Trockenlauflager auf der Grundlage von Polytetrafluoräthylen

Autor(en): **Tschacher, M. / Gübitz, F.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **87 (1969)**

Heft 21

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-70697

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Trockenlauflager auf der Grundlage von Polytetrafluoräthylen

DK 621.822.5:679.56:546.16

Von Dipl.-Ing. **M. Tschacher** und **F. Gübitz**, Frankfurt am Main

1. Einleitung

Unter den für die Konstruktion von Gleitlagern eingesetzten Werkstoffen erlangen die Kunststoffe eine zunehmend grössere Bedeutung. Diese Tatsache ergibt sich einmal aus der immer besser werdenden Vertrautheit der Konstrukteure mit den Kunststoffen, zum anderen wurden auch von den Kunststofferzeugern neue Materialien entwickelt, bzw. die bereits bekannten Stoffklassen durch Änderung und Weiterentwicklung den steigenden Anforderungen angepasst.

2. Allgemeines

Gleitlager aus metallischen Werkstoffen werden üblicherweise mit Öl oder Fett geschmiert. Durch diese Schmiermittel wird Festkörperreibung weitgehend verhindert und in gewissem Umfange auch eine Wärmeableitung erreicht. Je nach Viskosität der Schmiermittel und Oberflächenaffinität der Lagerwerkstoffe zum Schmiermittel bildet sich gemäss der hydrodynamischen Theorie ein tragender Schmiermittelfilm zwischen Lagerschale und Welle aus. Bevor jedoch ein tragfähiger Schmierfilm ausgebildet ist, liegt bei Stillstand die Welle auf der Lauffläche der Lagerschale auf. Die immer vorhandenen Oberflächenrauhigkeiten von Welle und Lagerbuchse berühren sich stellenweise, auch wenn noch Spuren des Schmiermittels zwischen den Flächen vorhanden sind.

In der Anlaufphase herrscht in einem hydrodynamisch geschmierten Lager daher ein Zustand von Mischreibung vor, bei dem die Festkörperreibung überwiegt. Dieser Zustand ändert sich mit zunehmender Drehzahl, da der entstehende Schmierkeil die Welle im Lagerraum immer mehr anhebt. Von Anlauf bis zum Beginn der Flüssigkeitsreibung durchläuft also auch jedes gut geschmierte Lager einen Mischreibungsbereich, der sich beim Abbremsen bis zum Stillstand in umgekehrtem Sinne wiederholt. Dadurch ergeben sich zwangsläufig Auswirkungen auf die Lebensdauer des Lagers.

Auch im Bereich der Flüssigkeitsreibung können negative Beeinflussungen des Schmiermittelteiles eintreten. So wird z. B. bei mechanischer oder thermischer Überlastung die Viskosität eines Schmieröles sehr stark erniedrigt. Der dadurch nur ungenügend ausgebildete Schmierfilm verliert teilweise seine tragende Funktion und wird stellenweise von den Rauhigkeitsspitzen der Gleitpartner unterbrochen. Das Ergebnis ist eine einsetzende Mischreibung. Ähnlich liegen die Verhältnisse, wenn andere Flüssigkeiten mit niedriger Viskosität, z. B. Wasser oder andere Fördermedien, im Pumpenbau die Aufgabe eines Schmiermittels erfüllen sollen oder müssen. Deshalb werden von einem Lagerwerkstoff allgemein ausser guten Gleiteigenschaften auch gewisse Notlaufeigenschaften verlangt, d. h. ein Lager soll auch beim Einsatz unter ungünstigen Bedingungen oder mangelhafter bzw. ausbleibender Schmierung noch grösstmögliche Betriebssicherheit aufweisen. Die Erreichung dieses Zieles wurde schon seit langem durch Auswahl von besonders geeigneten Lagerwerkstoffen (z. B. Sintermetall) oder Zugabe von festen Schmiermitteln wie Graphit, Molybdändisulfid usw. angestrebt. Bei der Betrachtung des Komplexes Notlaufeigenschaften muss ferner berücksichtigt werden, dass beim Ausbleiben eines trennenden Schmiermittelfilmes der Lagerwerkstoff mit dem Wellenwerkstoff verschweissen und «festfressen» kann. Es lag daher nahe, für Lager neue Werkstoffe einzusetzen, bei denen die Neigung oder Möglichkeit zum Festfressen nicht mehr gegeben ist. Hierzu wurden ursprünglich Kohle oder keramische Massen verwendet. In neuerer Zeit werden in zunehmendem Masse Kunststoffe, wie z. B. Polyamide, Polyacetate usw. dafür eingesetzt.

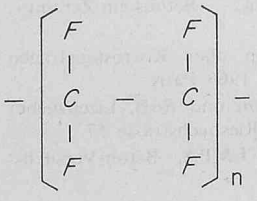


Bild 1. Konstitutionsformel des Polytetrafluoräthylens

Neben geschmierten Lagern werden heute von der Industrie in zunehmendem Masse Lager und Lagerwerkstoffe verlangt, die echte Trockenlaufeigenschaften aufweisen. Diese Forderung wurde aus verschiedenen Gründen erhoben. So kann z. B. infolge zunehmender Rationalisierung und Miniaturisierung von Aggregaten die Zufuhr von Schmiermitteln zu Lagerstellen schwierig oder unmöglich werden. In anderen Einsatzgebieten, wie in der Lebensmittel- oder Textilindustrie, kann ein Schmiermittel gleichzeitig die Gefahr einer Verschmutzung des zu verarbeitenden Gutes bedeuten. In der chemischen Industrie ist bei vielen Lagerstellen die Möglichkeit eines Kontaktes mit schmierfilmlösenden Substanzen, wie organische Lösungsmittel usw., vorhanden. Weiterhin gibt es heute Anwendungen in der Kältetechnik oder Raumfahrtindustrie (Tiefsttemperaturen, Vakuum), bei denen die herkömmlichen Schmiermittel völlig versagen. Es handelt sich dabei um echte neue Anwendungsgebiete, die nur durch schmiermittelfreie, trockenlaufende Lager befriedigt werden können.

