



Autoren: Prof. Dr.-Ing. Heinz K. Müller und Dr. Bernard S. Nau

Eine besondere Herausforderung an den Ingenieur ist eine sichere Abdichtung von Maschinen und Anlagen. Wenn es um den unerwünschten Austritt von Flüssigkeiten oder Gasen aus Maschinen, Aggregaten und Anlagen geht, wird die häufig unterschätzte Kunst des Abdichtens zum zentralen Thema.

www.fachwissen-dichtungstechnik.de befasst sich auf allen Ebenen mit dem Vermeiden oder mit der kontrollierten Eindämmung von Leckage. In 24 Fachkapiteln werden die physikalischen Grundlagen und die vielfältigen Techniken des Abdichtens in klarer Sprache und mit prägnanten Bildern beschrieben. **fachwissen-dichtungstechnik** liefert damit die notwendigen Informationen zu Gestaltung, Auswahl, Entwicklung und Betrieb von Dichtungen und Dichtsystemen.

Inhaltsverzeichnis der Fachkapitel

Allgemeine Grundlagen

1. Grundbegriffe der Dichtungstechnik
2. Polymerwerkstoffe
3. O-Ring: Theorie und Praxis
4. Fluidströmung im engen Dichtspalt

Abdichtung bewegter Maschinenteile

5. Hydraulikdichtungen
6. Pneumatikdichtungen
7. Abstreifer
8. Wellendichtringe ohne Überdruck
9. Wellendichtringe mit Überdruck
10. Fanglabyrinth-Dichtungen
11. Stopfbuchs-Packungen
12. Gleitringdichtungen: Grundlagen

13. Gleitringdichtungen: Gestaltung
14. Gleitringdichtungen: Werkstoffe
15. Kolbenringe für Motoren und Verdichter
16. Drosseldichtungen für Flüssigkeiten
17. Drosseldichtungen für Gase
18. Gewinde-Wellendichtungen
19. Zentrifugal-Wellendichtungen
20. Magnetflüssigkeits-Dichtungen
21. Membran- und Faltenbalgdichtungen

Abdichtung ruhender Maschinenteile

22. Flanschabdichtung: Grundlagen
23. Flanschdichtungen: Bauformen
24. Statische Dichtungen: Sonderbauformen

Sponsoren: www.fachwissen-dichtungstechnik.de wird unterstützt von

 <p>ISGATEC[®] Dichten. Kleben. Polymer.</p>	<p>ISGATEC GmbH Am Exerzierplatz1A • 68167 Mannheim Tel:+49(0)621-7176888-0 • Fax:+49(0)621-7176888-8 info@isgatec.com • www.isgatec.com</p>
 <p>SEALWARE[®]</p>	<p>SEALWARE International Dichtungstechnik GmbH Feldbergstr.2 • 65555 Limburg Tel:+49(0)6431-9585-0 • Fax:+49(0)6431-9585-25 info@sealware.de • www.sealware.de</p>
 <p>VTH VERBAND TECHNISCHER HANDEL Fachgruppe Dichtungstechnik</p>	<p>VTH Verband Technischer Handel e.V. Prinz-Georg-Straße 106 • 40479 Düsseldorf Tel:+49(0)211-445322 • Fax:+49(0)211-460919 info@vth-verband.de • www.vth-verband.de</p>
 <p>Xpress seals Dichtungen für Hydraulik</p>	<p>xpress seals GmbH Elbring 14 • 22880 Wedel Tel:+49(0)4103 92828-10 • Fax:+49(0)4103 92828-69 michael.mueller@xpress-seals.com • www.xpress-seals.com</p>



14

Prof.Dr.-Ing. Heinz K. Müller · Dr. Bernard S. Nau

Gleitringdichtungen: Werkstoffe

Vielfalt der Gleitringwerkstoffe; Überblick: Keramische und metallische Werkstoffe; Physikalische und thermische Eigenschaften, Korrosionswiderstand; Herstellung und Merkmale der Gleitringwerkstoffe; Typische und untypische Keramiken, Metall-Legierungen; Werkstoffpaarungen; Tribologie keramischer Gleitringwerkstoffe, Ausfallursachen. Literatur.

14.1 EINFÜHRUNG

Dieses Kapitel behandelt hauptsächlich die Werkstoffe, aus denen die Gleitringe von Gleitringdichtungen bestehen, in zweiter Linie auch Werkstoffe für andere Bestandteile, wie Wellenhülsen, Federn und Bälge. Die wichtigsten Anforderungen an einen Gleitringwerkstoff sind tribologischer Art. Wegen der chemischen Wirkung der umgebenden Fluide ist die Korrosionsbeständigkeit ein wesentliches Kriterium. Im Hinblick auf die Kräfte und den Wärmefluß im Dichtkontakt sind schließlich die Bruchmechanik und die thermischen Eigenschaften von Bedeutung.

In den Katalogen der Hersteller findet man eine große Vielfalt von Gleitringwerkstoffen. DIN 24 960 gliedert sie in die Gruppen Kunstkohlen, Kunststoffe, Metalle, Carbide und Metalloxide. Es ist jedoch keineswegs so, daß jede abzudichtende Flüssigkeit oder jeder Betriebszustand eine eigene Werkstoffkombination verlangt. Die heute in großem Umfang verwendeten Keramiken – insbesondere Siliciumkarbid und hochwertiger Kohlegraphit – haben eine Reihe der früher üblichen Gleitringwerkstoffe verdrängt. Ein Großteil der Betriebsanforderungen kann mit wenigen Werkstoffkombinationen erfüllt werden.

Zur Beurteilung und zur Auswahl der Gleitwerkstoffe bedarf es physikalisch begründeter Kriterien. Sie ergeben sich aus den physikalischen Vorgängen im Dichtspalt und im Umfeld der Dichtkörper (s. *Kapitel 12*). Im Hinblick auf die Werkstoffauswahl seien hier die wichtigsten Punkte wiederholt:



Gleitringdichtungen laufen selten unter gleichbleibenden Betriebsbedingungen. Im schlimmsten Fall gelangt das kühlende und schmierende Fluid zeitweilig nicht in den Dichtspalt, weil es schon außerhalb verdampft, oder weil Gasblasen den Eintritt versperren. Beim Übergang in einen neuen Betriebszustand verformen sich die Gleitflächen. Kommt es zur Kantenberührung, so nimmt die Reibleistungsdichte lokal extrem hohe Werte an und die Gleitflächen laufen zeitweilig und teilweise trocken. Dieser kritische Zustand verschwindet um so schneller, je schneller die Kantenpressung abgebaut wird und je besser die Wärme aus den Kontaktflächen abfließt. Daraus lassen sich Richtlinien zur Gestaltung und zur Werkstoffauswahl ableiten.

