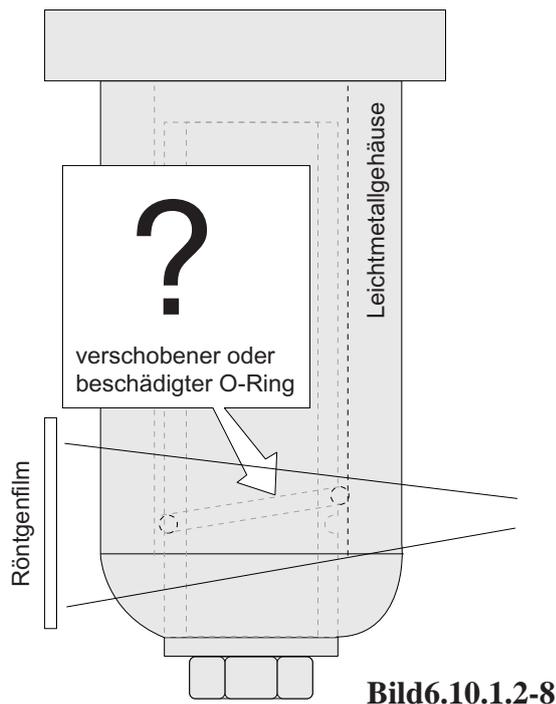


Bild 6.10.1.2-8 (Lit. 6.10.1.2-14): Schadensrelevante O-Ringe befinden sich gewöhnlich **im Inneren schlecht oder nicht einsehbarer Hohlräume**. Bei der Demontage besteht die **Gefahr einer Beschädigung oder der Veränderung schadenserklärender Positionsbesonderheiten** (Bild 6.10.1.2-2). Das legt falsche Rückschlüsse nahe. Es ist deshalb von großer Bedeutung, die **unveränderte Position des O-Rings im zusammengebauten Zustand** zu erkennen und zu dokumentieren. Wider Erwarten hat die Praxis gezeigt, dass zumindest in Gehäusen aus Leichtmetallen dies mit **Röntgen** möglich ist. Das O-Ring Material (möglicherweise abhängig vom Füllmaterial) schwächt die geeignet eingestellten Röntgenstrahlen ausreichend, um genügend Kontrast in den Bildern zu erzeugen.

Merksatz:

Erst **nach der Röntgendokumentation** sollte mit der **Demontage einer Komponente** begonnen werden.

Merksatz:

Nach **langen Lagerzeiten** im verbauten Zustand sind O-Ringe auf Alterungsschäden wie **Schrumpfen und Abplattungen** zu überprüfen. Sicherer ist, generell einen Austausch vorzunehmen.

Bild 6.10.1.2-10 (Lit. 6.10.1.2-9): Obwohl es sich im folgenden Beispiel um ein Flugzeug handelt, tritt eine vergleichbare Situation nach **längeren Stillstandszeiten auch bei Fahrzeugen, Maschinen und Anlagen** auf.

Drei Jahre nachdem das bereits ca. dreißig Jahre alte Flugzeug ebenfalls **drei Jahre 'eingemottet'** und dann zum Löschflugzeug umgebaut wurde, kam es wieder in Dienst. Vorher wurde es einer umfassenden Inspektion unterzogen. Dabei wurden keine bedenklichen Veränderungen festgestellt. Insbesondere bei der Überprüfung des Kraftstoffsystems ca. drei Monate vor dem Unfall wurden keine Kraftstoffflecks oder bedenklicher Kraftstoffgeruch festgestellt.

