

ng ohne Genehmigung
st gestattet
mpiare nur durch
Übersetzer

Übersetzung aus der japanischen Zeitschrift

"Nainen Kikan" (Die Brennkraftmaschine)

ustav Krauf
armbronn
m 16

Band 5, Heft Nr.53, November 1966, Seite 50 - 56

Die Wälzlager für hohe Drehzahlen in den
Ladegebläsen von Brennkraftmaschinen

von T.Noto

Firma Toyo-Lagerfabrikation AG.

1. Vorwort

Die wichtigsten Lager in einem Zweitaktmotor oder einem Viertaktmotor sind 1) die Hauptlager, 2) die Pleuellzapfenlager und 3) die Pleuellbolzenlager, außer diesen sind noch die Lager in den verschiedenen zur Ausrüstung des Motors gehörenden Hilfsmaschinen zu nennen. Bei der Planung eines Motors werden die Lager in einer großen Mannigfaltigkeit, und zwar sowohl Wälzlager, wie auch Gleitlager verwendet, wobei wir die allgemeine Tendenz feststellen können, daß bei den Reihenmotoren Gleitlager und bei den Sternmotoren Wälzlager verwendet werden. Als Besonderheit im Falle der Gleitlager ist die Eigenschaft zu nennen, daß wenn die Schmierung vollständig in Ordnung ist, die Funktion des Lagers keinerlei Beeinträchtigung ausgesetzt ist, während jedoch andererseits in den Fällen, wo ein Lager häufig unter mangelnder Schmierung zu leiden hat, oder wo es stark belastet wird, im allgemeinen das Wälzlager vorgezogen wird.

Heute, wo es schon ganz allgemein üblich geworden ist, die Leistung der Motoren durch Ladegebläse zu steigern, besteht eine immer größer werdende Nachfrage nach solchen Ladegebläsen, angefangen von den Motoren für kleine Fischereiboote bis hinauf zu den ganz großen Schiffsdieselmotoren

oder auch für die Motoren der Lokomotiven und der Triebwagen unserer Eisenbahn.

In der vorliegenden Arbeit soll nun nicht zuletzt auch mit Rücksicht auf den uns zur Verfügung stehenden Raum (in der Zeitschrift) auf die Lager des Motors nicht eingegangen werden und die Betrachtung dieser Lager soll einer späteren Gelegenheit vorbehalten werden; statt dessen soll von den zur Ausrüstung des Motors gehörenden Hilfsmaschinen als besonders wichtig das Ladegebläse herausgegriffen werden, dessen Lager wegen der hohen auftretenden Drehzahlen besonderen Beanspruchungen gewachsen sein muß.

Da die Leistung eines Motors proportional zur Dichte der angesaugten Luft ist, so würde bei einem Flugmotor in je höhere Luftschichten das Flugzeug aufsteigt, die Leistung naturgemäß absinken; um dies zu verhindern, hat man diese Flugmotoren mit Ladegebläsen ausgerüstet. Jedoch auch beim Verkehr auf dem Boden nimmt der Volumenwirkungsgrad eines Motors mit steigender Geschwindigkeit ab, so daß man auch hier Ladegebläse vorsieht und durch diese das spezifische Gewicht der dem Motor zugeführten Luft steigert; wenn dem Motor große Luftmengen zugeführt werden, dann steigt dadurch seine mittlere effektive Leistung, so daß man auf diese Weise ein verhältnismäßig leicht zu handhabendes Mittel besitzt, um die Leistung eines Motors zu erhöhen¹⁾.

Die Geschichte der Ladegebläse ist schon alt, bereits im Jahre 1917 hat als erste die schwedische Firma De Laval Co. eine kleine schnelllaufende Turbine gebaut, und schon im gleichen Jahre haben die amerikanische Firma GE und die

französische Firma Rateau nach einer Reihe von Versuchen Booster für Flugmotoren, d.h. also Turboladegebläse gebaut und diese zum Zwecke der Leistungssteigerung der Motoren praktisch angewandt²⁾.

Diese Ladegebläse wurden von allem Anfang an mit hohen Drehzahlen betrieben und werden es bis zum heutigen Tage. Wenn man nun die rotierenden Teile des Ladegebläses für hohe Geschwindigkeiten konstruiert, dann bedeutet dies eine Erhöhung des Wirkungsgrades, denn die Abmessungen der Maschine werden ja kleiner und dadurch wird die Wirtschaftlichkeit größer, und diese Entwicklung ist natürlich noch lange nicht abgeschlossen.

Je höher die Drehzahlen bei einem Wälzlager werden, umso schwieriger und umso problematischer wird die Schmierung, dies hängt vorallem mit dem Umstand zusammen, den man als "Fressen" bezeichnet, es ist jedoch nicht die Schmierung allein, sondern auch von der Kühlung des Lagers verspricht man sich einen großen Erfolg, wir wollen deshalb mit bezug auf die Maschine als ganzes von dem "Schmiersystem" sprechen. Es handelt sich hier also um eine Planung, die nicht nur von der Seite des Lagerherstellers außerordentlich wichtig ist, sondern deren Planung durch eine enge Zusammenarbeit zwischen dem Lagerhersteller und dem Verbraucher durchgeführt werden muß; dafür gibt es auch schon in der Vergangenheit eine große Zahl praktischer Beispiele.