Ganz allgemein ist zu wartungsfreien, d. h. ohne Schmierung betriebenen Gleitlagern, unabhängig von den verwendeten Werkstoffen, folgendes zu sagen:

1. Trockenlaufende Lager haben von der ersten Umdrehung an naturgemäss Abrieb. Dieser lässt sich aber durch entsprechende Werkstoffauswahl klein halten, so dass dennoch trockenlaufende Lager mit grosser Lebensdauer möglich sind. Die Lebensdauer eines solchen Lagers ist abhängig von der Belastung, der Gleitgeschwindigkeit und der Betriebsart. Es ist absolut nicht gleich, ob ein Lager bei gleichem pv-Wert mit hoher oder niedriger Geschwindigkeit beaufschlagt wird.
2. Der Reibungskoeffizient ist keine Werkstoffkonstante, sondern abhängig von Oberflächenrauhigkeit, Flächenpressung, Gleitgeschwindigkeit, Lagerspiel, Oxydschichten auf dem Laufparner, der Lagertemperatur und weiteren Einflüssen. Bei soviel Abhängigkeiten wird verständlich, dass optimale Lagerkonstruktionen nur durch Versuche ermittelt werden können.

Viele der vorstehend genannten Probleme wurden durch Verwendung von Kunststoffen befriedigend gelöst. Als besonders geeignetes Lagermaterial hat sich *Polytetrafluoräthylen* (PTFE) erwiesen. Dieser Fluorkunststoff wurde bereits 1938 in den USA entdeckt. Während des Krieges unterlag er als kriegswichtiges Material strenger Geheimhaltung. Erst 1947 kamen die ersten Mengen auf den europäischen Markt. Seit dieser Zeit hat PTFE eine steigende Bedeutung erlangt. Im Jahre 1967 wurden etwa 9000 t dieses Kunststoffes erzeugt.

3. Merkmale des Materials

Polytetrafluoräthylen ist eine organische Fluorverbindung, die nach der in Bild 1 dargestellten Konstitutionsformel aufgebaut ist. Das Molekulargewicht des Polymeren liegt im Bereich von 500 000 bis 1 000 000. Das Material ist frei von Stabilisatoren und Verarbeitungshilfsmitteln. Durch die hohe Bindungsenergie des Fluors zum Kohlenstoff erklären sich viele der aussergewöhnlichen Eigenschaften dieses Materials:

a. PTFE hat den niedrigsten Reibungskoeffizienten aller bekannten Feststoffe. Statischer und dynamischer Reibungskoeffizient sind praktisch gleich (daher kein «stick-slip»). Diese Eigenschaften bleiben unverändert bis nahe an den Kristallitschmelzpunkt, der bei 327 ° C liegt.
b. Breitester Temperaturanwendungsbereich aller heute auf dem Markt angebotenen Thermoplaste. Temperaturgrenzen für Dauerbelastung von — 200 ° C bis + 260 ° C (kurzzeitig bis + 300 ° C). Auch unterhalb — 200 ° C bleibt PTFE noch elastisch, so hat dieses Material bei — 256 ° C zum Beispiel noch eine Dehnung von 3 %.
c. Aussergewöhnliche Chemikalienbeständigkeit: PTFE wird nur von elementarem Fluor, Chlor-Trifluorid und geschmolzenen Alkalimetallen angegriffen.
d. PTFE zeigt ausgeprägtes antiadhäsives Verhalten.
e. Die Witterungsbeständigkeit ist ausgezeichnet. So wurden zum Beispiel nach mehrjährigen Bewitterungsversuchen in verschie-

denen Klimagebieten keinerlei Änderungen der mechanischen und elektrischen Eigenschaften festgestellt.

f. PTFE ist unbrennbar, physiologisch einwandfrei (innerhalb des Temperaturanwendungsbereiches) und zeigt keine Wasseraufnahme.

Diesen, in ihrer Kombination fast einmaligen Eigenschaften, stehen verständlicherweise auch einige negative Charakteristika gegenüber. Zum Beispiel:

- Verhältnismässig hoher Kaltfluss
- Schlechte Wärmeleitfähigkeit
- Hohe Wärmeausdehnung
- Begrenzte Abriebfestigkeit
- Schlechte Verschweissbarkeit
- Verklebung nur nach chemischer Vorbehandlung möglich.

Durch geeignete Füllstoffe können viele dieser Eigenschaften jedoch positiv beeinflusst werden. Darüber hinaus ist es möglich, durch die Füllstoffauswahl das Material speziellen Anforderungen anzupassen. Als bevorzugte Füllstoffe werden eingesetzt:

1. Kurzglasfasern
2. Kohle bzw. Graphit
3. Bronze
4. Molybdändisulfid (MoS_2)
5. Keramikpulver
6. Kombinationen dieser Füllstoffe.