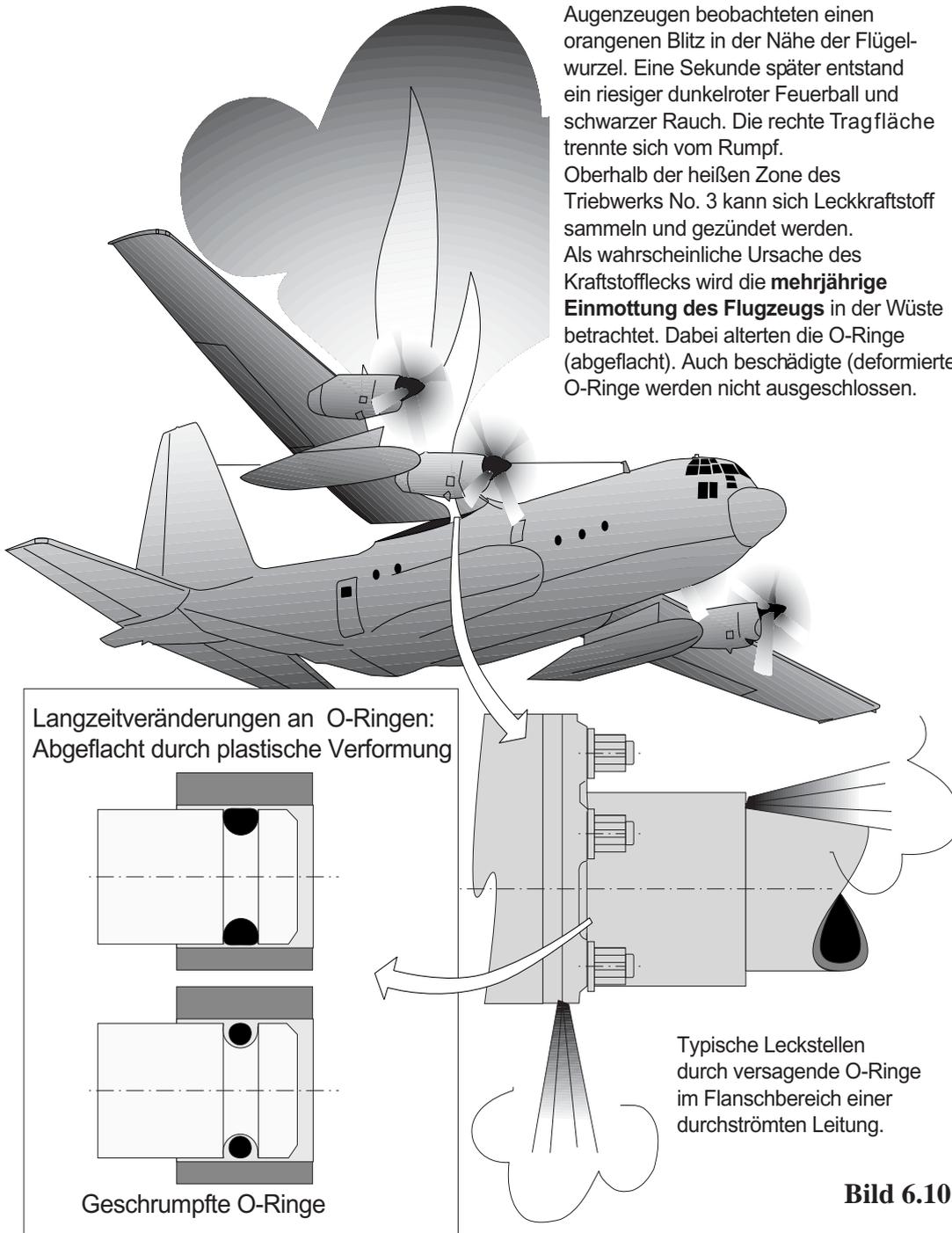
Trotzdem wusste man, dass es nach einer dreijährigen Aufbewahrung zum **'Austrocknen' und Schrumpfen der O-Ringe** kommen kann. Weil es sich bei den O-Ringen jedoch um **'on condition'-Teile** handelt, sind diese nicht lebensdauerbegrenzt. Ein Tausch gilt in diesem Fall besonders für **abgeflachte oder geschrumpfte O-Ringe**. (Bild 6.10.1.2-4). Der Flugzeughersteller gab an, dass ein gebrauchter O-Ring nicht wieder eingebaut wird.

