

die an der Nabe angeschweisst sind, ist darauf zu achten, dass die Schweissnähte parallel zur Speichenachse verlaufen, um hohe Beanspruchungen in ihnen zu vermeiden.

D. Zusammenfassung

Bei den früheren statischen Dehnungsmessungen [1] konnten die Lastannahmen nur recht grob getroffen werden. Aus diesem Grunde wurden den theoretischen Betrachtungen über die Stossvorgänge beim Rollen eines Rades über ein Hindernis Beanspruchungsmessungen mit Dehnungsmessstreifen am Rade eines fahrenden Vielfachgerätes gegenübergestellt. Aus den so gewonnenen Erfahrungswerten liess sich näherungsweise eine Formel für die Stosskraft in einem fahrenden Gerät aufstellen, mit deren Hilfe sich die momentane Radlast beim Fahren über Unebenheiten rechnerisch erfassen lässt. Anhand dieser Formel wurden sodann für bestimmte Verhältnisse die Kräfte errechnet, mit denen die Räder bei den folgenden der Einfachheit halber statisch durchgeführten Dehnungsmessungen zu belasten waren. Das Ergebnis dieser Dehnungsmessungen liess Schlüsse auf den Einfluss der Abmessungen und der Gestaltung einzelner Radteile zu und zeigte deutlich die gefährdeten Stellen auf. Im Rah-

men der statischen Dehnungsmessungen wurde weiterhin erkannt, dass bei den Speichenrädern die Beanspruchungen den jeweiligen Radbelastungen proportional sind und das Verhältnis der Beanspruchungen an zwei verschiedenen Messtellen des Rades bei statischer und dynamischer Belastung gleich ist. Betrachtungen über das Verhältnis der Beanspruchungen an Radkranz und Speichen eines Rades schlossen sich an.

Die Messungen und theoretischen Betrachtungen wurden durch eine Dauerprüfung der Räder ergänzt. Auf einem dynamischen Räder-Prüfstand wurden Beanspruchungen erzeugt, die den tatsächlichen beim Fahren auf einer Strasse weitgehend angepasst waren. Das Ergebnis der Dauerprüfungen bestätigte zum grossen Teil die Aussagen auf Grund der statischen Prüfungen und zeigte darüber hinaus die schwachen Stellen der Räder auf, die durch statische Untersuchungen nicht erfasst werden konnten.

Schrifttum

- [1] Müller, H.: Beanspruchung von Speichenrädern. Grundlagen der Landtechnik 1951, Heft 1, S. 68/73.
- [2] Kloth, W.: Eiserne Speichenräder. Landtechnik 6 (1953) S. 250/251.

Institut für Landtechnische Grundlagenforschung
der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode
Direktor: Prof. Dr. Ing. W. Kloth

Anschrift des Verfassers: Dipl.-Ing. Hans Müller, (20b) Braunschweig, Forschungsanstalt für Landwirtschaft

STAUBSCHUTZ VON LAGERN

Von Gerhard Hockner

Der beim Betrieb von Maschinen aller Art festzustellende Verschleiss von geschmierten Flächen, also auch von Lagern, besteht in der Hauptsache aus

1. dem reinen Gleitverschleiss, der beim Gleiten der Lagerflächen aufeinander entsteht, und
2. einem zusätzlichen Verschleiss, der durch harte Teilchen, die zwischen die Gleitflächen gelangen, hervorgerufen wird.

Verschleiss der ersteren Art kann durch geeignete Auswahl der Werkstoffe und vor allem richtige Bemessung der aufeinander gleitenden Teile, ferner gute Werkarbeit, ausreichende Schmierung und geeignete Schmiermittelwahl herabgesetzt, bzw. sofern eine Vollschmierung im hydrodynamischen Sinne erreicht wird, vollständig verhindert werden.

Der zusätzliche Verschleiss durch feste Teilchen, die in das Lager eingedrungen sind, erreicht

häufig die Höhe des reinen Gleitverschleisses, oft sogar ein Vielfaches desselben. Eine Herabsetzung dieses zusätzlichen Verschleisses kann auf zwei Arten erfolgen, und zwar

1. durch geeignete Werkstoffpaarung, dies gilt insbesondere für Gleitlager, und
2. durch teilweise oder gar vollständige Verhütung des Eindringens der festen Teilchen zwischen die Gleitflächen durch Abdichtung der Lager gegen die Aussenluft.

Während durch Wahl einer geeigneten Werkstoffpaarung lediglich erreicht wird, dass die schädliche Auswirkung der in das Lager eingedrungenen harten Staubteilchen herabgesetzt wird und damit eine vollständige Unterbindung des zusätzlichen Verschleisses nicht möglich ist, erscheint es wesentlich günstiger, das Eindringen der festen Staubteilchen in das Lager durch geeignete Dichtungen zu verhindern.