Die wichtigsten, hierdurch hervorgerufenen Eigenschaftsänderungen sind:

1. Kurzglasfasern bewirken höhere Druckfestigkeit und Steifigkeit, geringeren Kaltfluss, höhere Verschleissfestigkeit bzw. geringeren Abrieb. Durch diesen Zusatz werden Chemikalienbeständigkeit und elektrische Eigenschaften am wenigsten geändert; er ist daher universell verwendbar.
2. Kohle bzw. Graphit ergeben höhere Härte und Druckfestigkeit, verbesserte Wärmeleitung, niedrigen Einlaufverschleiss an bewegten Teilen; bei höheren Füllstoffmengen ist auch elektrische Leitfähigkeit zu erzielen.
3. Bronze erzielt höhere Druckfestigkeit und Härte, geringeren Kaltfluss, bessere Verschleissfestigkeit, sehr gute Wärmeleitfähigkeit. PTFE mit Bronzefüllstoff ist besonders geeignet als Lagermaterial unter ungünstigen Bedingungen, hat aber nur bedingte Chemikalienbeständigkeit, weil Bronze leicht angegriffen wird.
4. MoS_2 ergibt ähnliche Eigenschaften wie Kohle bzw. Graphit. Wird meistens für Sonderzwecke angewendet.
5. Keramikpulver bewirkt höhere Formbeständigkeit, gute dielektrische Eigenschaften, günstiges Abriebverhalten (je nach Füllstoff).
6. Die Kombinationen dieser Füllstoffe werden für verschiedene Anwendungen eingesetzt; dabei sind auch Mischungen mehrerer Füllstoffe üblich, z. B. 20 % Glas und 5 % Kohle.

Bezüglich der Verwendung von Füllstoffen bei PTFE kann allgemein gesagt werden, dass sich der Reibungskoeffizient durch die Füllstoffe nur in geringen Grenzen ändert. Der Prozentsatz des Füllstoffes ist dabei in den meisten Fällen ausschlaggebender als die Art desselben. Diese Erscheinung wird dadurch erklärt, dass das relativ weiche PTFE sowohl den Füllstoff als auch den Gegenlaufpartner mit einer dünnen Schicht überzieht und nach einer gewissen Einlaufzeit wieder nur PTFE auf PTFE läuft. Es hat sich in vielen Versuchen gezeigt, dass ein Reibkontakt zwischen PTFE und PTFE, im Gegensatz zu den sonstigen Erfahrungen bei Metall-Lagern mit gleichen Reibpartnern, die niedrigsten Reibwerte ergibt. Aus dem oben Gesagten lässt sich auch erklären, weshalb schmirgelnde Bestandteile, wie z. B. Glasfasern, wenn sie als Füllstoff im PTFE eingebettet sind, nicht abrasiv wirken.

4. Verarbeitung von Polytetrafluoräthylen

PTFE besitzt eine für Thermoplaste ungewöhnlich hohe Schmelzviskosität, die z. B. bei 380 °C in der Grössenordnung von 10^{11} poise liegt. Sie übertrifft diejenige herkömmlicher Thermoplaste um mehrere Zehner-Potenzen. Da das Polymerisat im amorphen Zustand ausserdem sehr scherempfindlich ist und zum Schmelzbruch neigt, ist eine Verformung durch Spritzgiessen oder Extrudieren in üblicher Weise nicht möglich. Für die Verarbeitung wurden besondere Verfahren entwickelt, die denen der Pulvermetallurgie ähneln. Das Material wird kalt in einem Werkzeug verdichtet und anschliessend durch Wärmebehandlung bei etwa 380 °C gesintert.

5. Technische Gesichtspunkte bei der Anwendung als Lagerwerkstoff

Für einen erfolgreichen Einsatz dieses Werkstoffes ist unerlässliche Voraussetzung, dass seine spezifischen Eigenschaften beachtet werden. Es ist nicht sinnvoll, Metalllagerkonstruktionen unverändert zu übernehmen. Einige Grundregeln für das Konstruieren mit PTFE seien daher vorangestellt:

1. PTFE eignet sich auf Grund seines verhältnismässig hohen Kaltflusses und seiner geringen Festigkeit nur in sehr wenigen Fällen zur Konstruktion tragender Bauteile.
2. Bei höheren Belastungen ist es notwendig, die PTFE-Teile in Kammern oder Gehäusen einzubauen, um Kaltfluss zu vermeiden. Das gleiche kann erreicht werden, wenn PTFE nur in dünnen Schichten auf einem Trägermaterial aufgebracht wird.
3. Die geringe Wärmeleitfähigkeit und die gegenüber Metallen hohe Wärmedehnung muss berücksichtigt werden (Lagerspiel, Wanddicke des Konstruktionsteils).
4. PTFE besitzt bei rund 19 °C einen Umwandlungspunkt erster Art, der mit einer Volumenänderung von etwa 1 % verbunden ist. Teile mit engen Toleranzen müssen daher je nach Einsatztemperatur bei Temperaturen über oder unterhalb dieser Gitterumwandlung gefertigt werden.
5. Beachtung der relativ niedrigen Verschleissfestigkeit, besonders des ungefüllten PTFE. Bei Gleitbeanspruchung muss die Oberfläche des Gegenlaufpartners feinst bearbeitet sein (Rauhtiefe $Rt \leqq 1{,}5$ µm).
6. Beachtung der Verarbeitungsverfahren. Abfall ist nur begrenzt wieder verwendbar. Daher Verlust auf Mindestmass beschränken. Bereits bei der Konstruktion sind die für PTFE möglichen Verarbeitungstechniken zu berücksichtigen und geometrisch einfache Teile anzustreben.