In der Regel sollte eine der beiden Gleitflächen *feinverschleißfähig* sein, das heißt, sie muß beim Verschleiß frei von Riefen und Kratzern bleiben. Die andere Gleitfläche sollte hingegen möglichst *verschleißfest* sein. Beide Gleitflächen sollten eine *hydrodynamisch aktive Oberflächenstruktur* aufweisen, mit möglichst vielen mikroskopisch kleinen Flüssigkeitstaschen und einer sanften Langwelligkeit am Umfang. Mindestens ein Dichtkörper sollte gut *wärmeleitfähig* sein. Wegen der möglichen lokalen Überhitzung sollte ein Gleitringwerkstoff wenigstens bis 300°C *temperaturbeständig* sein. Die Dichtkörper müssen außerdem *temperaturschockbeständig* sein, wenn damit zu rechnen ist, daß die Dichtung zeitweilig wegen Flüssigkeitsmangels heißläuft und dann bei plötzlichem Flüssigkeitszutritt abgeschreckt wird. Auch die blitzschnellen lokalen Temperaturzunahmen im Zustand der Mischreibung bilden eine punktuell fluktuierende Temperaturschockbeanspruchung. Schließlich müssen selbstverständlich beide Gleitringe *chemisch beständig* sein.

14.2 GLEITRINGWERKSTOFFE IM ÜBERBLICK

Dieser Abschnitt vermittelt einen kurzen Überblick über die wesentlichsten Gleitringwerkstoffe und deren Eigenschaften. Die nachfolgenden Abschnitte ermöglichen es dem Leser, tiefer in die Werkstofftechnik der Gleitringdichtungen einzudringen. Dieser Überblick benennt Werkstoffe nur für die Gleitringe selbst. Werkstoffe für andere Komponenten von Gleitringdichtungen werden später beschrieben.

Keramische Werkstoffe spielen heute bei den Gleitringwerkstoffen die Hauptrolle. Als erste Keramik wurde das in Wasserarmaturen als Dichtscheiben bewährte *Aluminiumoxid* verwendet. Es eignet sich für geringe Wärmebelastung und man findet es bei Gleitringdichtungen für Kraftfahrzeug-Kühlwasserpumpen. Es ist jedoch bruchempfindlich und wegen seiner geringen Wärmeleitzahl ungeeignet für höhere Gleitgeschwindigkeit. *Siliciumkarbid* ist der eigentliche „Renner“ in der Gleitringdichtungstechnik. Mit dem extrem harten, korrosionsbeständigen und gut wärmeleitenden Siliciumkarbid nahm die Lebensdauer und die Zuverlässigkeit von Gleitringdichtungen wesentlich zu. Man unterscheidet zwei Arten: Das chemisch hoch beständige *direktgesinterte* Siliciumkarbid (**SiC**) und das wirtschaftlicher herstellbare *reaktionsgesinterte* (*reaktionsgebundene*) Siliciumkarbid (**SiC-Si**). Siliciumkarbid hat nahezu alle für eine Gleitdichtfläche erwünschten Eigenschaften. Es ist leicht (3g/cm^3), extrem hart ($1500\text{...}3000\text{ HV}$) und somit verschleiß- und erosionsfest. Mit $E \approx 400\text{ GPa}$ ist der Elastizitäts-



tätsmodul von Siliciumkarbid etwa doppelt so groß wie der von Chromstahl. Siliciumkarbid ist extrem gut wärmeleitfähig (bis 130 W/m·K). Unter stark erosiven Bedingungen wird das hoch verschleißbeständige, zähe aber teure *Wolframkarbid* eingesetzt. Obwohl es ein keramischer Werkstoff ist, wird es anderweitig auch als "Hartmetall" bezeichnet.

Der feinverschleißfähige Partner eines harten Gleitrings besteht in der Regel aus einer „untypischen“ Sinterkeramik, nämlich *Kohlegrafit*. Zur internen Versiegelung und zur Verbesserung der Festigkeit sind Gleitringe aus Kohlegrafit mit Phenolharz oder Antimon imprägniert. Weniger fest als Kohlegrafit aber besser wärmeleitfähig und temperaturbeständig ist der teurere *Elektrografit*. Durch besondere Verfahren werden *oberflächensilizierter* Kohlegrafit oder *siliciumimprägnierter* Elektrografit mit verbesserten Trockenlaufeigenschaften hergestellt.

Metallische Werkstoffe werden für Gleitringe nur noch in wenigen Bereichen bei wässrigen Flüssigkeiten vor allem aus wirtschaftlichen Gründen verwendet. Dazu gehören *Chromguß*, *Chrom-Molybdänguß* und *Cr-Ni-Mo-Stähle*. Die tribologischen Eigenschaften dieser Metalle sind jedoch wesentlich schlechter als die von Siliciumkarbid.

In den folgenden Abschnitten sind die dichtungstechnisch relevanten Eigenschaften der oben vorgestellten und einer Reihe weiterer Werkstoffe beschrieben.

14.3 PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

Die folgende Tabelle enthält die physikalischen Kennwerte wichtiger Gleitringwerkstoffe:

Tabelle 14.1 **Physikalische Eigenschaften von Gleitringwerkstoffen**

Material	λ W/mK	$10^6\alpha$ K ⁻¹	Festigkeit				ρ kg/m ³	κ mm ² /s	Wärme- spannungs- widerst.R _T K ⁻¹
			E GPa	Zug MPa	Druck MPa	H _v GPa			
Kohlegrafit +Antimon	20	3.5	33	48	280	—	2300	13	420
Kohlegrafit +Phenolh.	9	3	23	41	230	9	1800	5.7	590
Cr Ni Mo Stahl	16	16	190	620	—	1.9	8100	4	200
Al.Oxid, 95%	30	6.9	365	240	3200	18	3900	10	95
SiC, reakt.gesint.	200	4.3	410	249	—	30	3100	62	135
SiC, dir. gesintert	70	4.8	390	240	10000	25	3100	—	128
WC, Co-Binder	105	4.5	650	880	6900	18	15000	—	300
PTFE+25%Glasf.	0.4	70	—	16	—	—	2.3	—	—

Bezeichnungen: λ - Wärmeleitkoeffizient, α - Wärmeausdehnungskoeffizient, E - Elastizitätsmodul, H_v - Vickers Härte, $\kappa = \lambda/(pc)$ Wärmeausbreitungsvermögen, ρ - Dichte, c - spez. Wärmekapazität, SiC - Siliciumkarbid, WC - Wolframkarbid.