Zur Feststellung der Eignung der verschiedenartigen Dichtungen zur Abdichtung gegen staubförmige Fremdkörper wurden mit der im folgenden beschriebenen und in Bild 1 dargestellten Versuchseinrichtung Untersuchungen angestellt. Zwei Wellen, an deren Enden je zwei Versuchslager angebracht werden können, werden über ein Wechselgetriebe durch einen

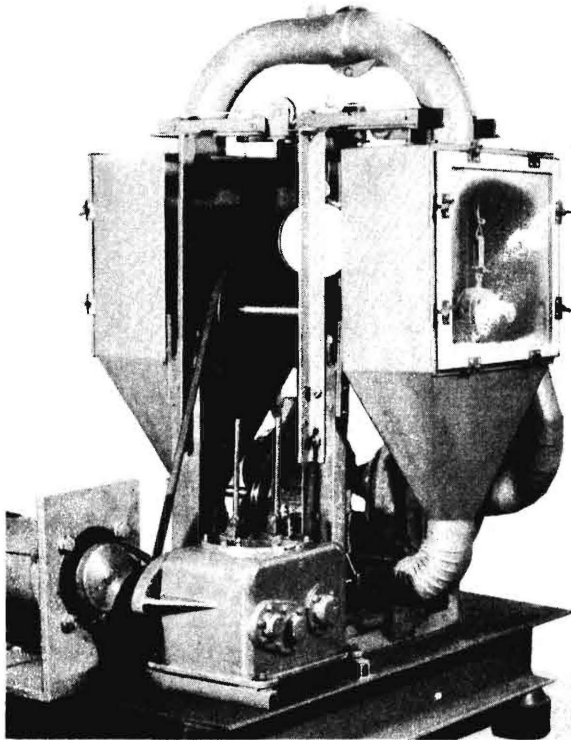


Bild 1. Prüfstand zur Untersuchung von Abdichtungen von Gleit- und Wälzlagern gegen Staub.

Drehstrommotor angetrieben. Die Drehzahlen der Wellen verhalten sich wie 2 : 3; es sind damit Drehzahlen von 250 bis 3000 U/min und bei dem verwendeten Wellendurchmesser von 45 mm Umfangsgeschwindigkeiten von $u = 0,6$ bis 7 m/s einstellbar. Um je 2 Wellenenden mit ihren Versuchslagern ist ein Staubkasten angebracht. Diese Kästen sind durch Rohre mit einem Radialgebläse verbunden, das die Luft mit dem Staub umwälzt. Durch Anbringung von Leitblechen wurde die gleichmässige Beaufschlagung der Lager mit Staub sichergestellt. Die Lagergehäuse werden mit Hilfe eines Spannschlusses und eines Zugkraftmessers statisch belastet. Durch einen Exzenter, der durch ein Schneckengetriebe angetrieben wird, kann auch eine wechselnde Belastung mit einer Frequenz von $70 \frac{1}{s}$ aufgebracht werden.

Als Versuchsstaub (Bild 2) wird gereinigter und geglühter Seesand verwendet, der in einer Kugelmühle gemahlen wurde. Der Versuchsstaub enthält Teilchen der Grösse 1 bis 90μ , also von 0,001 bis 0,09 mm, und zwar sind die Teilchen der einzelnen Kornfraktionen in jeweils gleicher Anzahl vertreten. Die Verwendung von Quarz als Versuchsstaub ist dadurch gerechtfertigt, dass nach Versuchen von

C. E. Summers [1] der in die Luft aufgewirbelte Feldstaub 58 bis 87% SiO_2 enthält. Der Rest besteht aus über 10% organischen Bestandteilen und Feuchtigkeit, die für den Verschleiss nicht in Betracht kommen, sowie aus geringen Anteilen an Eisen- und Aluminiumoxyden sowie Calcium- und Magnesiumcarbonaten. Das spezifische Gewicht von Quarz, das $2,4 \text{ g/cm}^3$ beträgt, stimmt mit dem des bei Landmaschinen in Frage kommenden Feldstaubes weitestgehend überein, das sich zwischen $2,4$ und $2,5 \text{ g/cm}^3$ bewegt. Vorteilhaft ist ferner, dass Quarz Kristalle bildet, die in allen drei Koordinatenrichtungen etwa gleiche Ausdehnung besitzen. Damit wird die mikroskopische Feststellung der Grösse der Teilchen, die in das Lager eingedrungen sind, erleichtert. Die Teilchengrösse wird angegeben als Kantenlänge eines Würfels, der den gleichen Rauminhalt hat wie das Staubteilchen. Bei Quarz ist ferner auf Grund seiner Härte (Mohshärte 7, Rosiwallhärte 120) mit grosser Wahrscheinlichkeit anzunehmen, dass bei der geringen spezifischen Flächenbelastung der Versuchslager die Grösse der in die Lager eingedrungenen Staubteilchen erhalten bleibt. Von den chemischen Lösungsmitteln zur Auflösung von Fett und Lagerabrieb wird SiO_2 nicht angegriffen.

Zu Beginn des Versuches werden jeweils 50 g Staub in die Versuchseinrichtung eingebracht, sodass sich entsprechend dem Luftinhalt der Versuchsein-

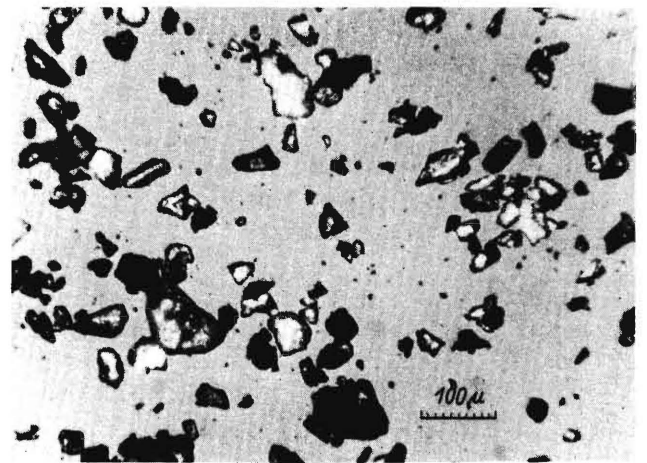


Bild 2. Mikroskopische Aufnahme des Versuchsstaubes (100 \times vergr.)

richtung eine Staubkonzentration von 250 g/m^3 einstellt. Diese Konzentration liegt zwar wesentlich höher als sie etwa in der Umgebung von arbeitenden Maschinen auf dem Feld auftritt, sie musste indessen so gross gewählt werden, um die Versuchsdauer abzukürzen.