Bereits an anderen Flugzeugen des gleichen Typs traten im militärischen Einsatz **Kraftstofflecks als Folge von O-Ring-Schäden** auf. Ein Feuer wurde jedoch in Zusammenhang mit einem Leck nicht beobachtet. Trotzdem gab es

Maschinenelemente: Statische Dichtungen, O-Ringe

Gealterte und deformierte O-Ringe stehen im Verdacht diesen katastrophalen Schaden ausgelöst zu haben.

Augenzeugen beobachteten einen orangenen Blitz in der Nähe der Flügelwurzel. Eine Sekunde später entstand ein riesiger dunkelroter Feuerball und schwarzer Rauch. Die rechte Tragfläche trennte sich vom Rumpf. Oberhalb der heißen Zone des Triebwerks No. 3 kann sich Leckkraftstoff sammeln und gezündet werden. Als wahrscheinliche Ursache des Kraftstofflecks wird die **mehrfährige Einmottung des Flugzeugs** in der Wüste betrachtet. Dabei alterten die O-Ringe (abgeflacht). Auch beschädigte (deformierte) O-Ringe werden nicht ausgeschlossen.



eine Warnung des militärischen Betreibers für den Fall eines Kraftstofflecks in der Nähe von Triebwerken. Das Heißteil des primären Scha-

denstriebwerks liegt im unteren Gondelbereich (dry bay). In diesem kann sich Leckkraftstoff, der auf das heiße Triebwerk fließt, sammeln.

Maschinenelemente: Statische Dichtungen, O-Ringe

Der verwendete Kraftstoff (Jet-A1) hat eine relativ niedrige Zündtemperatur (flash point). Die Entzündungstemperatur des Kraftstoffdampfs mit einer Flamme beträgt ca. 40 °C. Diese Schäden wurden auf **Verbiegung oder thermische Dehnungen von Kraftstoffleitungen** zurückgeführt. Sie konnten offenbar von den gealterten Dichtringen nicht mehr ausgeglichen werden. Undichtigkeiten traten häufiger an den **Verschraubungen** (Kupplungen) als beispielsweise an einem **Kraftstoffventil** auf (Bild 6.10.1.2-11). Die Lecks hatten unterschiedliche Stärke. Über längere Zeit bildeten sich 'Ausschwitzungen' oder Tropfen. Die Endphase ist ein plötzliches Versagen der Dichtung mit einem **Sprühkegel**.

O-Ring-Dichtungen können an Rohrleitungsverschraubungen durch Verbiegen und Dehnungen der Leitungen bei Temperaturänderungen leak werden.

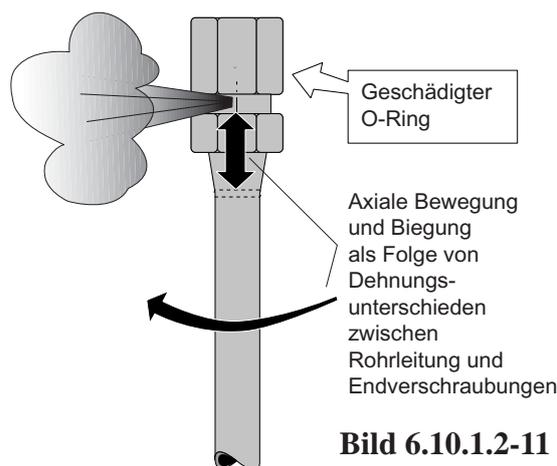


Bild 6.10.1.2-11 (Lit. 6.10.1.2-9): **Wärmedehnungsunterschiede** zwischen Rohrleitungen und Verschraubungen können merkliche Bewegungen auslösen. Dabei ist Biegung und/oder axiale Verschiebung möglich. Werden so die dichtenden **O-Ringe in den Verschraubungen/Kupplungen deformiert** und/oder unterliegen einem **Verschleiß**, kommt es zu Lecks (Bild 6.10.1.2-10). In solchen anwendungsspezifischen Bereichen muss besonders auf den O-Ring-Zustand geachtet werden.