6. pv-Wert und Abnutzungsfaktor von auf PTFE beruhenden Lagerwerkstoffen

Zur Beurteilung der Dauergebrauchseigenschaften von Lagerwerkstoffen, vor allem der Lebensdauererwartung derselben, wurden bereits viele Versuche unternommen. In den USA sind zwei Methoden zur Bestimmung der Lagereigenschaften von Kunststoffen allgemein anerkannt. Beide haben zum Ziel, einen Grenz-

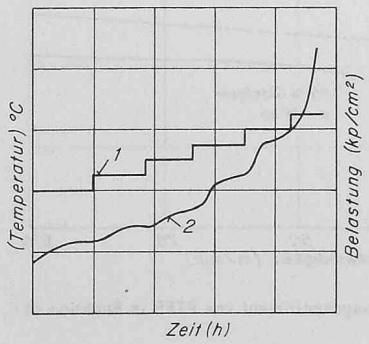


Bild 2. Schematische Darstellung des Laststeigerungsversuches zur Ermittlung des Grenz-pv-Wertes
1 Belastung
2 Temperatur

Rechts:

Bild 3. Schematische Darstellung der Grenzwertermittlung aus der Kurve des Abnutzungsfaktors

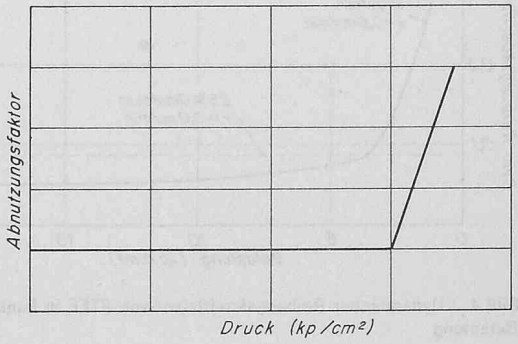


Tabelle 1. Grenz-*pv*-Werte für verschiedene PTFE-Mischungen

Material	Füllstoffanteil Gew. %	Gew. %	0,05 m/s kp/cm²	0,5 m/s kp/cm²	5 m/s kp/cm²
PTFE ohne Füllstoff	—	—	0,4	0,64	0,88
PTFE + Glasfasern	25	22,2	3,5	4,6	5,6
PTFE + Glasfasern + MoS_2	15 5	12,2 2,3	3,9	4,9	6,2
PTFE + Bronze + MoS_2	55 5	23,8 2,3	5,8	9,7	8,1
PTFE + Kohle/Graphit	25	26,3	5,3	5,3	3,7
PTFE + Cadmiumoxyd	50	23,7	14,2	13,3	8,1

pv-Wert zu bestimmen, bis zu dem das Lager auch über längere Zeit belastet werden kann. Die eine Methode nimmt an, dass der Grenz-*pv*-Wert direkt abhängig ist von Temperatur und Reibung der Gleitpartner. Man geht dabei so vor, dass die Belastung des Lagerteiles bei konstanter Geschwindigkeit stufenweise erhöht wird. Gemessen werden die Reibungskraft und die Lagertemperatur. Solange man sich noch in der Prüfung unterhalb des Grenz-*pv*-Wertes befindet, werden sich für jede Laststufe die Temperatur und die Reibungskraft auf einem bestimmten Wert stabilisieren. Erst wenn sich Reibungskraft bzw. Temperatur nicht mehr stabilisieren, ist der Grenz-*pv*-Wert überschritten. Die letzte Stufe, auf der noch eine Stabilisierung erfolgte, wird dann als Grenzwert angegeben. Bild 2 zeigt die schematische Darstellung des Laststeigerungsversuches.

Die zweite Methode macht davon Gebrauch, dass nach verschiedenen Untersuchungen der Abriebfaktor, solange man unter dem Grenz-*pv*-Wert bleibt, praktisch konstant ist. Bei dieser Methode wird also der sogenannte Abriebfaktor gemessen, der angibt, um welches Volumen sich der Testkörper bei einer bestimmten Belastung und einer bestimmten Geschwindigkeit in einer bestimmten Zeit verringert. Trägt man daher den Abriebfaktor über die Belastung bei konstanter Geschwindigkeit auf, dann ergibt sich der Grenz-*pv*-Wert bei jener Last, bei der der Abriebfaktor nicht mehr konstant ist. Beide Methoden haben bei Vergleichen sehr gute Übereinstimmung ergeben. Bild 3 zeigt die schematische Darstellung der Grenzwertermittlung aus der Kurve des Abnutzungsfaktors.

Es wurde gefunden, dass sich je nach Füllstoff bzw. Füllstoffanteil sehr unterschiedliche Grenz-*pv*-Werte ergeben können. Eindeutig geht aus den Versuchen jedoch hervor, dass gefülltes PTFE ein günstigeres Verhalten zeigt als ungefülltes. In Tabelle 1 sind die Grenz-*pv*-Werte für verschiedene PTFE-Compounds aufgeführt.

7. Abrieb

Wie bereits eingangs erwähnt, ist bei einem trockenlaufenden Lager der Abrieb unvermeidbar. Es ist daher nur interessant, wie gross dieser Abrieb ist und unter welchen Bedingungen er für welche speziellen Zusammensetzungen ermittelt werden kann. Allgemein ist festzustellen, dass die Abriebwerte sehr stark füllstoffabhängig sind und bei entsprechendem Füllstoff bzw. Füllstoffgehalt um den Faktor 10^3 bis $3 \cdot 10^3$ gegenüber ungefülltem Material verbessert werden können. Der Abrieb kann in verschiedenen Formen auftreten:

a. Adhäsionsabrieb
b. Abrasiver Abrieb
c. Korrosionsabrieb
d. Ermüdungsabrieb

Für ein Lager aus Polytetrafluoräthylen mit einem geeigneten und entsprechend fein bearbeiteten Gegenlaufpartner kommt meistens nur der Adhäsionsabrieb in Betracht. Unter adhäsivem Abrieb versteht man die Form von Abrieb, die zustande kommt, wenn zwei glatte Oberflächen im Reibkontakt miteinander sind und Material zwischen diesen beiden Oberflächen hin und her übertragen wird, bis es als lose abgeriebene Partikel aus den Gleitflächen austritt.