Die Auswertung der Versuche wurde folgendermassen vorgenommen: Das gesamte im Lager befindliche Schmiermittel, das mit dem durch die Dichtung oder den Lagerspalt eingedrungenen Staub durchsetzt ist, wird mit Hilfe von Trichloräthylen ausgewaschen

und gelöst. Dann wird eine Trennung des Staubes vom Lösungs- und Schmiermittel durch Sedimentation vorgenommen. Das staubfreie gelöste Schmiermittel wird mehrere Male abgezogen und jeweils Lösungsmittel nachgefüllt, bis eine nicht mehr wägbare Verdünnung des Schmiermittelrückstandes eintritt. Das restliche Lösungsmittel wird in einer Abdampfschale verdampft, und der zurückbleibende Staub kann auf der Analysenwaage gewogen bzw. mikroskopisch auf seine grössenmässige Zusammensetzung hin untersucht werden.

Lösungsmittel und Fett lassen bei dieser Methode keinen wägbaren Rückstand zurück, wie Blindversuche ergeben haben, sodass die Genauigkeit dieser Auswertungsmethode in der Grössenordnung der Ablesegenauigkeit der Analysenwaage mit 0,1 mg liegt. Gleichzeitig erlaubt diese Auswertung, den besonders bei der Untersuchung von Gleitlagern im Schmiermittel mit enthaltenen Lagerabrieb durch Auflösung mit konzentrierter Salpetersäure zu entfernen.

Die in den folgenden Bildern angegebenen Messpunkte sind aus jeweils 2 oder mehr Versuchsergebnissen als arithmetische Mittelwerte errechnet worden.

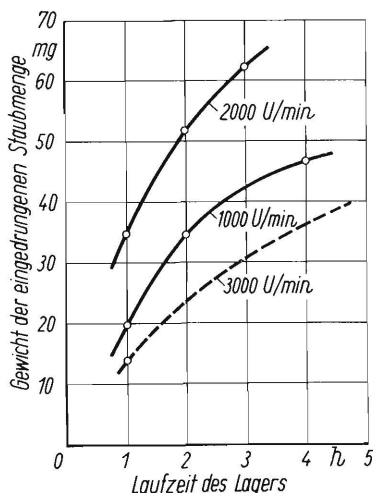


Bild 3. In ein unabgedichtetes Gleitlager mit einem Lagerspiel von 50μ eingedrungene Staubmenge. Staubkonzentration 250 g/m^3 Belastung 20 kg

In Bild 3 ist dargestellt, welche Staubmenge in ein unabgedichtetes Gleitlager mit einem Lagerspiel von 50μ eindringt. Es ergeben sich degressiv ansteigende Kurven. Bei 1000 U/min sind bereits nach 1 Std. Laufzeit 20 mg Staub und nach 4 Std. fast die 2½-fache Menge eingedrungen. Bei 2000 U/min liegen die Werte bei den einzelnen Laufzeiten etwa 1½ mal so hoch wie bei 1000 U/min. Für 3000 U/min konnte eine entsprechende Kurve leider nicht aufgenommen werden, da bereits bei einer 2-stündigen Laufzeit Schmiermittelverluste eintraten, sodass die insgesamt eingedrungene Staubmenge nicht mehr festgestellt werden konnte. Aus der bei 1-stündiger Laufzeit eingedrunenen Staubmenge von 14 mg (durch Versuch

festgestellt) und dem Verlauf der Kurven in den entsprechenden folgenden Bildern kann indessen mit Sicherheit angenommen werden, dass die (gestrichelt eingezeichnete) Kurve für 3000 U/min etwa parallel der für 1000 U/min, und zwar unterhalb dieser, verläuft.

Als Erklärung für den Verlauf dieser Kurven ist folgendes anzunehmen: Aus der Aerodynamik [2] ist bekannt, dass sich die Luftströmung bei angeblasenen, rotierenden Zylindern an diese anlegt (Bild 4),

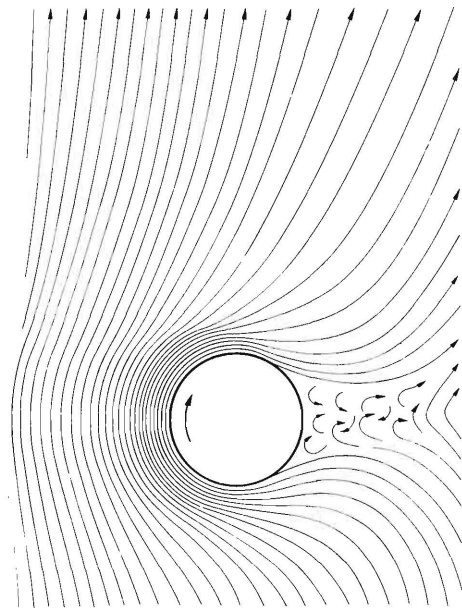


Bild 4. Ablenkung einer Parallelströmung durch eine umlaufende Welle (nach Prandtl-Tietjens [2]).

und zwar umso stärker, je grösser das Verhältnis von Umfangsgeschwindigkeit des Zylinders zur Fortschrittsgeschwindigkeit der Strömung ist. Bei $u/v = \infty$ bildet sich eine Ringströmung aus.