Bild 6.10.1.2-12 (Lit. 6.10.12-2 und Lit. 6.10.1.2-4): O-Ringe lassen sich aus vielen **unterschiedlichen Elastomeren** herstellen (Querspalte oben). Diese Materialien können spezifisch von **bestimmten Medien geschädigt** werden (Längsspalte links). Dabei ist zu berücksichtigen, dass neben dem abzudichtenden Medium wie synthetischem Öl (z.B. in Turbomaschinen), Hydraulikflüssigkeit oder Kraftstoff (z.B. Biokraftstoffe, Bild 8.2-2.1) noch weitere in Frage kommen. Natürlich darf **Korrosionsschutzöl** für eine Langzeitlagerung nicht bedenklich sein. Bei Wartung und Überholung ist eher mit Kurzzeitkontakt zu rechnen. Hier handelt es sich um bedenkenswerte Medien wie **Rostlöser, Entfettungsmittel, Lösungsmittel und Schmierstoffe**. Auch sie dürfen nur entsprechend den maschinenspezifischen Vorschriften verwendet werden. Im Zweifelsfall sollte der OEM kontaktiert werden.

Beeinflussung der Eigenschaften von O-Ring-
Werkstoffen durch Medien des Maschinenbetriebs.

O-Ring Material Medium (Öl, Fett, Kraftstoff Reinigungsmittel)	Fluorelastomere				EPDM Ethylen Propylen	Nitril-Kautschuk NBR ("Buna-N")	Silikone	Fluorsilikone
	Perfluor- elastomer	Compound ("Viton")	FPM (DIN), FKM (ASTM) ("Viton ETP")	TFE/P - Compound				
MIL-G-24139A (Aeroshell Grease 7A)	1	1	1	1	4	2	2	1
Mineralöl	1	1	1	1	3	1	2	1
Dieselloil	1	1	1	1	4	1	4	1
MIL-L-7808 Synthetische Öle	1	1	1	1	4	2	4	2
MIL-L-23699	1	1	1	1	4	2	4	2
MIL-T-5624 (JP-3, JP-4, JP-5)	1	1	2	1	4	1	4	2
MIL-T-83133 (JP-8)	1	1	2	1	4	1	4	2
Trichlorethylen/TCE (Tri)	1	1	4	1	4	3	4	2
Perchlorethylen (Per)	1	1	4	1	4	2	4	2
Petroleum <121°C	1	1	1	1	4	1	2	2
Methylen Chlorid	1	2	-	2	4	4	4	2

1 = empfohlen, 2 = wahrscheinlich geeignet, 3 = Grenzfall, 4 = nicht empfohlen (nach Angaben der Fa. Allorings)

Fluorelastomere: Hohe Temperaturbeständigkeit und chemische Beständigkeit. Niedrige plastische Verformung unter Druck. **Perfluorelastomer** Einsatztemperatur von -23 bis +315 °C, Viton Einsatztemperatur je nach Typ von - 62 bzw. -20 bis 204°C.

EPDM: Beständig gegen Sonnenlicht, Wettereinflüsse und Ozon. Gute Wärme- und Druckkriechfestigkeit, Einsatztemperatur -54 bis +120°C.

Nitril-Kautschuk: Gut beständig gegen Kohlenwasserstoffe wie Petroleum und Kraftstoffe. Verbreitet bei den meisten Ölen, Hydraulikflüssigkeiten und Alkoholen verwendet im Temperaturbereich von -82 bis +121 °C.

Silikone: Beständigkeit gegen Sonnenlicht, Ozon und Pilzbefall. Schlechte Reiß- und Verschleißigenschaften. Temperaturbereich -62 bis +204 °C.

Fluorsilikone: Chemikalienresistent. Temperaturbereich -62 bis 176°C.

Bild 6.10.1-12

Einfache Möglichkeit einer ersten groben Identifizierung des O-Ring-Materials.