Zugfestigkeit und Bruchwahrscheinlichkeit

Die Druckfestigkeit keramischer Gleitringwerkstoffe ist wesentlich höher als ihre Zugfestigkeit. Gleitringdichtungen für höheren Druck werden in der Regel vom Außenumfang her druckbelastet. Somit stehen die Ringe unter Druckspannung, in Übereinstimmung mit ihrer diesbezüglichen Belastbarkeit. In manchen Fällen läßt sich eine Zugspannung aber nicht vermeiden, etwa wegen eines zeitweilig von innen wirkenden Flüssigkeitsdrucks oder infolge von Fliehkräften bei hoher Drehzahl. Um unter solchen Bedingungen einen zugspannungsbedingten Bruch auszuschließen, werden die Ringe bandagiert.

Die Bruchmechanik keramischer Werkstoffe ist statistischen Gesetzen unterworfen. Aufgrund der Wahrscheinlichkeitsverteilung mikroskopisch kleiner Gefügefehler muß die Zugfestigkeit von Keramiken statistisch erfaßt werden. Die Streuung der Zugfestigkeitswerte in einem Fertigungslos folgt der Weibull-Statistik. Die Signifikanz der Größe von mikroskopischen Gefügefehlern ist gekennzeichnet durch eine keramikspezifische Bruchzähigkeit (Fracture Toughness) K_c , mit der Einheit $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$. Tabelle 14.2 enthält typische Werte. Mit K_c kann die kritische Größe eines Mikrorisses in einem zugbelasteten Bereich berechnet werden. Ein Riss der größer als diese kritische Größe a ist, wächst schnell, und selbst ein einziger solcher Riss kann zum Bruch des Dichtrings führen. Die kritische Größe eines Mikrorisses ergibt sich aus:

$$a = \left\{ \frac{S \cdot K_c}{\sigma \cdot \sqrt{\pi}} \right\}^2 \quad (14.1)$$

Die Größe S ist ein Formfaktor, der für einen Ring annähernd den Wert 1,0 hat. Beispielsweise ergibt sich für Siliciumkarbid mit Tabelle 14.2 in einem Gebiet mit einer Zugspannung von 100 MPa die kritische Größe eines Mikrorisses $\{1,0 \cdot 3 / (100 \cdot \pi^{0,5})\}^2 \text{ m} \approx 0,3 \text{ mm}$.

Tabelle 14.2 Beispiele für die Bruchzähigkeit K_c bei 20°C

Werkstoff	Bruchzähigkeit $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$
Kohlenstoffstahl	140
Gußeisen	< 20
WC , Co-gebunden	15
Aluminiumoxid	4
Siliciumkarbid	3

Die Wahrscheinlichkeit für die Existenz eines kritischen Risses wächst mit dem Werkstoffvolumen. Ein großer Keramikring enthält mit größerer Wahrscheinlichkeit einen kritischen Mikroriß als eine kleiner, das heißt, die Dichtung einer U-Boot-Propellerwelle mit 2000mm Durchmesser ist mehr gefährdet als der Dichtring einer Automobil-Kühlmittelpumpe. Eine ähnliche Situation besteht bei der Messung der Zugfestigkeit spröder Werkstoffe, wo häufig anstatt eines Zugtests ein Biegetest durchgeführt wird. Weil bei Biegebeanspruchung hohe Zugspannung nur in einer Randzone herrscht, ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein Mikroriss bestimmter



Größe sich zufällig in der Zone größter Zugspannung befindet viel kleiner, als wenn dieselbe Probe mit durchweg maximaler Zugspannung geprüft wird. Deshalb kommt es bei der Beurteilung sehr darauf an, mit welchem Verfahren die Zugfestigkeit ermittelt worden ist.

Elastizität

Der *Elastizitätsmodul* E beeinflusst die Steifigkeit eines Dichtrings und damit die im Betrieb auftretende Stülpung des Dichtrings und die induzierte Welligkeit. Diese Größen sind mit einem hohen E -Modul leichter zu beherrschen. Für Gleitringwerkstoffe spannt sich der Bereich des E -Moduls von 23 GPa für kunstharzimprägnierten Kohlegraphit, bis 650 GPa für Wolframkarbid. Bei der Abdichtung von Flüssigkeiten mit stark abrasiv wirkenden Partikeln kommen Werkstoffe mit hoher *Vickershärte* H zum Einsatz, insbesondere Siliciumkarbid oder Wolframkarbid.

Thermische Eigenschaften

Der *Wärmeleitkoeffizient* λ spielt die entscheidende Rolle für die Ableitung der Reibungswärme vom Dichtspalt durch den Dichtkörper hindurch zu der umgebenden Flüssigkeit. Unter sonst gleichen Bedingungen ist die Spalttemperatur um so niedriger und die Gefahr des Verdampfens im Dichtspalt um so kleiner je größer der Wärmeleitkoeffizient λ ist. Die zur Wärmeabführung notwendige Temperaturdifferenz ist proportional zu λ . Betrachtet man zum Beispiel eine Gleitringdichtung mit 50 mm Durchmesser unter der Annahme, daß durch einen der Gleitringe eine Reibleistung von 100 Watt abfließen soll, so ergibt die Rechnung für einen kunstharzimprägnierten Gleitring eine Temperaturdifferenz von 70K, für einen reaktionsgesinterten SiC-Gleitring hingegen von nur 4K. Dies veranschaulicht den Vorteil der hervorragenden Wärmeleitfähigkeit von Siliciumkarbid.

Der *Wärmeausdehnungskoeffizient* α kann das Dichtverhalten auf verschiedene Weise beeinflussen. Axiale Temperaturgradienten beeinflussen die Stülpung des Dichtrings und, falls die axiale Ausdehnung am Umfang variiert, entsteht eine Welligkeit der Dichtflächen. Ist ein Dichterring in eine Fassung eingeschrumpft, kann er durch eine Differenz der Dehnung zwischen Ring und Fassung im Extremfall entweder lose oder überlastet werden, zumindest aber wird dadurch die Anpassung der Dichtflächen gestört. Bei einem bestimmten Temperaturgradienten sind die Wärmespannungen proportional zum Elastizitätsmodul, was die Gleitringe für Wärmespannungsrisse und Gefügebrüche anfällig macht. Kleine Werte von α sind also in vielfältiger Weise vorteilhaft.

Der *Wärmeausbreitungsfaktor* $\kappa = \lambda / (\rho c)$ ist ein Maß für den zeitlichen Abbau von plötzlich auftretenden Temperaturgradienten. Der Faktor κ charakterisiert somit auch die Beständigkeit eines Werkstoffs bei Beanspruchung durch einen *Temperaturschock*. In gewissem Maß ist κ auch mit der „Spannungsrisigkeit“ verbunden, das heißt, je kleiner κ , desto größer ist die Gefahr daß Wärmespannungsrisse entstehen.