Für die Wälzlager, welche heute für hohe Drehzahlen praktisch verwendet werden, ist der dn -Wert (d : Innendurchmesser des Lagers in mm, n : Drehzahl in U/Min.) von entscheidender Wichtigkeit. Dieser Wert wird durch eine

dimensionslose Zahl ausgedrückt und beträgt im allgemeinen ungefähr 10^6 oder weniger; es sind jedoch auch Versuche durchgeführt worden für diejenigen Fälle, wo der dn -Wert höher war als 10^6 (3,4,5,6,7,8).

In der vorliegenden Arbeit soll in der Hauptsache das Problem der Schmierung behandelt werden und dabei soll besonders auf das Beispiel des Ladegebläses eingegangen werden.

2. Die Schwierigkeiten bei einem Wälzlager für hohe Drehzahlen

Ob es sich nun um Wälzlager handelt, oder ob es sich um Gleitlager handelt, wenn wir die Drehzahl nach und nach immer höher werden lassen, dann entsteht in dem Lager bei derjenigen Drehzahl, bei welcher ein mechanischer Bruch des Lagers gerade noch nicht eintritt, das sogenannte "Fressen". Diesen Vorgang können wir etwa so erklären, daß die gewöhnliche Reibungswärme ganz allmählich zunimmt und da auf der anderen Seite die Kühlung mit dieser Zunahme der Reibungswärme nicht in gleichem Maße Schritt halten kann, so steigt die Temperatur des Lagers mehr und mehr an, bis schließlich der Ölfilm abreißt und das Festfressen seinen Lauf nimmt. Selbstverständlich ist in einem Lager ein übermäßiges Ansteigen der Temperatur höchst unerwünscht, die Temperatur des Lagers beruht jedoch auf dem Wärmegleichgewicht, das sich aus der im Lager erzeugten Wärme einerseits und aus der frei nach außen abgestrahlten Wärme andererseits ergibt, und wenn wir uns so nur eine einzige mittlere Temperatur vorstellen, dann ist im Zusammenhang mit dem Problem des Fressens der Kernpunkt der Lager für hohe Drehzahlen ausschließlich von dem Mittelwertbegriff der Lagertemperatur her außerordentlich schwer zu erfassen.

Wir wollen deshalb versuchen, den Vorgang der Wärmeerzeugung in einem Lager in der Beleuchtung zu betrachten, welche er von einigen Forschungsergebnissen her erfährt.

2.1 Der Berührungszustand im Innern eines Lagers und der Temperaturanstieg

Der Zustand der Berührung zwischen den einzelnen Hauptteilen im Innern eines Lagers ist zwar je nach der Lagerform und Art verschieden, wir wollen deshalb über die nachstehenden repräsentativen Beispiele im einzelnen berichten. Diese Zusammenhänge gehen aus den beiden nachstehend aufgeführten Tafeln 1 und 2 hervor.

- a) Die Kugellager mit tiefer Laufnut (Lager mit im Außenring geführtem gepreßtem Käfig)
- b) Zylinderrollenlager (NU-Außenringführung).

Wenn wir uns diese beiden Beispiele näher ansehen, dann stellen wir fest, daß zwischen dem Käfig und den umlaufenden Körpern durchweg eine Gleitberührung stattfindet, wenn wir deshalb von der Tatsache ausgehen, daß die gleitende Reibung größer ist als die rollende Reibung, dann können wir diese Teile als stärkere Wärmeerzeugungsquellen betrachten, als wir sie bei Teilen mit rollender Reibung vor uns haben. Forschungsarbeiten, die sich mit diesem Problem beschäftigen, gibt es nur ganz wenige, wir haben die Ergebnisse solcher Arbeiten in den Abb.1 und 2 dargestellt^{9,10}).

Die Abb.1 zeigt für ein Zylinderrollenlager von 35 mm Ellendurchmesser mit einem außenringseitigen Führungsflansch die Ergebnisse, die wir bei der Messung der Temperatur der Umlaufkörper, sowie des Innenringes und des Außenringes

Tafel 1

Die Berührung in den Tiefnut-Kugellagern

Art	Innenring	Außenring	Kugel	Käfig
Kugel	Wälzberührung (Gleitberührung)	Wälzberührung (Gleitberührung)	-	Gleitberührung
Käfig	-	Gleitberührung	Gleitberührung	-

(Gleitberührung) bedeutet, daß bis zu einem gewissen Grade eine Gleitberührung stattfindet.

Tafel 2

Die Berührung in den Zylinderrollenlagern

Art	Innenring	Außenring		Rollen	Käfig	
		Umlaufbahn	Flansch		Fenster-zylin-derflä-che	Fenster-stirn-fläch
Rolle	rollende Berührung	rollende Berührung	gleiten- de Berüh- rung	-	glei- tende Berührg.	glei- tende Berüh
Käfig		gleitende Berührung*		glei- tende Berührg.		

* Gemeint ist hier die innere Umfangsfläche des Außenringflansches

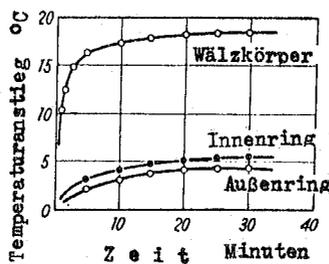


Abb. 1 Der Temperaturanstieg im Innenring, im Außenring und in den Wälzkörpern eines Rollenlagers

Man hatte hier einen gepreßten Käfig und verwendete das Spindelöl NF 207, Drehzahl 3000 U/Min., Belastung 4,2 kg (Masuda, Fukatani 1953).

erhalten haben; aus dieser Abbildung geht deutlich hervor, daß die Temperatur der umlaufenden Körper höher ist als diejenige des Innenringes und die Temperatur des Innenringes wiederum höher ist als diejenige des Außenringes. Zudem ist zu erwarten, daß die Temperatur der umlaufenden Körper sehr viel höher ist als diejenige des Innenringes und des Außenringes, wobei auch im voraus zu vermuten ist, daß die Temperatur des die umlaufenden Körper führenden Käfigs höher ist als diejenige des Innenringes oder des Außenringes.