Die in der Luft vorhandenen Staubteilchen werden zunächst von der ringförmigen Strömung mitgenommen. Dadurch unterliegen sie Zentrifugalkräften, die die Tendenz haben, die Teilchen von der Welle wegzuschleudern. Die Grösse der Fliehkraft nimmt zu mit wachsender Grösse der Staubteilchen sowie mit grösserer Ausdehnung und Geschwindigkeit der ringförmigen Strömung, das heisst mit wachsender Drehzahl.

Andererseits wird in unmittelbarer Nähe des Lagers die Luftströmung durch das stillstehende, meistens rauhe Lagergehäuse unter Bildung einer durchwirbelten Grenzschicht abgebremst. Durch die Wirbel gelangen Staubteilchen in den Lagerspalt und damit in das Lager. Es ist anzunehmen, dass auch diese Wirbelbildung in der Grenzschicht mit wachsender Drehzahl zunimmt.

Unter den in der Versuchseinrichtung vorhandenen Anströmgeschwindigkeiten und einem Wellendurchmesser von 45 mm wird, wie Beobachtungen gezeigt haben, bei 3000 U/min der umlaufende Luftring

so ausgedehnt, dass nur noch wenig Staubteilchen Gelegenheit haben, in die Zone der Wirbelbildung hineinzukommen. Dadurch wird auch erklärt, dass die Kurve für 3000 U/min niedriger liegt als die für 1000 U/min.

Es erhebt sich nun die Frage, welche Bedeutung dieser in das Lager eingedrungenen Staubmenge zuzumessen ist. Bild 5 zeigt den Einfluss der Verschleissmittelmenge auf den Lagerverschleiss bei Gleitlagern nach Untersuchungen [3] der Materialprüfungsanstalt Stuttgart. Für diese Versuche wurde Feldspat als Ver-

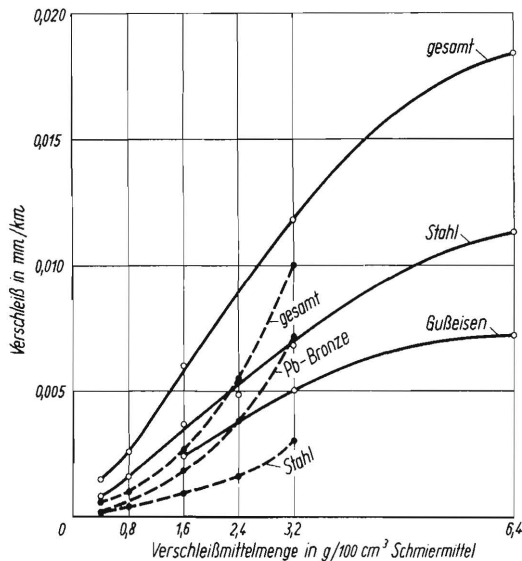


Bild 5. Einfluss der Verschleissmittelmenge auf den Lagerverschleiss (nach Brockstedt [3]).
 Verschleissmittel Feldspat 10 – 20 μ
 mittl. Lagerdruck 15 kg/cm²
 Umfangsgeschwindigkeit 1 m/s
 Verschleissweg 2,0 km
 Lagertemperatur 80° C

schleissmittel verwendet. Eine entsprechende Darstellung für Quarz liegt leider nicht vor, da jedoch nach derselben Arbeit die Verschleisszahl von Quarz 5 bis 6mal höher liegt als diejenige von Feldspat, so dürfte auch der Gesamtverschleiss bei Verwendung von Quarz 5 bis 6mal höher sein, als auf diesem Bild dargestellt ist. Die bei diesem Versuch verwendeten Wellen- und Lagerwerkstoffe hatten folgende Brinellhärten: Stahl 370 kg/mm², Gusseisen 195 kg/mm² und die 25%-ige Bleibronze 30 kg/mm².

Der Verlauf der Kurven zeigt den grossen Einfluss der Menge des dem Schmiermittel zugesetzten Verschleissmittels auf die Grösse des Lagerverschleisses. Es ergibt sich, dass mit zunehmender Verschleissmittelkonzentration der Verschleiss der Probe und Gegenprobe stark zunimmt, und zwar ergibt sich beim Lauf von Stahl gegen Bleibronze ein wesentlich schneller Anstieg des Verschleisses als bei Gusseisen als Gegenwerkstoff. Im Gegensatz zu den Versuchen mit Gusseisen wird beim Lauf gegen Bleibronze die Stahlseite weniger angegriffen als der Gegenwerkstoff. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, dass das Gusseisen mit seinen weichen

Graphitadern bessere Einbettungsmöglichkeiten für die Staubteilchen bietet, als der härtere Stahl, sodass dieser von den vorstehenden harten und scharfkantigen Verschleissmittelteilchen abgerieben oder sogar zerspannt wird. Das Gusseisen wird seinerseits durch die in ihm haftenden harten Teilchen geschützt. Die Bleibronze scheint indessen so weich zu sein, dass sie den eingedrückten Teilchen nicht genügend Halt bietet und diese Stücke aus der Bleibronze mit herausreissen.