Der *Wärmespannungswiderstand* $R_T = \sigma_s / [\alpha \cdot E]$ kennzeichnet die Toleranz eines Werkstoffs gegenüber Wärmespannungen, ist also ein Maß für den Widerstand gegen das Entstehen von Wärmespannungsrisse.

Betriebseigenschaften

In der Literatur und in Handbüchern sind betriebsbezogene Kennwerte zu finden, deren Bedeutung hinsichtlich des Betriebsverhaltens von Gleitringdichtungen oft überschätzt wird. Dazu gehören unter anderem die *Reibungszahl* f , der *PV-Faktor* bzw. der Wert $\{PV\}_{\max}$, sowie der *Verschleißkoeffizient* K_w . Der Schmierzustand von Gleitringdichtungen ist entweder der hydrodynamischen Vollschrömerung oder der Mischreibung zuzuordnen, und oft bewegt er sich im Betrieb zwischen diesen Zuständen hin und her. Die oben genannten Kennwerte verändern sich im Betrieb ständig wegen der vielen wechselwirkenden Faktoren, die den hydrodynamischen und hydrostatischen Spaltdruck beeinflussen. Zudem sind die Werte von Dichtung zu Dichtung verschieden, da sie eng mit der Gestaltung und den verwendeten Gleitringwerkstoffen verbunden sind. Manchmal werden für bestimmte Gleitringdichtungen zulässige Maximalwerte für den „PV-Faktor“ angegeben, aber solche Werte sind selbstverständlich nur relevant für eine spezielle Flüssigkeit bei einer speziellen Temperatur und anderen speziellen Betriebsbedingungen. Es wäre falsch, irgendwo angegebene $\{PV\}_{\max}$ -Werte für eine bestimmte Gleitringdichtung als allgemeingültig anzusehen. Nur wenn unter ungünstigen Bedingungen die Schmrömerung im Dichtspalt versagt und die Gleitflächen trocken laufen, entscheiden letztlich die tribologischen Trockenlaufeigenschaften der Gleitringwerkstoffe darüber, ob die Dichtung diesen Zustand überlebt oder ob sie versagt. In diesen Fällen haben die Kennwerte f , $\{PV\}_{\max}$ und K_w eine gewisse Bedeutung.

14.4 DER KORROSIONSWIDERSTAND

Nachfolgend werden die üblicherweise in Gleitringdichtungen verwendeten Werkstoffe in der Reihenfolge ihres Korrosionswiderstands behandelt. Manche der hier aufgeführten Werkstoffe eignen sich direkt als *Gleitringwerkstoffe*, andere lediglich für zusätzliche Bauteile wie Federn, Bälge, Wellenhülsen usw.

Äußerst beständig

Keramische Gleitringwerkstoffe sind gegen chemischen Angriff am meisten beständig. Wenn sie trotzdem von aggressiven Fluiden angegriffen werden, dann sind davon normalerweise ihre nicht-keramischen Binder und Imprägnierstoffe betroffen. Der Schmelzpunkt der meisten Keramiken ist höher als 1000 °C, in der Regel oxidieren sie nicht und sind somit thermisch nicht gefährdet. Glücklicherweise verhalten sich bestimmte Keramiken auch in tribologischer Hinsicht hervorragend.



Aluminiumoxid (Al_2O_3) ist in reiner Form, mit weniger als 0,5% Verunreinigungen eine besonders inerte Keramik. Direkt gesintertes **Siliciumkarbid (SiC)** ist ebenfalls hoch beständig und hat zudem tribologisch gute Eigenschaften.

Reaktionsgesintertes Siliciumkarbid (SiC-Si) enthält freies Silicium, kann deshalb chemisch angegriffen werden und eignet sich deshalb weniger für stark korrosive Umgebungsbedingungen.

Wolframkarbid (WC) ist ein sogenanntes „keramisches Metall“ (cermet). Der Kornverbund wird durch metallische Binder mit 6...10% Volumenanteil gefestigt. Die Korrosionsempfindlichkeit hängt von der Art der Binder ab. Verwendet werden – mit zunehmendem Korrosionswiderstand – Kobalt (Co), Nickel (Ni) und Chrom-Nickel-Molybdän (CrNiMo).

Kohlegrafit ist ein Sinterwerkstoff, dessen Poren zum Zweck der inneren Abdichtung mit Kunstharz oder Metall gefüllt (imprägniert) sind. In der Praxis besteht in den meisten Fällen entweder der Gleitring oder der Gegenring aus Kohlegrafit. Kohlenstoff selbst ist äußerst inert, außer gegenüber aggressiv oxidierenden Stoffen. In Luft oxidiert Kohlenstoff erst über 550°C . Die Imprägnierstoffe können jedoch chemisch angegriffen werden. Ein Ausweg ist, den Anteil des Imprägnierstoffs zu verringern indem die Poren des Rohlings mit zusätzlichem Kohlenstoff gefüllt werden. Dazu wird ein Kohlenstoff enthaltendes Fluid infiltriert und danach in situ verkohlt.

PTFE, mit Glasfasern verstärkt, kann in besonderen Fällen als Gleitwerkstoff verwendet werden, wenn gegen ein chemisch extrem aggressives Fluid kein anderer Werkstoff beständig ist. Die Glasfasern behindern den Kaltfluß unter Druckbelastung. PTFE ist außergewöhnlich inert und hat eine geringe Haft- und Gleitreibung. Dennoch begrenzt die Erweichung von PTFE dessen Einsatz bei Druckbelastung unter höherer Temperatur. PTFE wird auch als dünnwandige Ummantelung von O-Ringen, oder für Bauteile aus härterem Material eingesetzt, oder massiv als federbelastete Nebendichtungen von Gleitringdichtungen.

Hoch beständig

Bekannte korrosionsfeste **Stahllegierungen**, wie Hastelloy C, Hastelloy B, und Alloy 20 werden in Gleitringdichtungen unter stark korrosiven Bedingungen meist in Form von Federn oder Metallbälgen verwendet. Bei weniger aggressiven Fluiden kommen CrNi- oder CrNiMo- oder CoCrW-Stähle in Frage. Verchromte Bauteile sind in der Regel unsicher, es sei denn, sie müssen nur kurze Zeit funktionieren, wie beispielsweise in Pumpen von Raketenmotoren.

Begrenzt korrosionsbeständig

Verschiedene Werkstoffe sind gegenüber bestimmten Flüssigkeiten, wie etwa Wasser, hinreichend korrosionsbeständig und haben zugleich halbwegs gute tribologische Eigenschaften.