Wir haben nun das Kugellager 6204 verwendet und es mit einer Drehzahl von 4000 U/Min. und einer Belastung von 7,0 kg betrieben, als Schmiermittel haben wir dabei Spindelöl, Mobilöl und Schmierfett verwendet; für diese drei Fettarten haben wir jeweils die Temperaturen des Innenringes, des Außenringes und des Käfigs gemessen und diese Temperaturunterschiede in der Abb.2 aufgezeichnet. In dieser Abbildung haben wir die jeweiligen bei Spindelöl und bei Schmierfett gemessenen Temperaturen den bei Mobilöl gemessenen Temperaturen gegenübergestellt.

Aus diesen beiden Beispielen geht deutlich hervor, daß von den vier Hauptteilen, aus denen ein Wälzlager aufgebaut ist, die Temperatur im Außenring, von dem aus die Wärme über das Gehäuse frei in die Atmosphäre abgestrahlt wird, am niedrigsten ist, und daß dann der Innenring kommt, und dann der Käfig und die Umlaufkörper, in denen sie am höchsten ist. Die Temperaturdifferenz zwischen dem Innenring und dem Außenring soll, wie berichtet wird, im allgemeinen nicht mehr als 10° betragen. Dies ist auch durch die Forschungen von Sasaki¹¹⁾ bestätigt worden.

Somit sind also die Gleitberührungsstellen zwischen den umlaufenden Körpern und dem Käfig, d.h. also die Gleitberührungsstellen zwischen den Käfigtaschen und den umlaufenden Körpern diejenigen Stellen, an welchen die größte Wärmemenge erzeugt wird; nun ist es zwar von hier aus gesehen ganz klar, daß es überaus wichtig ist, an eben diese Stellen ein Schmiermittel gelangen zu lassen, und soweit es sich um die mittleren und die niedrigen Drehzahlen handelt, so hat man zwar die Absicht, vom konstruktiven Gesichtspunkt des Lagers aus zwangsläufig für die Schmierung zu sorgen, das Einbringen des Schmiermittels an die genannten Stellen ist jedoch mit großen Schwierigkeiten verbunden¹²⁾ und deshalb muß dieser Punkt ganz besonders beachtet werden.

Zur Erklärung der Abb.3 ist folgendes zu sagen: Das zu prüfende Lager war das Kugellager 6207 (35 x 72 x 17 mm), an von der Mittellinie des Außenringes etwas entfernten Stellen waren kleine Löcher gebohrt, diese standen mit Manometern in Verbindung. Wenn sich das Lager drehte, dann drehte sich auch das sich im Lager befindende aus Schmieröl und Luft zusammengesetzte Gemisch, und deshalb wurde durch die Einwirkung der Fliehkraft ein dynamischer Druck erzeugt, und dieser dynamische Druck wird durch die Manometer gemessen. Wie man aus dieser Abbildung ersieht, haben wir bei den käfiglosen Lagern (sämtliche Kugellager) im Bereich der verhältnismäßig niedrigen Drehzahlen, da der hinderliche Käfig hier fehlt, ein leichtes Eindringen des Schmieröles und demzufolge ein ganz erhebliches Ansteigen des Druckes, von einer bestimmten Drehzahl an fällt der Druck jedoch sehr schnell ab, woraus man sieht, daß das

Schmieröl Schwierigkeiten hat in das Lager einzudringen. Bei einem Lager mit gestanztem Käfig, das ja in seiner Konstruktion dem im vorhergehenden besprochenen Lager ganz ähnlich ist, beobachten wir zwar auch eine ganz und gar ähnliche Charakteristik, wenn wir uns jedoch überlegen, wie schwierig es ist, daß der Käfig für irgend einen Zweck passend ist, dann haben wir dafür eine Bestätigung, daß auch der Luftdruck niedriger ist als bei dem vorher besprochenen Lager. Da wir, bei einem Lager mit gezogenem Käfig einen konstruktiv ganz anderen Käfig haben, so ist nicht nur die Tendenz der beiden Arten gänzlich verschieden sondern wir haben bei dem Lager mit gezogenem Käfig hinsichtlich einer Erhöhung der Drehzahl eine wesentlich bessere Tendenz. Es ist anzunehmen, daß dies daher rührt, daß die Seitenfläche des Käfigs eine ebene Fläche darstellt und daß deshalb beim Einströmen des Öles keinerlei Einwirkung von Wirbelströmungen, wie sie etwa durch Unebenheiten hervorgerufen werden, vorhanden ist, sondern daß dieses Einströmen des Öles ganz leicht von statten geht; demzufolge stellt also dieses Verfahren eine Methode zur Beurteilung der Charakteristik im Hinblick auf die Schmierung dar, und sie wird deshalb für die Untersuchung der Schmier-eigenschaften und der Schmierleistung angewandt.