Nach den mit unserer Versuchseinrichtung (Bild 1) erzielten Ergebnissen (Bild 3) würde sich bei einem unabgedichteten Gleitlager nach 10 Stunden Laufzeit bei 2000 U/min eine Verschleissmittelmenge von 1 g/100 cm³ Schmiermittel ergeben. Das bedeutet bei Verwendung von Quarz als Verschleissmittel nach 10 weiteren Stunden Laufzeit in staubfreier Luft entsprechend einem Laufweg von 168 km und einer spezifischen Lagerbelastung von 15 kg/cm² einen Gesamtverschleiss von 3 mm.

Bild 6 zeigt Anzahl und Grösse der in ein unabgedichtetes Gleitlager mit einem Lagerspiel von ebenfalls 50 μ eingedrungenen Staubteilchen. Um Schmiermittelverluste zu vermeiden, wurde bei den einzelnen Drehzahlen jeweils nur eine Laufzeit von 1 Std. gewählt. Auf der linken Bildhälfte sind die Staubteilchen unter 10 μ Grösse dargestellt. Bei 10 mm Ein-

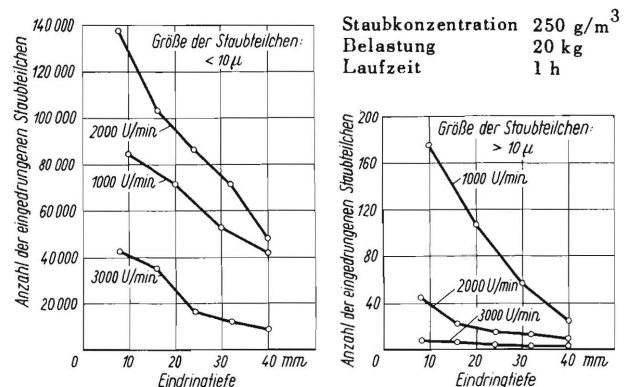


Bild 6. Anzahl und Grösse der in ein unabgedichtetes Gleitlager mit einem Lagerspiel von 50 μ eingedrungenen Staubteilchen.
 Staubkonzentration 250 g/m³
 Belastung 20 kg
 Laufzeit 1 h

dringtiefe vom Lagerend wurden davon durch mikroskopische Auszählung auf einer Ringfläche des Lagerespaltens von 1 mm Breite bei 1000 U/min über 80 000 Teilchen, bei 2000 U/min 130 000 und bei 3000 U/min 40 000 Teilchen festgestellt. Daraus ist ersichtlich, dass unter den in der Versuchseinrichtung herrschenden Bedingungen die Teilchen < 10 μ bei 2000 U/min der durchwirbelten Strömung am Lagerende weitestgehend folgen, während sich bei höheren Drehzahlen der Einfluss der Fliehkräfte stärker bemerkbar macht. Dagegen wirken sich die Fliehkräfte bei Staubteilchen > 10 μ schon bei kleineren Drehzahlen aus, sodass die Anzahl der eingedrungenen Teilchen mit steigender Drehzahl der Welle abnimmt. Nach der Lagermitte zu nimmt also die Anzahl

der eingedrungenen Teilchen bei Fettschmierung stetig ab, sodass nach der Mitte zu (Gesamtlagerbreite 80 mm) auch mit geringerem Verschleiss zu rechnen ist.

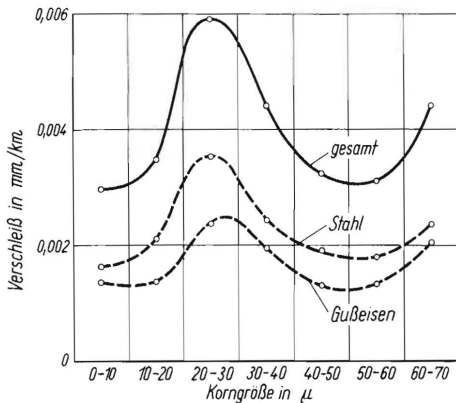


Bild 7. Einfluss der Korngrösse des Verschleissmittels auf den Lagerverschleiss (nach Brockstedt [3]).

Verschleissmittel: Feldspat 1,6 g auf 100 cm³ Öl
mittl. Lagerdruck 15 kg/cm²
Umfangsgeschwindigkeit 1 m/s
Verschleissweg 2,0 km
Lagertemperatur 80° C.

Diese Analyse der Grösse der eingedrungenen Staubeilchen gewinnt an Bedeutung, wenn man den Einfluss der Korngrösse des Verschleissmittels auf den Verschleiss betrachtet (Bild 7). Diese Kurven sind aufgenommen beim Lauf von Stahl gegen Guss-eisen mit der jeweils gleichen Gewichtsmenge Feldspat als Verschleissmittel. Über die absolute Höhe der Kurven bei Quarz gilt das gleiche wie das zu Bild 5 Gesagte. Es interessiert in diesem Zusammen-hang nur der Kurvenverlauf des Gesamtverschleisses, der bei Verwendung von Quarz entsprechend ist. Es zeigt sich, dass der Verschleiss mit wachsender Korngrösse einem Höchstwert bei einer Korngrösse von 20 bis 30 µ zustrebt, um dann wieder abzusinken. Der Gesamtverschleiss ist bei einer Korngrösse von 20 bis 30 µ fast doppelt so gross wie bei 0 bis 10 µ. Dazu muss ergänzend gesagt werden, dass bei Vollschmierung nur verhältnismässig wenige Teilchen unter 10 µ zum Angriff kommen, da weitere Versuche gezeigt haben, dass die Schmierfilmstärke je nach

der Zähigkeit des Schmiermittels und der spezifischen Lagerbelastung 4 bis 8 µ beträgt. Es ist einleuchtend, dass alle Teilchen, deren Ausdehnung geringer ist als die Schmierfilmstärke, einen Verschleiss nicht hervorrufen können. Die Kurve fällt also bei Erreichung der Schmierfilmstärke plötzlich auf Null ab.