Die Umweltbedingungen haben ebenfalls einen Einfluss auf die Lebensdauer eines Kunststofflagers. Es hat sich überraschenderweise gezeigt, dass bei einem Reibkontakt PTFE gegen Metall eine Wasserschmierung im allgemeinen höhere Abriebwerte bringt. Dieses Verhalten kann damit erklärt werden, dass durch den Wasserfilm ein Übertragen von PTFE auf die Metallwelle nicht möglich ist. Demgegenüber zeigen Reibpaarungen PTFE auf PTFE mit Wasserschmierung einen geringeren Abrieb. Auch verschiedene Gase, Schmier- und Lösungsmittel ändern zwangsläufig die Lagercharakteristika, jedoch sind nähere Werte noch nicht bekannt.

Zum Abriebverhalten ist allgemein noch zu bemerken, dass zwischen dem Einlaufabrieb und dem permanenten Abrieb während des Betriebes des Lagers deutliche Unterschiede bestehen. Während der Einlaufzeit sind sowohl der Reibungskoeffizient als auch der Abrieb höher als im späteren Betrieb. Aus diesem Grunde sollten die Lager etwa $^1/_2$ Stunde bei niedriger Geschwindigkeit einlaufen.

8. Reibungsverhalten

Die bisherigen Ausführungen beschäftigten sich mit dem Abriebverhalten der Lager. Es muss aber genau unterschieden werden zwischen Abriebverhalten eines Lagers und dem Reibungsverhalten, d. h. dem Reibungskoeffizienten eines Lagers. Es hat sich gezeigt, dass der Reibungskoeffizient für reines PTFE sehr stark druckabhängig ist. Dagegen bleibt dieser Reibungsbeiwert zum Beispiel bei PTFE mit 25 % Glasfaserzusatz nahezu gleich, Bild 4. Der Reibungskoeffizient steigt sowohl bei reinem als auch bei gefülltem PTFE bis zu einer Geschwindigkeit von etwa 25 m/min an. Nach dieser «kritischen» Geschwindigkeit bleibt der Reibungskoeffizient über einen breiten Geschwindigkeitsbereich nahezu konstant, Bild 5. Temperaturänderungen haben nur einen geringen Einfluss auf den Reibungskoeffizienten.

9. Einige Gesichtspunkte für das Konstruieren von PTFE-Trockenlauflagern

Aus dem bisher Gesagten ist bereits erkennbar, dass sehr viele Einflussgrössen eine Lagerkonstruktion bestimmen. Es ist daher

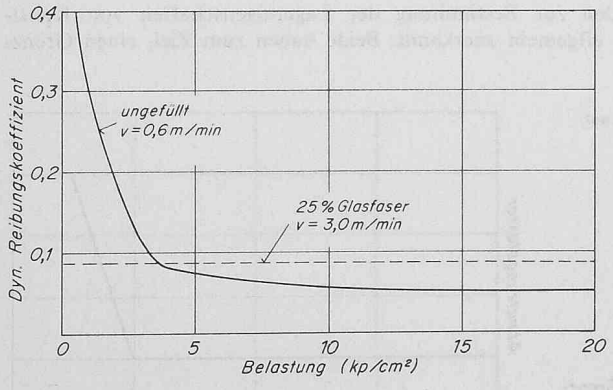


Bild 4. Dynamischer Reibungskoeffizient von PTFE in Funktion der Belastung

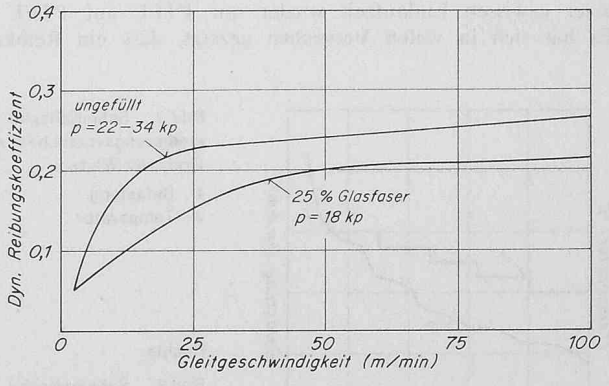
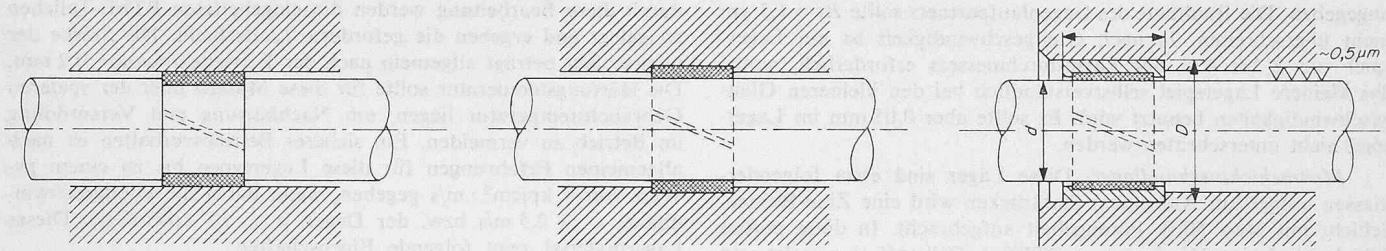


Bild 5. Dynamischer Reibungskoeffizient von PTFE in Funktion der Gleitgeschwindigkeit



Lagerfolie in Nut an der Welle | Lagerfolie in Nut am Gehäuse | komplette Lagerbuchse mit Lagerfolie