Dazu gehören **Bleibronze**, **Aluminiumbronze** und **feinkörniger Grauguß** (z.B. Meehanite). Diese Werkstoffe werden manchmal aus Kostengründen eingesetzt. Sie eignen sich jedoch nur sehr bedingt als Gleitringwerkstoffe für moderne Gleitringdichtungen.

14.5 HERSTELLUNG UND MERKMALE DER GLEITRINGWERKSTOFFE

Die für *Gleitringe* verwendeten Werkstoffe werden hier in die Kategorien *Typische Keramiken*, *Untypische Keramiken* und *Metall-Legierungen* eingeteilt:

Typische Keramiken

Die hier als typische Keramiken bezeichneten Werkstoffe sind in der Regel Oxide, Carbide oder Nitride. Kohlegraphit ist eine bemerkenswerte Ausnahme und zählt deshalb zu den untypischen Keramiken, die meist einen beträchtlichen Anteil an metallischen oder organischen Bindern bzw. Füllstoffen enthalten. In den typischen Keramiken sind dagegen nur Spuren nichtmetallischer und nichtorganischer Zusatzstoffe enthalten. Eine Ausnahme bildet das reaktionsgesinterte Siliciumkarbid, das einen beträchtlichen Anteil freien Siliciums enthält. Trotzdem wird es hier unter die typischen Keramiken eingereicht.

Als typische Keramiken werden für Gleitringe *Aluminiumoxid* und *Siliciumkarbid* verwendet. Bemerkenswert bei beiden Werkstoffen ist ihre geringe Dichte und bei Siliciumkarbid zusätzlich der große Wärmeleitkoeffizient λ (s. Tabelle 14.1). Generell sind die Siliciumkarbide heute die wichtigsten Gleitringwerkstoffe. Sie sind polykristallin mit SiC-Kristalliten verschiedener Größe, meist zwischen 2 und 80 μm , also groß im Vergleich zur üblichen Schmierfilmdicke bei Gleitringdichtungen. Mit einer Umwandlungstemperatur von ca. 2100°C existiert SiC in einer kubischen Tieftemperaturphase (β -SiC) und einer hexagonalen Hochtemperaturphase (α -SiC).

Reaktionsgesintertes Siliciumkarbid (SiC-Si) wird hergestellt aus einer Mischung von α -SiC-Pulver, Graphit und organischen Bindern, die zu Rohlingen gepreßt und auf 1000°C erhitzt wird, wobei die Binder verkoken. Sodann wird in die Rohlinge flüssiges oder gasförmiges Silicium infiltriert. Durch Erhitzen auf 1500 ... 2200°C (Reaktionssintern) reagiert ein Teil des eingebrachten Siliciums mit dem Graphit und bildet sekundäres SiC, das überschüssige SiC verbleibt mit einem volumetrischen Anteil von 10-15% in den Poren des reaktionsgesinterten Siliciumkarbids. Es wird in der Gleitringdichtungstechnik wegen seiner hervorragenden tribologischen Eigenschaften und seiner extrem hohen Wärmeleitfähigkeit in großem Umfang verwendet.

Direktgesintertes Siliciumkarbid (SiC) wird aus sehr feinkörnigem α -SiC- oder β -SiC-Pulver bei 1900 ... 2200°C drucklos gesintert, mit Spuren von Aluminium, Beryllium oder Bor als Sinterhilfsmittel. Direktgesintertes SiC ist sehr feinkörnig, extrem korrosionsbeständig aber



spröder als SiC-Si.

Oberflächensilizierter Kohlegraphit (C-SiC) wird hergestellt aus einem Kohlegraphitring, in dessen Oberfläche Silicium *gasförmig* infiltriert wird wobei sich bei hoher Temperatur (CVR Chemical Vapor Reaction) eine 0,5... 2 mm dicke poröse SiC-Schicht bildet, die danach imprägniert wird. In dieser Schicht verbleibende Grafitnester verbessern die tribologischen Eigenschaften bei Trockenlauf. Das Herstellverfahren ist zwar billiger als bei SiC-Si, jedoch sind oberflächensilizierte Kohlegraphitringe weniger robust und unter abrasiven Bedingungen nicht empfehlenswert.

Siliciumimprägnierter Elektrographit (SiC-Si-C) wird hergestellt aus einem Elektrographitring, der in einer Vakuumkammer bei 2000°C in *flüssiges* Silicium eingetaucht wird. Dabei entsteht bis zu einer Tiefe von 10 mm reaktiv ein Anteil von 50...70% SiC, der Rest bleibt Grafit mit ca. 1% freiem Silicium. (Elektrographit wird aus Kohlegraphit durch Erwärmen auf 2500°C gewonnen. Dabei entsteht ein kleinkristallines Gefüge mit höherer Wärmeleitfähigkeit jedoch geringerer Festigkeit).

Untypische Keramiken

Zu den untypischen Keramiken gehören Kohlegraphit und einige Hartmetalle (“cermets”).

Kohlegraphit: In verschiedener Zusammensetzung gehört Kohlegraphit zu den am meisten verwendeten Gleitringwerkstoffen. Manchmal wird irrtümlich Kohlegraphit nicht als Keramik angesehen. Tatsächlich ist Kohlegraphit keine typische Keramik, weil sie fast immer einen beträchtlichen Anteil von Imprägnierstoffen enthält. Die Imprägnierung – meist 5% bis 15% – dient der Versiegelung der Poren und der Verbesserung physikalischer Eigenschaften, insbesondere der Festigkeit und der Wärmeleitfähigkeit. Auch der Korrosionswiderstand und die Temperatureinsatzgrenzen werden im Wesentlichen vom Füllstoff bestimmt. Im Kohlegraphit ist der Kohlenstoff als polykristalliner Grafit mit Kristalliten im Bereich von 0,005-0,1 µm enthalten. Die Kristallite sind demnach klein im Vergleich zu den Spalthöhen von Gleitringdichtungen. Die Füllstoffe – amorphe oder grafitische Binder – halten das Grundmaterial zusammen. Sie entstehen aus verkohlten Ausgangsstoffen wie Teer- oder Erdölpech, Harz usw. Weitere Zusatzstoffe wirken als Sinterhilfen, Antioxidiermittel und Trockenlaufhilfen. Die Qualität eines Kohlegraphits hängt stark ab vom verwendeten Ausgangsmaterial – synthetischem oder natürlichem Grafit – von dessen Struktur und von Verunreinigungen, sowie vom Verarbeitungsprozeß. Es ist deshalb schwierig von unterschiedlichen Herstellern identische Kohlegraphite zu bekommen.