Die bisher durchgeführten Dichtungsuntersuchungen geben einen ersten Einblick über einige im Landmaschinenbau verwendete Dichtungen. Zur Klärung der grundsätzlichen Wirkungsweise wurden teilweise aussergewöhnliche Betriebszustände (z.B. Mangel-schmierung) gewählt, sodass die erhaltenen Werte Grenzwerte der eingedrungenen Staubmenge und Teilchengrösse nach der ungünstigen Seite hin darstellen.

Alle Untersuchungen wurden bei statischer Belastung durchgeführt. Die Wellenbuchsen waren aus St 60 gefertigt, die Oberflächen geschliffen mit einer maximalen Riefentiefe von 6 µ. Von den Dichtungen mit zylindrischer Dichtfläche wurden Filzringe mit trapezförmigem Querschnitt und Manschettendichtungen mit Gummimanschetten und von den Labyrinthdichtungen wurden radiale Labyrinth mit einer halben und 2 Windungen untersucht (Bild 8). Der Dichtungsspalt betrug bei letzteren 0,25 mm; der Aussendurchmesser des Dichtungsspalt war 60 mm gross (1000 U/min entsprechend 3,1 m/s am Dichtungsspalt).

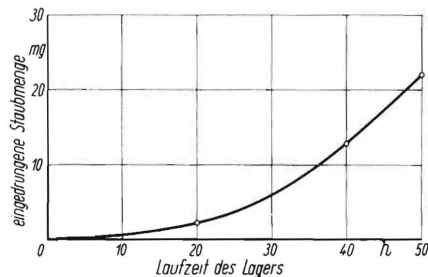


Bild 9. Abhängigkeit der eingedrungenen Staubmenge von der Laufzeit bei einem durch Filzringe abgedichteten Gleitlager mit 50 µ Lagerspiel.

Staubkonzentration 250 g/m³
stat. Belastung 2 bzw. 20 kg
Drehzahl 2000 U/min
Umfangsgeschwindigkeit 4,18 m/s

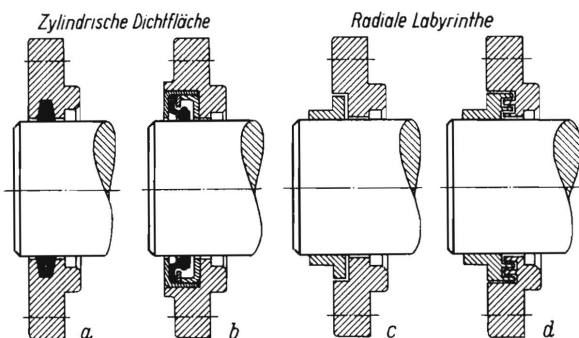


Bild 8. Die untersuchten Lagerdichtungen. (Das Lager befindet sich jeweils rechts von der Dichtung).

- a) Filzringdichtung
- b) Manschettendichtung
- c) Labyrinthdichtungen mit 1/2 Windung
- d) „ „ „ 2 Windungen

Aus Bild 9 ist die starke Abnützung ersichtlich, der die Filzringe unterworfen sind und die sich in der Zunahme der eingedrungenen Staubmenge äussert. Während nach 20-stündiger Laufzeit bei 2000 U/min entsprechend 4,18 m/s*) (höchstzulässige Umfangsgeschwindigkeit für Filzringe) 2 mg Staub eingedrungen sind, sind es nach der 2 1/2-fachen Laufzeit schon 22 mg, also die 11-fache Menge. Diese Kurve steigt weiter an, da bei einem alten verharzten Filzring (der normalerweise unbrauchbar ist und ausgetauscht werden müsste) während 50-stündiger Laufzeit annähernd 100 mg Staub eingedrungen sind.

Die Versuche, die diesem Bild zugrundeliegen, wurden bei statischen Belastungen von 2 und auch

*) Bei diesem Versuch betrug der Wellendurchmesser 40 mm.

von 20 kg durchgeführt, ohne dass sich darstellbare Änderungen der Kurve ergeben hätten. Die folgenden Versuche konnten daher bei der geringen statischen Belastung von 2,5 kg durchgeführt werden. Die Laufzeit der Dichtungen beträgt jeweils 50 Stunden bei den einzelnen Drehzahlen, zur Schmierung wurden jeweils 15 g Fett verwendet.

Die folgenden Bilder gliedern sich in zwei Reihen, und zwar ist einmal die jeweils eingedrungene Staubmenge dargestellt und zum anderen die Grösse der eingedrungenen Teilchen in % der Gesamtzahl der eingedrungenen Staubteilchen.