Bild 6. Einbau- und Befestigungsbeispiele von Schlitzringlagern aus PTFE

nicht möglich, Patentrezepte zur Konstruktion von trockenlaufenden Gleitlagern aus PTFE zu geben. Folgende allgemeine Richtlinien sollten jedoch *immer* beachtet werden:

a. Die theoretisch höchstzulässige Betriebstemperatur der Lager beträgt 260 ° C, dies ist die Dauergebrauchstemperatur von PTFE. Bei dieser Temperatur neigt das Material jedoch bereits sehr stark zum Kriechen, so dass eine ausreichende Funktion nur noch in den seltensten Fällen gegeben sein wird. Die Lagertemperatur sollte daher möglichst niedrig gehalten werden.

b. Einen wichtigen Faktor stellt das radiale Lagerspiel dar. Bedingt durch die hohe Wärmedehnung der Kunststoffe gegenüber Metall wird sich dieses Spiel mit steigender Temperatur stark verkleinern und kann bei unsachgemässer Konstruktion zum Fressen des Lagers auf der Welle führen. Die Lagerschale sollte daher höchstens 3 mm dick sein, um wenigstens eine begrenzte Wärmeableitung zu ermöglichen und somit das Kriechen herabzusetzen. Als Lagerspiel haben sich 8 bis 10 ‰ des Wellendurchmessers als günstig erwiesen.

c. Es ist nicht sinnvoll, Lagerbuchsen im Gehäuse einzupressen, da dadurch keine feste Verankerung gegeben ist. Durch den erwähnten Kaltfluss und die durch den Betrieb bedingten Wärmeschwankungen kommt es zur Spannungsrelaxation, so dass nach kurzer Betriebszeit ein Lockern der Buchse im Gehäuse erfolgen kann.

Es hat in den vergangenen Zeiten nicht an Bemühungen gefehlt, die Auslegung von trockenlaufenden Kunststofflagern mathematisch zu erfassen und zu berechnen. Alle diese Versuche gehen jedoch von sehr stark vereinfachenden Annahmen aus, so dass sich die Ergebnisse zum grössten Teil nicht unmittelbar auf die Praxis anwenden lassen. Man ist daher nach wie vor gezwungen, wenn man konkrete Aussagen erhalten will, Versuche mit den entsprechenden Materialien unter den zu erwartenden Betriebsbedingungen zu fahren. Als ungefähre Richtgrössen kann man in der Praxis aber mit den in Tabelle 2 zusammengestellten Werten rechnen.

Tabelle 2. Grenzen des pv-Wertes bei PTFE-Lagern

Werkstoff	pv-Grenzwert kp/cm² · m/s v = 0,5 m/s	 v = 5 m/s
PTFE ungefüllt	0,6	0,9
PTFE mit 25 % Glasfasergehalt	4,5	5,5
PTFE mit 55 % Bronze und 5 % MoS_2-Gehalt	9,5	8,0

Die mit der Anwendung von relativ dickwandigen Lagerschalen verbundenen Nachteile führten zur Entwicklung der verschiedensten Sonderkonstruktionen. Alle diese Ausführungen zielen daraufhin, die Füllstofflaufschicht möglichst dünn zu halten und dabei gleichzeitig die guten Gleiteigenschaften des Materials zu nutzen. Im folgenden seien die bekanntesten Konstruktionen näher beschrieben:

Folienlager. Diese Folien (Schlitzring)-Lager bestehen in der einfachsten Ausführung aus Folienstreifen in der Breite des Lagers und Länge des Lagerumfanges abzüglich des sogenannten Stossspieles. Sie werden in entsprechende Eindrehungen in der Lagerschale bzw. im Gehäuse oder auch in der Welle eingelegt. Bild 6 zeigt typische Einbaubeispiele dieser Lager. Die Foliendicke beträgt normalerweise 1,5 mm, die Eindrehung, in die die Folie eingelegt wird, etwa ½ Foliendicke. Die Folie kann in verschiedenen Zuschnitten benutzt werden. Bild 7 zeigt einige bewährte Formen von Folienzuschnitten.

Der Spalt von 0,5 s (s = Foliendicke) ist notwendig, um die Wärmedehnung des Lagers aufzunehmen. Diese Lager zeigen einen weitgehend gleichmässigen Abrieb über den gesamten Umfang, da die Folie nicht fest montiert ist und eine Relativbewegung zwischen Lagerbuchse und Welle ausführen kann. Die Einhaltung eines bestimmten Spieles ist bei dieser Art von Lagern nicht sonderlich kritisch, da die Wärmespannungen, wie schon gesagt, über den Umfang ausgeglichen werden können. Für diese Lager werden normalerweise ebenfalls gefüllte PTFE-Typen verwendet. Die pv-Werte entsprechen etwa den in Tabelle 2 genannten Richtwerten.

Schlitzringlager werden häufig verwendet, da die Konstruktion sehr preisgünstig ist und eine praktische Lösung für viele Lagerprobleme darstellt. So ist z. B. die Ersatzteilhaltung sehr einfach. Man benötigt nur ein Folienstück, aus dem je nach Bedarf die Lagerfolien herausgeschnitten werden können.