Dadurch, daß die Dicke des Ölfilmes auf der Gleitfläche proportional zu dem Ausdruck $\frac{ZN}{p}$ ist (hierbei bedeuten Z: die Viskosität des Schmieröles, N: die Geschwindigkeit und p: die auf die Flächeneinheit bezogene Last), muß man ein Schmieröl berücksichtigen, bei welchem das Gesetz der Schmierung derart ist, daß selbst bei hohen Drehzahlen der Wert von $\frac{ZN}{p}$ nicht kleiner wird und auch unterhalb der

Grenzschmierung nicht absinkt. Somit haben wir also bei der Viskosität mit steigender Temperatur ein hyperbolisches Ab-sinken und die Geschwindigkeit nimmt linear zu.

Somit besteht also das letzte Ziel darin, den der Schmierung bedürftigen Stellen auf irgend eine geschickte Weise Öl zuzuführen und außerdem eine Kühlwirkung zu erreichen, dies ist auch die zentrale Aufgabe der gesamten Schmier-problematik.

2.2 Die Schmierwirkung

Für das Schmieren gibt es alle möglichen verschiedenen Methoden, bei den Lagern für hohe Drehzahlen jedoch werden in der Hauptsache die Ölnebelschmierung oder die Spritzschmierung angewandt, seltener findet man die Scheibenschmierung.

Die Ölnebelschmierung wird in der Hauptsache bei Lagern schnellaufender Hauptwellen von Werkzeugmaschinen angewandt, die Spritzschmierung findet gewöhnlich dort Verwendung, wo wir noch härtere Betriebsbedingungen als in dem vorgenannten Fall haben. Die Scheibenschmierung wird bei einer bestimmten Art von Ladegebläsen angewandt.

In der vorliegenden Arbeit soll in der Hauptsache über die Spritzschmierung gesprochen werden, jedoch wollen wir auch die Scheibenschmierung ein wenig berühren.

Das Spritzschmierverfahren ist keineswegs eine ganz neue Schmiermethode, es ist auch bisher schon immer angewandt worden, da jedoch bis heute über dieses Spritzschmierverfahren noch immer keine Klarheit herrscht, so wollen wir nachstehend ganz kurz die Maßnahmen aufzählen, welche sich im Sinne einer Absenkung der Lagertemperatur als wirkungs-

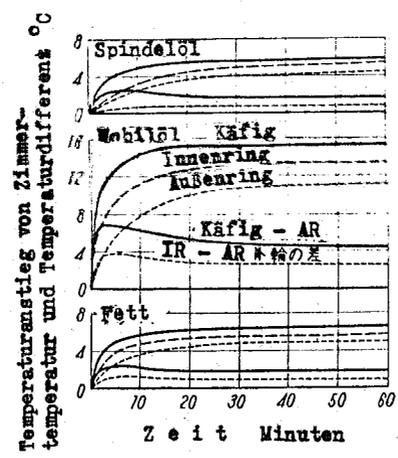


Abb. 2 Der Temperaturanstieg und die Temperaturdifferenzen beim Innenring, beim Außenring und beim Käfig

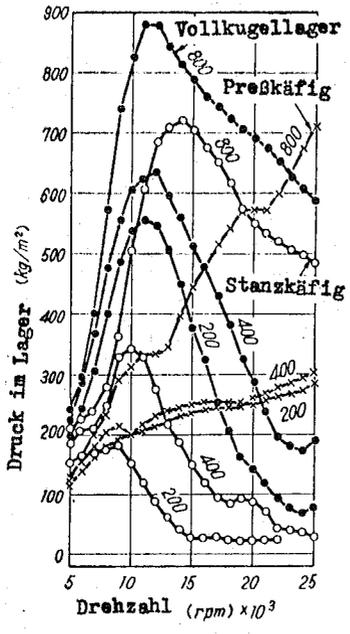


Abb. 3 Die Drehzahl und die Spannungen im Lager

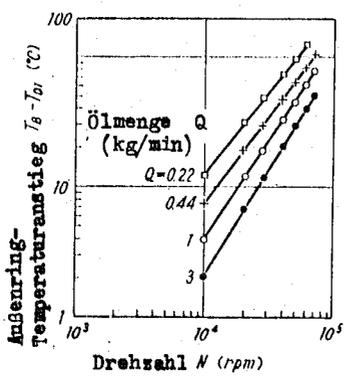


Abb. 4 Die Drehzahl und der Temperaturanstieg im Außenring

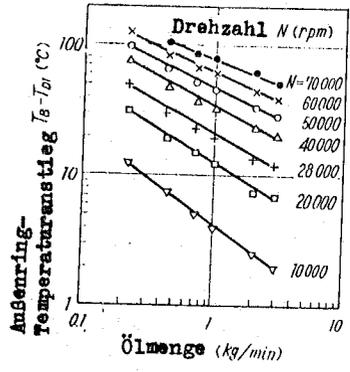


Abb. 5 Die zugeführte Ölmenge und der Temperaturanstieg im Außenring

voll erwiesen haben:

- (i) Ganz allgemein eine Erhöhung der zugeführten Ölmenge.
- (ii) Durch ein Absenken der Eintrittstemperatur des Öles, d.h. also durch Zuführen gekühlten (kalten?) Öles kann in proportionaler Weise auch die Lagertemperatur verringert werden.
- (iii) Eine Erhöhung der Spritzstrahlgeschwindigkeit durch Verringerung des Düsendurchmessers bei gleichbleibender Ölmenge.
- (iv) Eine Erhöhung der Anzahl der Düsen bei gleichbleibender Ölmenge.

Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

- (i) Für das Öl, welches das Lager durchlaufen hat und an der der Düse entgegengesetzten Seite austritt, sowie für das Öl, welches durch die Düse ausgespritzt wird und zurückprallt, muß entweder eine ausreichend große Austrittsöffnung vorhanden sein, so daß dieses Öl das Lager auf beiden Seiten ungehindert verlassen kann, oder, wenn dies nicht in ausreichendem Maße der Fall ist, muß für eine Absaugung gesorgt sein.
- (ii) Der Spritzstrahl muß ungeachtet der Art und Form der Käfigführung auf die Mitte des Spaltes zwischen dem Innenringaußendurchmesser und dem Käfiginnendurchmesser gerichtet sein und er muß außerdem parallel und rechtwinklig zur Lagermitte verlaufen, wenn der Spritzstrahl also eine hiervon abweichende schräge Lage einnimmt, dann muß man auch dann, wenn dies keine ernsteren Folgen und Gefahren mit sich bringt, mit einer Verringerung des Wirkungsgrades rechnen.
- (iii) Bei Düsendurchmessern von 1,0 mm und weniger muß

selbst bei größter Vorsicht eine Verstopfung der Düsenöffnung befürchtet werden, es muß aus diesem Grunde in der Praxis hier ein Übermaß von Vorsicht und Wartung aufgewandt werden.

(iv) Wenn wir die Entfernung zwischen der Düsen Spitze und der Lagerstirnfläche allzu groß nehmen, dann kommt es zu sehr unangenehmen Störungen infolge der Schwankungen der Viskosität und der Entstehung von Schmutzöl, und infolge der Änderung des Durchmessers und der Bahn des Spritzstrahles können im voraus nicht abzuschätzende Gefahrenmomente hereinkommen, die genannte Entfernung sollte also ungefähr mit 10 mm festgelegt werden.

Im folgenden wollen wir uns nun mit den verschiedenen sich auf die Leistung beziehenden Eigenschaften beschäftigen:

(a) Der Einfluß der Drehzahl⁷⁾

Man hat für das Hauptlager 6206 (30 x 62 x 16 mm) den Zusammenhang zwischen der Drehzahl und der Temperatur des Außenringes grafisch dargestellt. Als Schmieröl hat man Esso-Turboöl 10 verwendet, als Temperatur des eintretenden Öles hat man 30°C genommen und die Belastung hat man konstant mit 50 kg genommen. Man hat die Versuche für verschiedene Düsendurchmesser ausgeführt, und zwar 0,5, 0,7, 0,9, 1,1, 1,5 und 1,8 mm. Man hat die Lageraußenringtemperatur mit T_B , die Temperatur des eintretenden Öles mit T_{O1} und die Drehzahl mit N bezeichnet und nachgewiesen, daß zwischen diesen Größen folgende Beziehung besteht:

$$(T_B - T_{O1}) \propto N^{1.3-1.7}$$

(b) Der Einfluß der Ölmenge⁷⁾

Für den im Abschnitt (a) näher beschriebenen Fall hat man

den Zusammenhang zwischen der Ölmenge und der Außenringtemperatur grafisch aufgezeichnet. Die Ölmenge hat man mit Q bezeichnet und nachgewiesen, daß folgende Beziehung besteht

$$(T_B - T_{01}) \propto Q^{-0,5} \sim -0.7$$

(c) Der Einfluß der Viskosität⁷⁾

Für den im Abschnitt (a) beschriebenen Fall hat man die Temperatur des eintretenden Öles zwischen 30°C und 130°C geändert und dabei die zwischen der Viskosität des Öles und der Außenringtemperatur bestehende Beziehung untersucht. Man hat die Viskosität mit Z_{01} bezeichnet und nachgewiesen, daß angenähert folgende Beziehung gilt:

$$(T_B - T_{01}) \propto Z_{01}^{0.3}$$

(d) Der Einfluß der Anzahl der Düsen³⁾

Man hat das Zylinderrollenlager N215 (75 x 130 x 25 mm) verwendet, die Radiallast betrug 368 lbs, die Temperatur des Öles beim Eintritt betrug 100°F , und die Drehzahl ergab einen dn -Wert von 1.2×10^6 . Man hat 3 Fälle untersucht, einmal den Fall mit einer Düse, sodann den Fall mit zwölf am äußeren Kreisumfang seitlich vom Lager angeordneten Düsen und schließlich den Fall, wo man in die Umlaufbahnfläche des Außenringes kleine Löcher gebohrt hat und durch diese das Öl einströmen ließ. In der Abb.7 ist der Zusammenhang zwischen der zugeführten Ölmenge und der Lageraußenringtemperatur grafisch dargestellt. Bei dieser Forschungsarbeit ist als besonders bemerkenswert zu bezeichnen, daß hier die Temperaturverteilung in der äußeren Umfangsrichtung des Außenringes gemessen wurde und daß die Temperaturunterschiede zwischen der gemessenen Maximaltemperatur und der gemessenen Mindesttemperatur im Falle der zwölf

Düsen 5°F , im Falle der einen Düse 35°F und im Falle der kleinen im Außenring gebohrten Löcher 93°F betrug.