Phenolharz-imprägnierter Kohlegraphit wird in großem Umfang für einfachere Betriebsbedingungen eingesetzt. Für höheren Druck und höhere Gleitgeschwindigkeit wird hingegen eine *Antimon-Imprägnierung* bevorzugt. Für die Lebensmittelindustrie stehen biologisch unbedenkliche *Polyesterharz-Imprägnierungen* zur Verfügung. Dichtungsausfälle mit Kohlegraphit-



Gleitringen sind in der Regel auf ein tribologisches Versagen, oder auf ein lokales Aufplatzen durch trockenlaufbedingtes Überhitzen der Gleitfläche zurückzuführen. Diese als *Blistering* bezeichnete Erscheinung entsteht, wenn der Imprägnierstoff wegen seiner größeren Wärme-dehnung Gafitpartikel aus der Dichtfläche heraussprengt.

Die Verwendung von *Hartmetallen* (Cermets) als Gleitringwerkstoffe kam zwischen 1960 und 1970 auf. Sie wurden inzwischen zum großen Teil, wenn auch nicht ganz, von Siliciumkarbid verdrängt. Es sind polykristalline Werkstoffe, bestehend aus keramischen Kristalliten mit metallischen Bindern. Für Gleitringe wird als keramischer Bestandteil in der Regel Wolframkarbid (WC) verwendet. Als Binder dient 7%-15% Kobalt (Co) oder 6% Nickel (Ni). Wolframkarbidpulver wird zunächst gepreßt und vorgesintert. Vor dem endgültigen Sintern kann der Rohling maschinell bearbeitet werden, danach ist nur noch Schleifen oder Läppen mit Diamant, Siliciumkarbid oder Borkarbid möglich. Der Vorteil von WC gegenüber SiC ist die größere Zähigkeit aufgrund des dehnbaren Binders, der einen Sprödbruch verhindert. Die Temperatureinsatzgrenze liegt bei 600 °C, darüber oxidieren die Karbide. Die Empfindlichkeit der Binder gegenüber chemischem Angriff wurde schon erwähnt.

Metall-Legierungen

Folgende Metall-Legierungen werden aus preislichen Gründen und in geringem Umfang für Gleitringe verwendet, wobei der Gleitpartner fast ausnahmslos Kohlegraphit ist:

Chromguß

Aluminiumbronze

“Stellite” [Co-Cr-W – Legierungen]

Feinkörniges Gußeisen (Meehanite)

Wenn Gleitringe aus diesen Werkstoffen versagen, dann meist aus tribologischen Gründen, das heißt, der Schmierzustand im Dichtspalt ist nicht zuverlässig beherrschbar.

14.6 KOMBINATION VON GLEITRINGWERKSTOFFEN

Bislang wurden die Gleitringwerkstoffe individuell betrachtet. Im Betrieb werden Gleitringe immer paarweise eingesetzt. Die oben dargelegten Kriterien sollten im konkreten Einsatzfall auch bei der Auswahl einer geeigneten Kombination von zwei Gleitringwerkstoffen beachtet werden. Sie sind auch bei der Beurteilung von Vorschlägen eines Herstellers hilfreich. In allen Einsatzfällen, bei denen die Zuverlässigkeit wichtiger ist als der Preis, sollte eine Kombination hochwertigerer Werkstoffe vorgesehen werden, beispielsweise:

Kohlegraphit (antimonimprägniert) // Siliciumkarbid (reaktionsgesintert).

Mit dieser Werkstoffpaarung sind in der Praxis viele Betriebsbedingungen beherrschbar.



Für stark korrosive und zugleich abrasive Flüssigkeiten eignen sich die Kombinationen

*Siliciumcarbid (direktgesintert) // Wolframcarbid (Ni) oder
Siliciumcarbid (direktgesintert) // Siliciumcarbid (direktgesintert).*

Bei sehr stark korrosiven aber nicht zugleich abrasiven Bedingungen, niederem Druck und kleiner Gleitgeschwindigkeit wurde in besonderen Fällen die Kombination

Glasfasergefülltes PTFE // Aluminiumoxid (99,5% rein) angewendet.

Unter „einfachen“ Betriebsbedingungen ($< 1 \text{ MPa}$, $\leq 10 \text{ m/s}$), wenn zugleich der Zwang zu minimalen Ausrüstungskosten im Vordergrund steht, werden zum Teil folgende Kombinationen verwendet:

Kohlegraphit (kunstharzimprägniert)
 / *// Aluminiumbronze bei Wasser*
 / *// Meehanite-Guß bei Öl*
 / *// Chromguß oder Aluminiumoxid
 bei leicht korrosiver Flüssigkeit.*

14.7 TRIBOLOGIE KERAMISCHER GLEITRINGWERKSTOFFE

Tribologie von Kohlegraphit

Oft wird nicht beachtet, daß in inerte Umgebung (inerte Flüssigkeit oder Vakuum) Kohlegraphit sehr stark verschleißt. Diese Erscheinung wurde während des 2. Weltkriegs an den Kohlebürsten von Generatoren in hochfliegenden Flugzeugen beobachtet. Man fand später heraus, daß dies ein normales Verhalten von Kohlegraphit unter chemisch reinen Bedingungen ist. Der normale Zustand mit kleiner Reibung und niederem Verschleiß tritt in Erscheinung, sobald Wasser- oder Sauerstoffmoleküle oder andere organische oder anorganische Stoffe am Reibungsvorgang teilnehmen.

Reibung und Verschleiß von Kohlegraphit hängen im Zustand der Misch- oder Grenzreibung mit einem ziemlich komplexen Geschehen im Reibkontakt zusammen. Anfänglich werden von der ungeschützten Oberfläche ultrafeine Verschleißpartikel abgerieben. Diese Partikel sind viel feiner als die Kohlenstoffkristallite. Wegen der im Verhältnis zum Volumen extrem großen Oberfläche verhalten sie sich wie hyperreaktive Aktivkohle. In Gegenwart geeigneter Fremdmoleküle schließen sich diese ungewöhnlichen Partikel zu einer submikrometerdicken Schicht zusammen. Solange diese Triboschicht intakt bleibt sind Reibung und Verschleiß nieder und stabil. Diese Erkenntnis wurde in den Sechziger Jahren bei der tribologischen Untersuchung von Kohlenstoff-Bremsbelägen für das Überschallflugzeug Concorde bestätigt.