Mit diesem einfachen, kleinen und robusten Gerät, das in eine Werkzeugbox oder Anzugtasche passt, lassen sich die folgenden Aufgaben in einem ersten Schritt bearbeiten:

- Überprüfung des O-Rings **beim Einbau**
- Feststellung **falsch gekennzeichnet/ beschrifteter** O-Ringe auf **Verwechslungen** und Bogus-Parts.
- **Neuteilkontrolle**, z.B. im Wareneingang
- Beim **Sortieren** von O-Ringen
- **Unterscheiden** bekannter O-Ringe

Vorsicht! Dieses Verfahren sollte als Vergleichsverfahren angewendet werden. D.h. es sollten abgesicherte Werte eines "Sollteils" bereits vorliegen. Trotzdem ist das Verfahren in seiner Aussage begrenzt. Gleiche Werte sind keine Gewähr, dass es sich um das gewünschte Material handelt. Im Zweifelsfall sind weitere Verfahren absichernd anzuwenden.

Bild 6.10.1.2-13

Die Rücksprunghöhe ist ein Indiz für Härte, Dämpfung und elastische Eigenschaften des O-Ring-Materials.

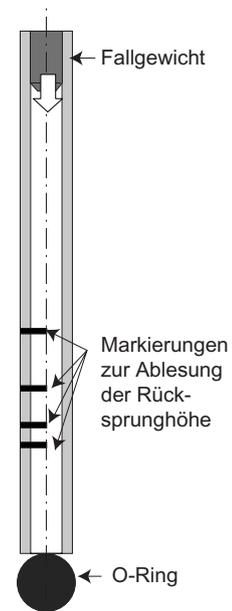


Bild 6.10.1.2-13 (Lit. 6.10.1.2-2): Die **Identifizierung des O-Ring Materials**, zumindest eine Zuordnung zu **größeren 'Familien'**, kann gerade auch zur Ermittlung der Versagensursache von Interesse sein.

Dazu ist das dargestellte einfache Gerät geeignet. Es besteht aus einem Rohr in dem ein Gewicht aus einer vorgegebenen Höhe auf den Prüfling fällt. Die Höhe des **Rückspringens** wird den kalibrierten Bereichen zugeordnet. Die folgende Abstufung mit abnehmender Rücksprunghöhe ist materialtypisch:

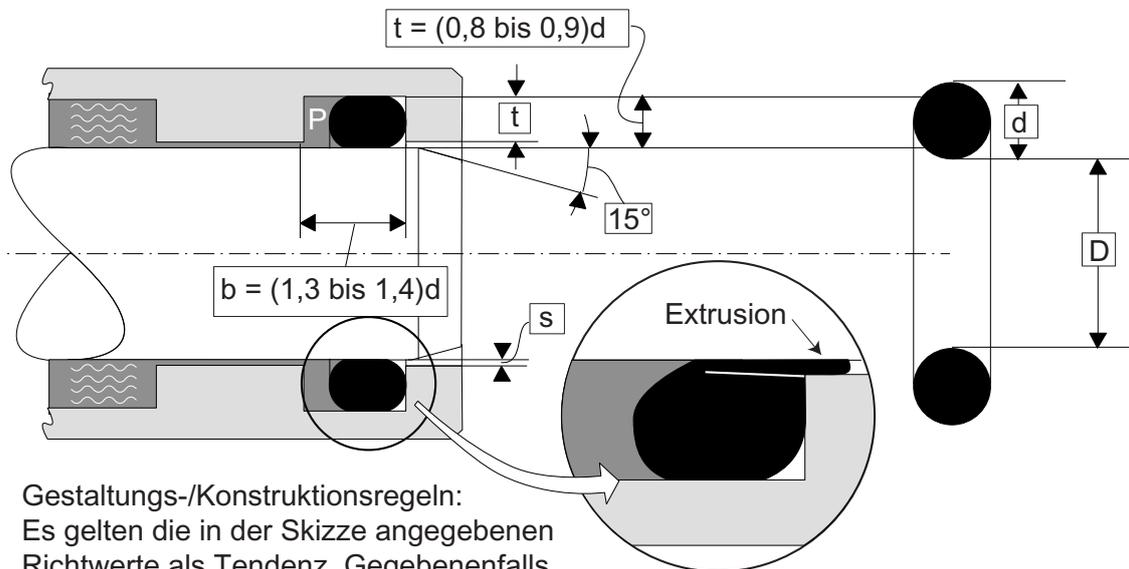
- EP (Ethylen Propylen),
- Nitrile (Buna-N),
- Perfluor-Kautschuk (ähnlich PTFE),
- Fluor Kautschuk, Fluorkarbon-Kautschuk (Viton ®).