(e) Die prozentuale Durchströmung

Wenn wir im Falle der Spritzstrahlschmierung den Wert der durch die zugeführte Ölmenge verdrängten auf der entgegengesetzten Seite des Lagers austretenden Ölmenge als "die prozentuale Durchströmung" bezeichnen, dann wird diese prozentuale Durchströmung zu einem Maßstab für die Schmierung da wir von vornherein annehmen können, daß bei einem hohen Wert der prozentualen Durchströmung auch die Schmierung der inneren Teile des Lagers entsprechend gut ist. Wir finden in der Literatur zwar nur ganz spärlich Beispiele von Forschungsarbeiten über diese prozentuale Durchströmung eines Lagers bei hohen Drehzahlen, wir wollen jedoch nachstehend einige solcher Beispiele anführen:

In der Tafel 3 haben wir die Ergebnisse der gleichzeitig mit den in den Abschnitten (a) - (c) beschriebenen Untersuchungen durchgeführten Forschung zusammengestellt; aus dieser Tafel ersehen wir, daß die prozentuale Durchströmung umso niedriger wird, je höher die Drehzahl ist, daß also auch das eingespritzte Öl Schwierigkeiten hat, in das Lager hineinzukommen. Je höher die zugeführte Ölmenge wird, umso niedriger wird die prozentuale Durchströmung. Bei unserer Forschungsarbeit haben wir für die einzelnen zugeführten Ölmengen und die einzelnen Düsendurchmesser ungefähr gleichbleibende Spritzstrahlgeschwindigkeiten hergestellt, und deshalb bekamen wir bei hohen zugeführten Ölmengen auch große Spritzstrahldurchmesser; dies ist vielleicht dadurch zu erklären, daß bei einem kleinen Spalt zwischen dem Käfig und dem Innenring das Öl nur schwer

eindringen kann und da mit größer werdenden Gesamtabmessungen des Lagers auch dieser Spalt größer wird, so bekam man hierdurch die verschiedenen Werte. Jedenfalls war selbst bei einem dn -Wert von 1.2×10^6 und mehr die Abnahme der prozentualen Durchströmung verhältnismäßig klein, sie lag etwa bei 30%; dieser Wert ist sehr wichtig als Maß für die Planung der Schmierung.

Bei den Abb.8 und 9¹³⁾ handelt es sich um das Kugellager 6311 (55 x 110 x 29 mm), dies ist ein Lager mit einem im Außenring geführten, gezogenen (?) Käfig. Die Drehzahl betrug maximal 20000 U/Min. (dn -Wert 1.1×10^6), der Düsendurchmesser betrug im Falle der Abb.8 1.0 mm und im Falle der Abb.9 2,0 mm. In beiden Fällen betrug bei 20 000 U/Min. die prozentuale Durchströmung ungefähr 30%, bei höherer Ölmenge war auch die prozentuale Durchströmung höher. In diesem Punkte können wir zwar einen Unterschied gegenüber den in der Tafel 3 aufgeführten Ergebnissen feststellen, da es sich jedoch um Werte für den Fall handelte, in welchem der Spalt größer war als der Spritzstrahldurchmesser, so haben wir hier eine Bestätigung für unsere oben erwähnte Vorausvermutung.

Bei einem Düsendurchmesser von 1,0 mm und einer Ölmenge von 100 ccm/Minute ist auch die prozentuale Durchströmung niedrig und beträgt ungefähr 6%, hierbei kann man natürlich im voraus schon vermuten, daß auch die in das Lager eindringende Ölmenge nur ganz gering ist, so daß es sich hier um eine Betriebsbedingung handelt, die man in der Praxis vermeiden müßte. Bei unseren Versuchen haben wir für verschiedene Ölmengen bei einem Düsendurchmesser von 1.0 mm und einem Düsendurchmesser von 2,0 mm für den Fall,

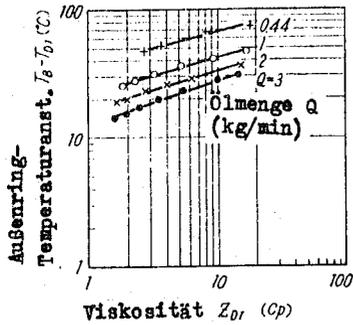


Abb.6 Die Viskosität des Schmieröles und der Temperaturanstieg im Außenring

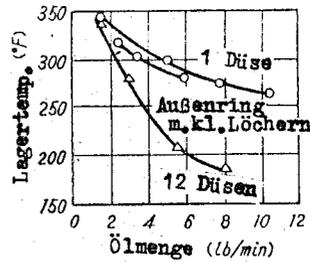


Abb.7 Die zugeführte Ölmenge und die Lagertemperatur

Tafel 3

Die prozentuale Durchströmung (%) und die Drehzahl bei verschiedenen zugeführten Ölmenngen

Drehzahl rpm	zugeführte Ölmenge kg/min					
	3	2	1	0.72	0.44	0.22
10 000	48.7	52.1	72.1	69.4	74.5	79.8
20 000	44.4	43.3	51.3	51.8	55.9	60.9
28 000	39.0	38.3	42.4	43.8	44.0	43.6
40 000	33.0	30.8	36.7	37.3	36.0	33.0
50 000	28.5	28.1	35.9	37.3	36.6	31.2
60 000	27.2	26.8	32.8	35.4	34.0	26.0
70 000	25.3	24.9	31.8	33.3	33.6	—

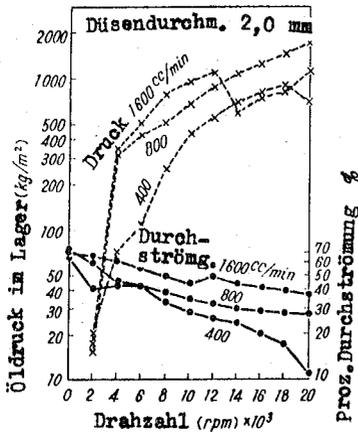


Abb.8 Die Drehzahl und der Öldruck im Lager, sowie die prozentuale Durchströmung (1,0 mm)