Dabei zeigte sich auch, daß die intermolekularen Bindungen, die den Kohlenstoffilm zusammenhalten, sich im Bereich von 180...200°C (Desorptionstemperatur) auflösen, und daß dies einen Zusammenbruch der schützenden Triboschicht zur Folge hat. Dies erklärt, weshalb bei hoher Belastung und hoher Gleitgeschwindigkeit, oder bei hoher Umgebungstemperatur, eine Gleitringdichtung plötzlich instabil wird oder sogar spontan ausfällt, wenn kein trennender Schmierfilm vorhanden ist. Neuere Untersuchungen zeigten, daß die Vorgänge bei Gleitringdichtungen noch weit komplexer sind. Es scheint so zu sein, daß ein „guter“ Kohlegraphit die schützende Triboschicht ziemlich langsam aufbaut. Schließlich kann die Triboschicht eine Dicke erreichen, bei der sie mechanisch instabil wird und abbricht. Jedoch kann sich ein guter Kohlegraphit erholen, selbst wenn die Temperatur während des Abbrechens der Triboschicht höher ist als die genannte Desorptionstemperatur. In diesem Fall beginnt sich die Triboschicht wieder zu bilden, und die Dichtung bleibt weiter intakt. Dieser Vorgang kann sich zyklisch wiederholen. Wenn hingegen bei einem „schlechten“ Kohlegraphit die Triboschicht zusammenbricht, steigt die Spalttemperatur weit über die Desorptionstemperatur, die Dichtung kann sich nicht mehr erholen und versagt durch extrem abrasiven Verschleiß.

Außerdem wurde entdeckt, daß der Kohlegraphitring auf die Gegenlauffläche eine aus Kohlegraphit bestehende Transferschicht überträgt. Diese Schicht baut sich bei Gleitringdichtungen langsamer auf als die Triboschicht auf der Gleitfläche des Kohlegraphittrings. Bezüglich ihrer Entstehung, Zusammensetzung und ihres Verhaltens ist die Transferschicht der Triboschicht ähnlich, jedoch baut sie sich langsamer auf und scheint stabiler zu sein.

Tribologie von typischen Keramikwerkstoffen

Neuerdings wurde speziell bei Keramiklagern das tribologische Verhalten typischer Keramikwerkstoffe genauer untersucht. Es zeigte sich, daß auch hier Triboschichten und Transferschichten entstehen, jedoch waren im Detail Unterschiede zu beobachten. Ebenso wie Kohlegraphit zeigen auch Aluminiumoxid und Siliciumkarbid in inerter Umgebung hohe Reibung und starken Verschleiß. Die Anwesenheit von atmosphärischem Sauerstoff, Wasser, Ethanol, Benzol usw. vermindert diese Erscheinungen drastisch. Mit flüssigem Wasser können Lager aus Siliciumkarbid oder Siliciumnitrid mit sehr kleiner Reibung laufen ($f \approx 0,01$). Bei diesen Keramiken finden auf der Gleitfläche tribochemische Reaktionen statt. Beispielsweise werden ultrafeine SiC-Verschleißpartikel zu SiO_2 oxidiert, die mit Wasser Siliciumhydroxid bilden. Aluminiumoxid-Partikel werden direkt zu Hydroxid hydriert. Die Hydroxide bilden schützende Triboschichten. Im Fall von Siliciumkarbid kann sich eine außergewöhnlich glatte Triboschicht bilden, die eine große hydrodynamische Tragfähigkeit entwickelt. Dadurch wird ein direkter Kontakt der Gleitflächen unterbunden, und die Dichtung läuft mit extrem geringer Reibung, vorausgesetzt die Gleitflächen sind makroskopisch parallel.



14.8 AUSFALLURSACHEN

Bruch: Neben einem Zusammenbruch der *Triboschicht* sind bei den typischen Keramiken verschiedene Erscheinungsformen eines *Sprödbruchs* die häufigsten Ausfallursachen. Der auslösende Faktor kann mechanischer Art sein, zum Beispiel die Spannungsspitze am Kraftangriff einer Drehmomentabstützung. Auch puffende Instabilität (s. Kapitel 12, S.28ff) kann strukturelle Schäden verursachen. Dabei verdampft die Flüssigkeit lokal im Spalt, treibt dabei kurzzeitig die Gleitringe auseinander, bevor sie anschließend wieder schlagartig aufsetzen.

Risse: Dadurch kann ein keramischer Gleitring ohne weiteres spontan brechen. In weniger extremen Situationen können an der Gleitfläche zunächst haarfeine Bruchlinien in Erscheinung treten, bekannt als Thermospannungsrisse. Das können mehr oder weniger gleichmäßig verteilte radiale Risse oder ein sich überkreuzendes Netz von Rissen sein. Anfänglich sind diese Risse sehr fein und nur bei etwa 10-facher Vergrößerung erkennbar. Später wachsen die Risse nach innen in den Ring und verbreitern sich dabei an der Oberfläche. Von Rissen eingegrenzte Zonen stellen sich an den Kanten auf. Dadurch entsteht eine extrem abrasive Oberfläche, die die Gegenfläche stark verschleißt und nach kurzer Zeit zu exzessiver Leckage führt. Dieses Phänomen kann bei allen Keramiken auftreten. Thermospannungsrisse entstehen aufgrund vorübergehender thermischer Spannungen bei plötzlicher Aufheizung oder Abkühlung der Gleitfläche. Aufheizung kann Folge eines kurzzeitigen Festkörperkontakts sein. Beim plötzlichen Einströmen einer kalten Flüssigkeit kann eine erwärmte Gleitfläche abgeschreckt werden. In beiden Fällen resultiert daraus eine Dehnungsdifferenz zwischen der Oberfläche und dem tiefer liegenden Werkstoff. Die daraus resultierenden Schubspannungen unter der Oberfläche führen dann zur Bildung der Risse. Die Rissbildung unterliegt verschiedenen Einflüssen: (1) bei plötzlich veränderter Wärmezufuhr entstehen im Werkstoff hohe Temperaturgradienten, wenn der lokale Wärmetransport ungenügend ist; kennzeichnend hierfür ist der Wärmeausbreitungsfaktor κ ; (2) ein Maß für den Widerstand des Werkstoffs gegen das Entstehen solcher Risse ist der Thermospannungswiderstand R_T ; (3) eine hohe Reibungszahl bei Trockenlauf begünstigt die Rissbildung, weil bei kurzzeitigem Festkörperkontakt lokal viel Wärme entsteht. Die zu den Punkten (1) und (2) genannten Kennwerte sind in Abschnitt 14.3 definiert.

Löcher: Eine andere Art von Oberflächenschäden kann ebenfalls bei allen Keramiken auftreten, sie treten aber besonders häufig bei Kohlegraphit auf. Dabei entstehen kleine Löcher in der Oberfläche, das aus diesen Löchern herausbrechende Material wird von der Gegengleitfläche mitgeschleppt und bildet bogenförmige Freßfurchen die später abgeschliffen werden. Die Löcher sind gewöhnlich etwa 0,1mm breit und ebenso tief. Manchmal entstehen sehr viele Löcher und die Beschädigung führt zum Ausfall der Dichtung. Diese lokale Ablösung des Materials kann auf Werkstoffermüdung infolge eines rotierenden Druckfelds zurückzuführen sein. Möglich ist auch eine schlechte Werkstoffbindung oder ein chemischer Angriff an den Korngrenzen.