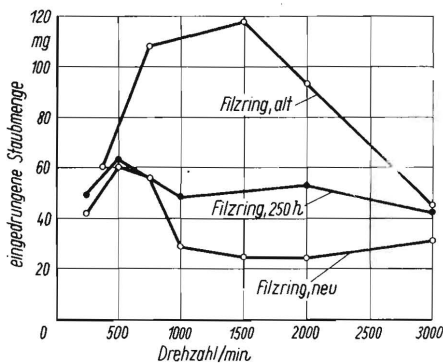


Bild 10. Eingedrungene Staubmenge bei Abdichtung eines Wälzlagers durch Filzringe.
Staubkonzentration 250 g/m³
stat. Belastung 2,5 kg
Laufzeit 50 h
Schmierung 15 g Fett

Die Kurven des Bildes 10 sind mit einer Streuung von ± 9 mg behaftet. Es ist selbstverständlich, dass die Kurve für den alten Filzring höher liegt als die für den wenig gebrauchten oder gar neuen Filzring. Besonders gross ist aber der Unterschied bei den mittleren Drehzahlen. Der starke Anstieg bei dem alten Filzring ist auf die Zunahme der Wirbelbildung am Dichtungsspalt zurückzuführen, während später die Fliehkräfte überwiegen. Bei den engeren Dichtungsspalten der neuen und wenig gebrauchten Dichtung tritt der Einfluss der Durchwirbelung offenbar schon etwas früher zurück. Der leichte Anstieg bei 3000 U/min entsprechend 7,3 m/s ist auf den grösseren Verschleiss der neuen Filzringe zurückzuführen.

Nun könnte man auf Grund dieses Bildes geneigt sein zu sagen, dass der Unterschied der Dichtwirkung eines alten und eines neuen Filzringes bei niedrigen und hohen Drehzahlen nicht sehr gross sei. Bild 11 zeigt indessen, dass die Anzahl der eingedrungenen Teilchen der einzelnen Kornfraktionen bei dem alten und dem neuen Filzring sehr verschieden ist. Man kann auf Grund dieser Kurve sagen, dass pro Mengeneinheit bei dem alten Filzring etwa viermal so viel Teilchen > 10 μ eindringen als bei dem neuen Filzring. In dem Abfall der Kurven spiegelt sich der Zuwachs der Fliehkräfte wieder. Die maximale Grösse der eingedrungenen Teilchen beträgt bei dem alten Filzring 45 μ und bei dem neuen Filzring 32 μ.

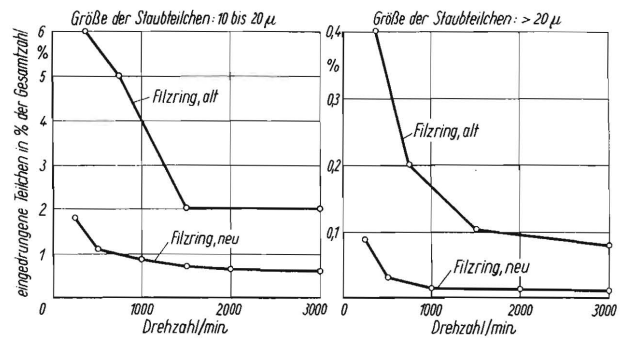


Bild 11. Grösse der eingedrungenen Staubteilchen bei Abdichtung eines Wälzlagers durch Filzringe.
(Versuchsbedingungen wie in Bild 10).

In Bild 12 sind die Ergebnisse der Untersuchungen von Manschettendichtungen mit Bunamanschette dargestellt. Diese Kurve ist mit einer Streuung von maximal ± 5 mg behaftet. Der leichte Anstieg der Kurve ist darauf zurückzuführen, dass bei höheren Drehzahlen die Fettschmierung nicht ausreichend war, sodass bei dem verwendeten Wellenmaterial (St 60) leichte Riefenbildung eintrat. Über die Menge des eingedrungenen Staubes ist zu sagen, dass diese Manschettendichtungen für den Zweck konstruiert wurden, Ölverluste zu verhindern. Dementsprechend wurde auch bei der vorliegenden Untersuchung die Dichtungslippe nach innen gerichtet (Bild 8) und nicht auf die mit Staub durchsetzte Luft zu. Es ist also insbesondere bei einer Riefenbildung in der Welle mit einer Rührwirkung in der Dichtfläche zu rechnen. Da der Anpressdruck der Manschette durch die Ringfeder praktisch konstant bleibt, ist der Dichtungsspalt theoretisch gleich Null und wird in der Praxis durch die Rauigkeit der Wellenoberfläche bestimmt. Damit bleibt trotz der für die Abdichtung

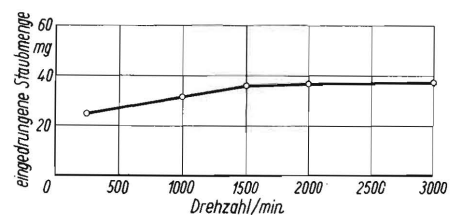


Bild 12. Eingedrungene Staubmenge bei Abdichtung eines Wälzlagers durch Manschettendichtungen mit Bunamanschette.
(Versuchsbedingungen wie in Bild 10).

gegen Staub ungünstigen Einbaurichtung der Dichtungslippe die eingedrungene Staubmenge in zulässigen Grenzen. Ausserdem ergibt sich dadurch zwangsläufig, dass bei diesen Dichtungen nur sehr kleine Teilchen in die Lager eindringen, und zwar zeigt die mikroskopische Untersuchung, dass die maximale Teilchengrösse bei 375 U/min 9 μ beträgt und bis 3000 U/min auf 5 μ absinkt. Diese Teilchengrössen sind also so klein, dass sie im Rahmen des hier verwendeten Schemas zur Darstellung der Teilchengrösse nicht mehr darstellbar sind. Bild 13 zeigt aber im Vergleich mit Bild 2 den grossen Unterschied in der

Teilchengröße zwischen dem in das Lager mit Manschettendichtung eingedrungenen Staub und dem Versuchstaub. Dabei ist noch zu berücksichtigen, dass es bei Bild 13 nicht ganz gelungen ist, die kleinen Teilchen einzeln zu fotografieren, sondern dass Zusammenballungen vorhanden sind. Letztere sind jedoch unter dem Mikroskop bei Verstellung der Tiefenschärfe als solche erkennbar.