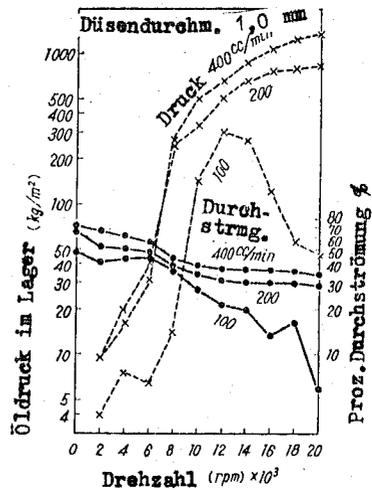


Abb.9 Die Drehzahl und der Öldruck im Lager, sowie die prozentuale Durchströmung (2,0 mm)

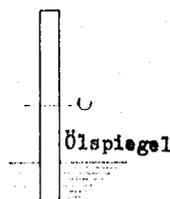


Abb.10

Die Drehbewegung der Schmierscheibe

daß die entsprechenden Spritzstrahlgeschwindigkeiten gleich waren, festgestellt, daß die prozentuale Durchströmung ganz unabhängig von der Drehzahl in einer nahezu vollkommenen Wechselbeziehung (zu der Ölmenge?) stand.

(f) Die Scheibenschmierung

Wenn man, wie dies in der Abb. 10 dargestellt ist, den unteren Teil einer Scheibe in das Öl eintauchen und so rotieren läßt, so wird infolge der viskosen Haftkraft des Öles dieses an der gesamten in das Öl eingetauchten Seitenfläche der Scheibe, sowie an deren äußerem Umfang festhaften. Wenn die Drehzahl der Scheibe allmählich ansteigt, so wird auf das an der Scheibe haftende Öl die Fliehkraft einwirken und das Öl wird in tangentialer Richtung abgeschleudert. Dabei wird in einer geeigneten Lage über der Scheibe eine Auffangschale angeordnet und auf diese Weise wird das abgeschleuderte Öl aufgefangen. So wird das sich in der Auffangschale ansammelnde oder weitergeleitete Öl über Ölkanäle durch das Lager hindurchgeleitet und kann auf diese Weise seine Schmieraufgabe erfüllen. Man spricht hier von der sogenannten Scheibenschmierung.

Um die von der Schmierscheibe hochgeschleppte Ölmenge möglichst groß zu machen, kann man dem in das Öl eintauchenden Teil der Scheibe eine große Oberfläche etwa dadurch verleihen, daß man ihr einen U-förmigen Querschnitt gibt. Bei dieser Schmiermethode hat man keine Möglichkeit, wie dies etwa bei der Spritzstrahlschmierung der Fall ist, eine zwangsläufige Schmierung und eine zwangsläufige Kühlung zu erreichen, bei ungefähr mittleren Bedingungen jedoch und bei einem gut abgedichteten Lager stellt diese Scheibenschmierung ein recht gut wirksames Verfahren dar,

das, wie wir nachher noch berichten werden, bei einem Teil der Ladegebläse Anwendung gefunden hat.

Im folgenden wollen wir noch einige Beispiele für die Leistung und die Eigenschaften dieser Art der Schmierung anführen¹⁴⁾.

Die Abb.11 zeigt die Versuchseinrichtung, während die Abb. 12 die Leistungscharakteristik und den äußeren Rand der Scheibe im einzelnen zeigt.

Wie wir in der Abb.11 sehen können, wird das von der Scheibe abgeschleuderte Öl in einer sich unmittelbar über der Scheibe befindenden Auffangschale gesammelt, das Öl fließt in Pfeilrichtung durch die Ölkanäle und es tritt auf der rechten Seite des Lagers in das Lager ein, das Öl, welches das Lager durchströmt hat und das zurückgeworfene Öl fließt unterhalb des Lagers in Pfeilrichtung weg und kehrt in das Ölbassin zurück.

In der Abb.12 haben wir auf der Abszissenachse die Geschwindigkeit des äußersten Randes der Scheibe, und auf der Ordinatenachse die zugeführte Ölmenge abgetragen. Die zugeführte Ölmenge haben wir an einer Stelle unmittelbar vor dem Einfließen des Öles in das Lager gemessen. Bei einer Geschwindigkeit von ungefähr 110 m/sec (20 000 U/Min. betrug die zugeführte Ölmenge maximal ungefähr 240 ccm/Min. hieran schließt sich dann noch einmal ein abfallender Verlauf an. Man kann also die Schmierung dadurch erreichen, daß man die zugeführte Ölmenge und die Drehzahl in geeigneter Weise festlegt.

3. Die Planung

Als Lager für Ladegebläse werden in der Hauptsache Tiefnut-

Kugellager, Winkelkugellager und Zylinderrollenlager verwendet; bei den kleineren Ladegebläsen nimmt man in der Regel Tiefnut-Kugellager, während man für die mittleren und die großen Ladegebläse im allgemeinen aus einem Tiefnut-Kugellager und einem Winkelkugellager oder aus einem Winkelkugellager und einem Zylinderrollenlager bestehende Lagerpaare verwendet.