Bild 6.10.1.2-14 (Lit. 6.10.1.2-21): Diese Zusammenstellung kann als eine Art 'Check Liste' für die **Auswahl des O-Rings und Gestaltung von Nut und Dichtspalt** betrachtet werden.

Im Falle eines Schadens gibt sie einen Überblick ursächlicher Besonderheiten und Einflüsse. Das kann zur Erstellung eines **Ursache-Wirkungs-Diagramms** („Fischgrätendiagramm“, Band 1 Bild 2.2.2.1-2) im Rahmen einer **Problem-/Schadensanalyse** äußerst hilfreich sein.

Wie der Konstrukteur O-Ring-Schäden und Problemen vorbeugen kann.

nach Angaben von W.Haas



Gestaltungs-/Konstruktionsregeln:

Es gelten die in der Skizze angegebenen Richtwerte als Tendenz. Gegebenenfalls Angaben in Konstruktionsrichtlinien der Fachliteratur anwenden.

- **Vorpressung:** Nuttiefe $t < d$
- **Nutbreite** $b > d$
- **Oberflächenqualität/ Glätte** abhängig von der **Funktion:**
Wellenanlage besser als Nutseiten besser als Einfahrschräge.
- **Druckverlauf** im Medium:
Pulsierend bessere als für statischen Betrieb.
- **Gleitende Dichtflächen** Rauigkeit nur 1/4 der Angaben für statischen Betrieb
- **Extrusionen/Abquetschen** (Detail) verhindern: Abhängig vom Mediendruck "p".
Steife **Gehäusekonstruktion** (niedrige elastische Dehnungen) um die Spaltweite "s" einzuhalten.
Geeignetes O-Ring **Material**, falls notwendig Stützring aus härterem Material.
- **Einfahrschrägen** vorsehen, um **Montageschäden** zu vermeiden (Bild 6.10.1.2-2).
Bohrungen in eine Nut zurücksetzen.
- **Montageanweisungen /-hilfen** wie der Gebrauch einer Schutzhülse (Bild 6.10.1.2-3).
- Um **Maßtoleranzen** zu 'entschärfen' und **Vorspannungsabfall** durch unzulässige **Relaxation** zu vermeiden, möglichst große Schnurdicke "d" vorsehen.
- **Haftreibung** bei Demontage berücksichtigen.
- Geeignetes **anwendungsspezifisches Elastomer** auswählen. Zu berücksichtigen ist **Chemikalienbeständigkeit** (Bild 6.10.1.2-12). Im Kfz-Bereich Beständigkeit gegen Kraftstoff wie Benzin oder Biodiesel und Bremsflüssigkeit. **Beständigkeitslisten** von der Bezugsquelle anfordern.