Blistering: Bei Kohlegrafitringen kann ein verteiltes lokales Aufplatzen der Gleitfläche zum Dichtungsausfall führen. Kleine vulkanförmige Erhebungen (Blister) drängen die Gegengleitfläche weg, vergrößern dabei den Dichtspalt und erzeugen so Leckage. Von einem Blister ausgehend bilden sich in der Gleitfläche Bruchlinien. Blistering tritt vor allem bei der Abdichtung von höherviskosen Flüssigkeiten auf, insbesondere bei Ölen und auch bei besonders ebenen Gegengleitflächen. Blistering entsteht wahrscheinlich in zwei Phasen. Zuerst diffundiert im normalen Betrieb die abgedichtete Flüssigkeit in die Oberfläche des Kohlegrafittrings. Eine vorübergehende Temperaturerhöhung im Dichtspalt führt dann zur Ausdehnung der in die Poren des Dichtrings eingesperrten Flüssigkeit. Wenn diese nicht schnell genug entweichen kann, wirft sie die darüberliegende Schicht zum Spalt hin auf und sprengt sie schließlich ab. Blistering hängt also mit der Porosität des Kohlegrafits zusammen. Die Hersteller von Kohlegrafitringen bemühen sich, dieses Problem auf verschiedene Weise durch Verminderung der Restporosität zu entschärfen.

Korrosion: Schließlich sei noch einmal an die Korrosionsempfindlichkeit der Binder erinnert. Schäden durch chemischen Angriff sind um so wahrscheinlicher, je höher der Anteil von Füllstoffen bzw. Bindern in der Matrix ist.



14.9 LITERATUR

Anon. Wear resistant surfaces in engineering. Her Majesty's Stationery Office, London. ISBN 0-11-513826, 1986.

Ashby, M.F., and Jones, D.R.H.: Engineering materials – An introduction to their properties and application, Pergamon Press, Oxford, 278 pp. ISBN 0-08-026139, 1980.

Ashby, M.F., and Jones, D.R.H.: Engineering materials 2 : An introduction to microstructures, processing and design., Pergamon Press, Oxford, 369 pp. ISBN 0-08-032531, 1986.

Atkins, A.G. and Mai, Y.W.: Elastic and plastic fracture. Ellis Horwood, Chichester, 817 pp, 1985.

A.R.Lansdown, A.R. and Price, A.L.: Materials to resist wear. Pergamon Press, Oxford, 128 pp. ISBN 0-08-033442, 1986.

Paxton, R.R.: Manufactured carbon – a self-lubricating material for mechanical devices. CRC Press, Boca Raton, Florida, 173 pp. ISBN 0-8493-5655, 1979.

Richerson, D.W.: Modern ceramic engineering : properties, processing and use in design. Marcel Dekker, New York, 399 pp. ISBN 0-8247-1843, 1982.

Tomizawa, H. and Fischer, T. E.: Friction and wear of silicon nitride and silicon carbide in water : hydrodynamic lubrication at low sliding speed obtained by tribochemical wear. ASLE Trans. 30, 41 et seq. , 1987.

Sasaki, S.: The effects of surrounding atmosphere on the friction and wear of alumina, zirconia, silicon carbide and silicon nitride. Wear of Materials 1989, vol 1, 409-417, ASME.

Yen, B. K.: Influence of water vapor and oxygen on the tribology of carbon materials with sp^2 valence configuration. Wear 192, 208-215, 1996.

Lebeck, A. O.: Principles and design of mechanical face seals, Wiley, New York 1991, ISBN 0-471-51533-7,

Nosowicz, J., Eiletz, A.: Operating Performance of Mechanical Seals for Boiler Feed Pumps; 15th Int. Conf. on Fluid Sealing, BHR Group, Maastricht, 1997

Müller, H.K., Nau, B.S.: Fluid Sealing Technology, Principles and Applications, M.Dekker Inc., New York, 1998, ISBN 0-8247-9969-0

Grann, H., Pedersen, C.H.: Towards the universal mechanical seal for industrial pumps, 11. Int. Dichtungstagung, VDMA, Dresden 1999.



Hinweise auf Inhaber, Urheberrecht und Verwertung von *www.fachwissen-dichtungstechnik.de*

Inhaber und Betreiber der Domain www.fachwissen-dichtungstechnik.de ist Evelyn Voigt-Müller, Samlandstr. 38, 81825 München, Deutschland.

Der gesamte Inhalt der unter der Domain www.fachwissen-dichtungstechnik.de veröffentlichten Internetpublikation einschließlich der Fachkapitel, die als PDF herunterladbar sind, ist urheberrechtlich geschützt und darf insgesamt oder in Teilen ausschließlich für den persönlichen Gebrauch ohne Vergütung kopiert und verwendet werden. Zitate sind mit Angabe der Quelle ausführlich zu kennzeichnen. Jede anderweitige Verwendung oder Verwertung, Vervielfältigung, Übersetzung, Nachdruck, Vortrag, Entnahme von Abbildungen, Funksendung, Mikroverfilmung und Speicherung auf elektronischen Datenträgern ist vergütungspflichtig und bedarf der schriftlichen Genehmigung durch den Inhaber der Domain (s.o.).

Inhaber des Urheberrechts (Copyright ©) und verantwortlich für den Inhalt von www.fachwissen-dichtungstechnik.de sind die Autoren Dr. Heinz Konrad Müller und Dr. Bernard S. Nau.

Hinweise auf den Inhalt bezüglich Handelsnamen, Warenzeichen und den gewerblichen Rechtsschutz:

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenzeichen usw. in www.fachwissen-dichtungstechnik.de berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten sind und von jedermann benutzt werden dürfen.

Ein Teil der in www.fachwissen-dichtungstechnik.de beschriebenen oder im Bild wiedergegebenen Dichtelemente und Dichtsysteme sind, ohne dass darauf hingewiesen ist, durch Patentanmeldungen, Patente oder Gebrauchsmuster rechtlich geschützt. Insofern berechtigen die wiedergegebenen Beschreibungen und Bilder nicht zu der Annahme, dass die beschriebenen oder dargestellten Gegenstände im Sinne des gewerblichen Rechtsschutzes als frei zu betrachten sind und von jedermann hergestellt oder benutzt werden dürfen. Für die Richtigkeit der Wiedergabe der in www.fachwissen-dichtungstechnik.de direkt oder indirekt zitierten Vorschriften, Richtlinien und Normen sowie für die Anwendbarkeit der konstruktiven Regeln und Hinweise im Einzelfall übernehmen die Autoren und der Betreiber der Domain keine Gewähr.