Zweischichtverbundlager. Diese Lagerbauart besteht aus einem Stahlrücken und einer rund 0,5 mm dicken, fest mit dem Stahlband verbundenen Auflage aus gefülltem PTFE. Als Füllstoff dient hier meist Metallpulver. Für die Verbindung Stahlrücken / Gleitfläche werden keine Klebstoffe verwendet, da sie den Einsatz sowohl temperatur- als auch chemikalienmässig begrenzen würden. Es besteht bei dieser Konstruktion die Möglichkeit der nachträglichen spanenden Bearbeitung der Laufschicht, d. h. man kann Lagerbuchsen nach dem Einpressen auf ein gefordertes Toleranzmass bearbeiten. Die durch das Einpressen hervorgerufene Spannung wird vom Stahlrücken aufgenommen und dadurch nicht mehr an den Kunststoff weitergeleitet. Für Lagertypen dieser Bauart werden pv-Werte von 4 bis 6 kp/cm² · m/s

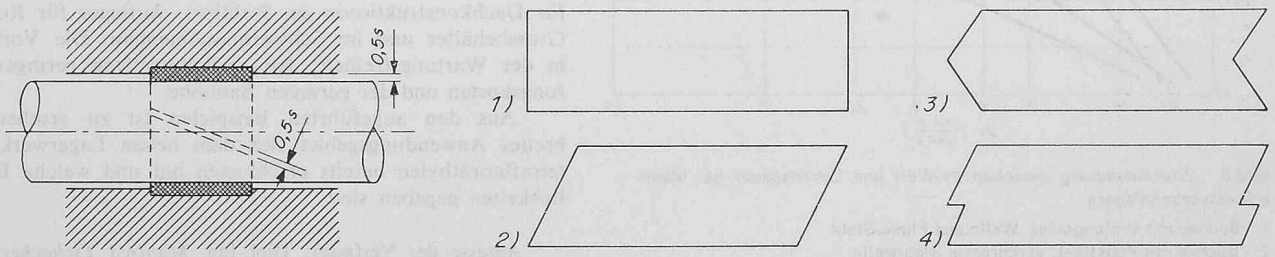


Bild 7. Bewährte Einbauverhältnisse und Folienzuschnitte für Schlitzringlager aus PTFE. Links Einbauverhältnisse, s Foliendicke. 1 bis 4 typische Endschnitte

angegeben. Die Rauhtiefe des Gegenlaufpartners sollte $Rt = 1{,}5$ µm nicht überschreiten. Je nach Gleitgeschwindigkeit ist ein Lagerspiel von 2 bis 4 ‰ des Lagerdurchmessers erforderlich, wobei das kleinere Lagerspiel selbstverständlich bei den kleineren Gleitgeschwindigkeiten benutzt wird. Es sollte aber 0,05 mm im Lagerspiel nicht unterschritten werden.

Mehrschichtverbundlager. Diese Lager sind etwa folgendermassen aufgebaut: Auf einem Stahlrücken wird eine Zinn-Bronze-Schicht mit etwa 50 % Porengehalt aufgebracht. In diese poröse Schicht wird eine Mischung aus PTFE + Füllstoff eingewalzt und anschliessend gesintert. Die so beschichteten Metallbahnen werden anschliessend in Streifen geschnitten und zu Lagern gerollt.

Die auf der Metallträgerschicht liegende PTFE-Gleitschicht hat eine Dicke von rund 0,02 mm. Dadurch wird eine Fertigung der Lager mit sehr engen Toleranzen notwendig. Eine spanende Nachbearbeitung ist nicht möglich.

Über den Zusammenhang zwischen den *pv*-Werten und der Lebensdauer der Lager (bei Raumtemperatur) gibt Bild 8 Auskunft. Infolge der auftretenden Reibungswärme laufen diese Kurven nicht durch den 0-Punkt. Dadurch ergeben sich Schnittpunkte der Kurven mit der die Lebensdauer darstellenden Ordinate im Negativbereich.

Die besonderen Eigenschaften derartiger Lager lassen sich folgendermassen skizzieren:

a. Ausgezeichnete Gleiteigenschaften und hoher Verschleisswiderstand der gefüllten PTFE-Schicht.

b. Sehr gute Wärmeableitung wegen der dünnen PTFE-Schicht bei gleichzeitiger geringer Wärmedehnung (gute Wärmeleitfähigkeit durch Metall).

c. Stahlrücken sorgt für hohe Druckfestigkeit.

d. Praktisch keine elektrostatische Aufladung. Auf Grund der relativ dünnen PTFE-Schicht können diese Lager jedoch kaum Fremdstoffe einbetten. Es ist daher für eine Abdichtung zu sorgen.

Kunstharzverbundlager. Unter der Bezeichnung Kunstharzverbundlager versteht man Mischungen aus härtbaren Harzen wie Phenol- oder Epoxydharzen, denen PTFE als Füllstoff zugesetzt ist. Diese Kunstharzverbundschicht lässt sich auf jedem metallischen Stützkörperwerkstoff und auf jedes beliebig geformte Konstruktionsteil aufbringen. Ein mechanisches Verankern ist nicht erforderlich, da die als Bindemittel verwendeten härtbaren Harze ausgezeichnet auf Metallen haften. Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Lagerkonstruktionen handelt es sich bei den Kunstharzverbundlagern um ein Material, das nicht in Schichten aufgebaut ist. Das Aufbringen kann durch Spritzen, Tauchen, Streichen oder Sintern vorgenommen werden. Nach dem Aushärten, wobei die Härtungstemperatur des Harzes massgebend ist, müssen derartige Oberflächen auf Fertigmass bearbeitet werden. Erst durch diese Bearbeitung werden die eingebetteten PTFE-Teilchen freigelegt und ergeben die geforderte Laufschicht. Die Stärke der Gleitschicht beträgt allgemein nach der Fertigbearbeitung 0,2 mm. Die Härtungstemperatur sollte für diese Massen über der späteren Gebrauchstemperatur liegen, um Nachhärtung und Versprödung im Betrieb zu vermeiden. Ein sicheres Betriebsverhalten ist nach allgemeinen Erfahrungen für diese Lagertypen bis zu einem *pv*-Wert von 8 kp/cm² · m/s gegeben, wenn dabei die Gleitgeschwindigkeit $v \leqq 2{,}5$ m/s bzw. der Druck $p \leqq 25$ kp/cm² ist. Dieses Lagermaterial zeigt folgende Eigenschaften:

a. Gute Haftung der Harz-PTFE-Kombination auf metallischem Untergrund.