Bild 6.10.1.2-14

Literatur zu Kapitel 6.10.1

- 6.10.1.2-1** Fa. Parker Hannifin GmbH, Katalog 3353 D/E, „Dichtungshandbuch/Sealing Handbook“, März 1999, Seite 1-126.
- 6.10.1.2-2** „O-Ring Failure Analysis“, www.allorings.com, Seite 1-5.
- 6.10.1.2-3** „O-Ring Fluid Compatibility Guide“, www.allorings.com, Seite 1-5.
- 6.10.1.2-4** Fa. Ralicks Industrie- und Umwelttechnik, „Werkstoff-Übersicht und Eigenschaften“, www.ralicks.de, Seite 1-4.
- 6.10.1.2-5** B.Wiebusch, „Aerospace seal prevents leakage“, Zeitschrift „Design News“, June 18, 2001, www.designnews.com, Seite 1 und 2.
- 6.10.1.2-6** U.S. Air Force, Safety Agency, „Maintenance matters - military airplanes mishaps“, www.findarticles.com, 2002, Seite 1 und 2.
- 6.10.1.2-7** Transportation Safety Board of Canada (TSB), Aviation Investigation Report Number A00P0210, „Loss of power and Collision with Water“, West Coast Air, de Havilland DHC-6 (Twin Otter) C-GGAW, Vancouver Harbour, British Columbia, 1 November 2000, Seite 1- 8.
- 6.10.1.2-8** B.J.Crotty, „Unplugged, a maintenance error caused oil to be lost from all four engines...“ Zeitschrift „Flight Safety Australia“, Nov.-Dec. 1999, Seite 43-44.
- 6.10.1.2-9** NTSB Report, Identification LAX94FAer3, „Accident Aug-13-94 at Pearblossom, CA, Aircraft: Lockheed C-130A, registration: N135FF“, Update May 31st 2000, Seite 1-6.
- 6.10.1.2-10** Transportation Safety Board of Canada, Aviation Investigation Report A03P0332, „Maintenance Error-In Flight Fuel Leak, Air Canada, Airbus A330-300 C-GHKX, Vancouver International Airport, British Columbia, 06 November 2003“, May 9, 1983, Seite 1-9.
- 6.10.1.2-11** „Why Seals Fail“, www.maintenanceresources.com, TWI Press, Inc. 2000, Seite 1-8.
- 6.10.1.2-12** D.L.Hertz, Jr, „The Hidden Cause of Seal Failure“, Zeitschrift „Machine Design“, April 9, 1981, Seite 209-212.
- 6.10.1.2-13** Fa. Eagle Engineering Aerospace, „Aero engine Applications“, 2000, Seite 1.

- 6.10.1.2-14** National Transportation Safety Board (NTSB), Aircraft Accident Report NTSB/AAR-89/02, „De Havilland DHC-8, Accident April 15, 1988“, Seite 1- 66.
- 6.10.1.2-15** S.Helduser, Versuch 2, „Übertragungseigenschaften des ventilgesteuerten Zylinderantriebs“, Antriebstechnik, Aktorik, Arbeitsblätter zur Vorlesung, 2005, Blatt 1-6.
- 6.10.1.2-16** National Transportation Safety Board (NTSB), Aircraft Accident Report NTSB/AAR-84/04 (PB84-910404), „Eastern Air Lines, Inc., Lockheed L-1011, N334EA Miami, Florida, May 5, 1983“, Seite 1-46.
- 6.10.1.2-17** Flugunfallkommission (Büro Wien), GZ. 84.341/2-FUK/99, Gutachten und Vorschläge vom 29. März 1999 zum „Flugunfall mit Hubschrauber Typ Hughes 500 D, am 21.April 1992“, Seite 1-31.
- 6.10.1.2-18** R.C.Beercheck, „Putting the Heat on Seal Materials“, Zeitschrift „Machine Design“, 25.10.1979, Seite 124-127.
- 6.10.1.2-19** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 2“, 2001, ISBN 3-00-008429-0, Kapitel 7.
- 6.10.1.2-20** A.Rossmann, „Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - problemorientierte Triebwerkstechnik, Band 5“, 2008, ISBN 978-3-00-025780-3, Kapitel 19 (19.2) und Kapitel 20, (20.2.1).
- 6.10.1.2-21** W.Haas, „Grundlehrgang Dichtungstechnik“ Universität Stuttgart, , <http://www.ima.uni-stuttgart.de>, Stand 2011, Seite 1 - 36.