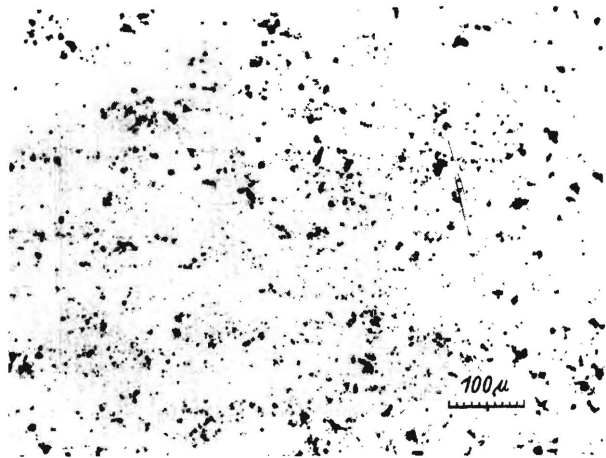


Bild 13. Mikroskopische Aufnahme des in ein Lager mit Manschettendichtung eingedrungenen Staubes (100× vergr.).

Die beiden nächsten Bilder stellen die Ergebnisse der Untersuchungen der Labyrinthdichtungen dar. Diese Dichtungen wurden entgegen ihrer üblichen Verwendung nicht mit Fett gefüllt, um die wirksamen Kräfte besser erkennen zu können. Der Kurvenverlauf in Bild 14 zeigt, dass bei diesen Dichtungen in den

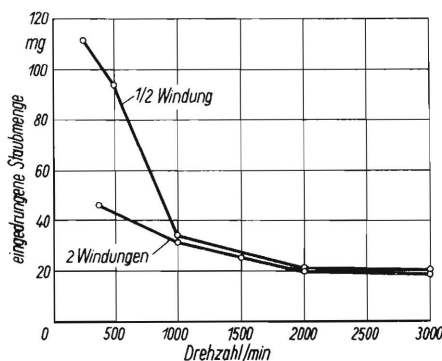


Bild 14. Eindringene Staubmenge bei Abdichtung eines Wälzlagers durch fettfreie Labyrinth. (Versuchsbedingungen wie in Bild 10).

radialen Dichtungsspalten mit wachsender Drehzahl steigende Fliehkräfte auftreten, die das Eindringen des Staubes verhindern. Die Kurven nähern sich sehr gut dem Verlauf der theoretischen Kurve, die proportional $1/\omega^2$ bzw. $1/n^2$ verläuft. Ein bemerkenswerter Unterschied in der eingedrungenen Staubmenge be-

steht zwischen den beiden Dichtungen nur unterhalb 1000 U/min.

Aus Bild 15 ist indessen ersichtlich, dass auch bei höheren Drehzahlen bei der Labyrinthdichtung mit 2 Windungen weniger grössere Teilchen eindringen als bei der Labyrinthdichtung mit einer halben Windung. So dringen z.B. bei 2 Windungen über 2000 U/min keine Teilchen $> 20 \mu$ mehr ein. Die maximale Größe der eingedrungenen Teilchen betrug 38μ bei einer halben Windung und 28μ bei 2 Windungen.

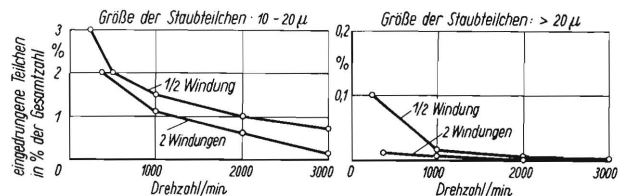


Bild 15. Grösse der eingedrungenen Staubteilchen bei Abdichtung eines Wälzlagers durch fettfreie Labyrinth. (Versuchsbedingungen wie in Bild 10).

Zusammenfassend kann über die bisher durchgeführten Untersuchungen folgendes festgestellt werden:

Filzringe zeigen besonders bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten ($> 4 \text{ m/s}$) starken Verschleiss und altern somit schnell. Im gealterten Zustand dringen verhältnismässig grosse Mengen und grosse Teilchen in das Lager ein.

Bei Manschettendichtungen wird die Abnutzung der Manschette durch die Ringfeder ausgeglichen und der Dichtungsspalt klein gehalten. Damit dringen nur kleine Teilchen ein, die zwar die Schmierfähigkeit des Schmiermittels herabsetzen, aber je nach Schmierfilmdicke einen nennenswerten Verschleiss nicht hervorrufen. Bei Umfangsgeschwindigkeiten über 4 m/s ist eine gehärtete Welle notwendig.

Während diese beiden Dichtungen zum Teil beachtliche Drehmomente verbrauchen, benötigt die mit Spiel laufende Labyrinthdichtung kein Drehmoment und zeigt somit auch bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten keine Erwärmung und Abnutzung. Bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten dichtet sie sowohl in Bezug auf die Menge als auch auf die Teilchengröße gut ab.

Schrifttum

- [1] C. E. Summers: The Physical Characteristics of Road and of Field Dust. J.Soc.Autom.Engr., Febr. 1925, Pg. 243.
- [2] Prandtl-Tietjens: Hydro- und Aeromechanik. 2.Bd. S. 96/98 u. Tafel 9. Berlin 1931.
- [3] H.-C. Brockstedt: Verschleiss bei verunreinigten Schmiermitteln. Diss. T.H. Stuttgart 1942.