b. Möglichkeit einer Feinbearbeitung der Lagerschale (zum Beispiel Aufreiben mit Reibahle auf Fertigmass).

c. Man benötigt nicht unbedingt eine fertige Lagerkonstruktion, sondern kann je nach Anwendungsfall die Masse direkt in die Gehäusebohrung einbringen.

d. Einfaches Beschichten ebener Gleit- und Anlaufflächen ist möglich.

e. Eignung als Gleitschicht zur Verhinderung von Passungsrost.

f. Die Temperaturbelastbarkeit wird durch die Art des Harzes begrenzt und liegt tiefer als bei den Kombinationen von PTFE mit anorganischen Füllstoffen.

g. Die Chemikalienbeständigkeit ist harzabhängig. Aggressive Medien bzw. Lösungsmittel können zur Quellung bzw. Zerstörung der Lager führen.

h. Durch den Harzgehalt liegt der Reibungskoeffizient eines fertigen Lagers etwas höher als bei Lagern aus reinem PTFE.

Gewebelager. Als Sonderfall von PTFE-Verbundschichtenkonstruktionen können Gewebelager mit PTFE-Geweben als Gleitfläche angesehen werden. Hierbei wird ein Mischgewebe aus PTFE-Faser und einer Verbundfaser auf eine Stützschicht aus Metall oder Kunstharz aufgebracht. Das Mischgewebe ist so aufgebaut, dass an der Gleitoberfläche überwiegend PTFE-Fasern sind, an der Unterseite, d. h. an der zu verklebenden Seite die Verbundfasern überwiegen. Dadurch wird eine einwandfreie Befestigung auf der Stützschale ermöglicht. Derartige Gewebelager eignen sich besonders für hohe Flächenpressungen, da die Einzelfäden durch Recken orientiert sind und in Längsrichtung sehr hohe Festigkeitswerte aufweisen.

Gewebelager eignen sich besonders für Anwendungen, bei denen hohe Flächenpressungen zu erwarten sind. Als höchstzulässige Umfangsgeschwindigkeit gibt ein Hersteller etwa 0,85 m/s an. Als maximal zulässige Flächenpressung werden rund 1500 kp/cm² genannt. Bei Sonderkonstruktionen und äusserst niedrigen Geschwindigkeiten sollen Pressungen bis etwa 4000 kp/cm² möglich sein.

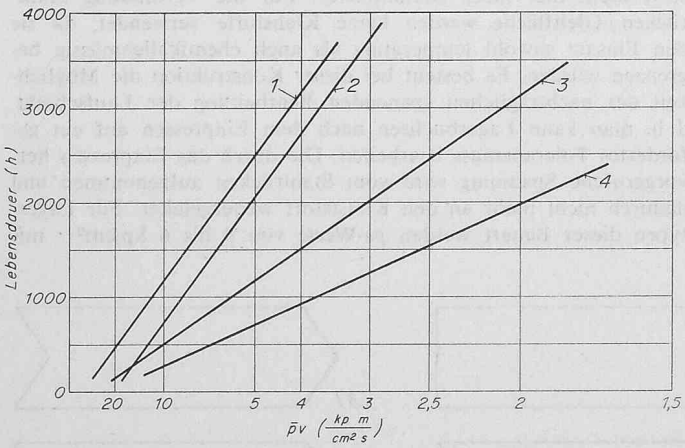


Bild 8. Zusammenhang zwischen *pv*-Wert und Lebensdauer bei Mehrschichtverbundlagern

1 Buchse mit Umfangslast; Welle aus Fluss-Stahl
2 Buchse mit Punktlast; verchromte Stahlwelle
3 Buchse mit Punktlast; Welle aus Fluss-Stahl
4 Anlaufscheibe

10. Verschiedenes

Polytetrafluoräthylen wird heute nicht nur in den angeführten Gleitlagerkonstruktionen verwendet, es hat sich in der gesamten Technik oft als einzige Lösungsmöglichkeit von schwierigen Lagerproblemen eingeführt. Für Sonderzwecke, z. B. bei hohen Temperaturen und in aggressiver Atmosphäre werden spezielle PTFE-Typen als Trockenschmiermittel für Wälzlager verwendet.

In der Vakkum- und Tiefsttemperaturtechnik wird gefülltes PTFE zum Bau von Wälzlagerkäfigen eingesetzt. Ein bemerkenswertes Anwendungsgebiet hat PTFE im Baugewerbe in Form von Auflagern gefunden. Als Beispiele seien genannt: Brückenauflager, Lager für schwere Lasten in korrosiven Flüssigkeiten, Auflager für Dachkonstruktionen im Stahlbau, Auflager für Rohrbrücken, Grossbehälter und im Schwermaschinenbau. Die Vorteile liegen in der Wartungsfreiheit, den verhältnismässg geringen Anschaffungskosten und der geringen Bauhöhe.

Aus den angeführten Beispielen ist zu ersehen, ein wie breites Anwendungsgebiet sich dem neuen Lagerwerkstoff Polytetrafluoräthylen bereits erschlossen hat und welche Einsatzmöglichkeiten gegeben sind.

Adresse der Verfasser: Dipl.-Ing. *Manfred Tschacher* und *Franz Gübitz*, Farbwerke Hoechst AG, vormals Meister Lucius Brüning, D-6230 Frankfurt am Main 80, Postfach 80 03 20.