Da wie bereits oben dargelegt wurde, mit den höher werdenden Drehzahlen auch die Wärmeerzeugung stärker wird, so muß man den Radialspalt größer nehmen als den gewöhnlichen Spalt und wir haben beim Innenring eine Ausdehnung von ungefähr 80% der Preßsitzpassung, diese Punkte müssen unbedingt berücksichtigt und bei der Planung und Festlegung des Lagers mit den gegebenen Betriebsbedingungen kombiniert werden.

Auf die Genauigkeit des Lagers wollen wir zwar in einem späteren Abschnitt noch zu sprechen kommen, man muß bei dem Lager jedoch die Genauigkeitsklasse 5 der Japanischen Industrienormen (Präzision) und die Genauigkeitsklasse 4 (Superpräzision) einhalten. Auf den Rauheitsgrad und die Sauberkeit der Feinstbearbeitung muß bei den Wälzflächen der umlaufenden Wälzkörper, sowie bei den Umlaufbahnen des Innenringes und des Außenringes größte Sorgfalt verwandt werden.

Für den Käfig wird in der Hauptsache eine hochbeanspruchbare Kupferbronze verwendet, für die Führung gibt es verschiedene mögliche Arten, nämlich die Außenringführung, die Innenringführung und die Wälzkörperführung. All diese besonderen Merkmale, ob es sich nun um Vorteile oder um

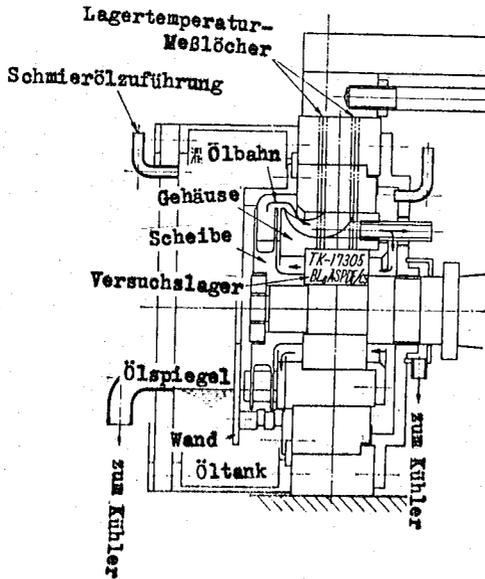


Abb. 11 Die Versuchseinrichtung

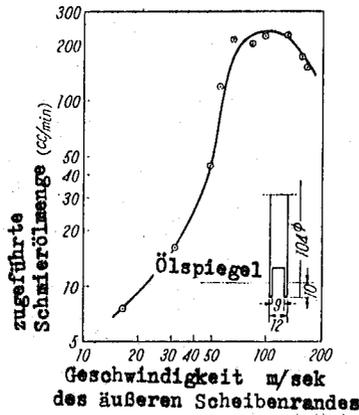


Abb. 12 Die Geschwindigkeit des äußeren Randes der Schmier-scheibe und die zugeführte Schmierölmenge

Tafel 4

Die Genauigkeit des Innenringes und die Genauigkeit der Breite des Außenringes

Nennmaß des Innendurchm. d (mm)	Innen∅ eines Lagers mit zyl. Bohrg.								Breite				Radial- Querschwin- gungen des Innenrings		Winkelschwin- gungen des Innenrings				
	Toleranz von d _m		Toleranz von d				Toleranz		ungleichschwingungen		Innenring								
	Kl.5	Kl.4	Kl.5	Kl.4	Kl.5 u. 4	Kl.5	Kl.4	Kl.5	Kl.4	Kl.5	Kl.4	Kl.5	Kl.4						
0.6	2.5	0	-5	0	-4	0	-5	0	-4	0	-40	5	2.5	3.5	2.5	7	3	7	3
2.5	10	0	-5	0	-4	0	-5	0	-4	0	-40	5	2.5	3.5	2.5	7	3	7	3
10	18	0	-5	0	-4	0	-5	0	-4	0	-80	5	2.5	3.5	2.5	7	3	7	3
18	30	0	-6	0	-5	0	-6	0	-5	0	-120	5	2.5	4	3	8	4	8	4
30	50	0	-8	0	-6	0	-8	0	-6	0	-120	5	3	5	4	8	4	8	4
50	80	0	-9	0	-7	0	-9	0	-7	0	-180	6	4	5	4	8	5	8	4

Nachteile handelt, müssen unbedingt auch im Zusammenhang mit dem Schmierverfahren betrachtet werden. Im allgemeinen wird wohl die Außenringführung am häufigsten angewandt, schon weniger verwendet man die Innenringführung und nur ganz selten trifft man die Wälzkörperführung.

Für die Konstruktion des Käfigs sind ein möglichst geringes Gewicht, hohe Festigkeit und Gestaltfestigkeit, sowie ein möglichst leichtes Eindringen des Schmieröles erste Voraussetzung; wie bereits oben erwähnt, muß dafür gesorgt sein, daß das Öl ohne Schwierigkeiten an allen wichtigen Stellen der gleitenden Teile der Wälzkörper und der Käfigfenster gehalten wird.

4. Die Genauigkeit

Wenn ein Wälzlager für hohe Drehzahl verwendet werden soll, dann ist seine Genauigkeit etwas problematisch, es entstehen nämlich Schwingungen und Geräusche und außerdem werden durch die hohen Drehzahlen das Festfressen des Lagers, der Abriebverschleiß und die Bruchschäden in hohem Maße begünstigt, es ist deshalb nicht nur wünschenswert, daß das Lager selbst mit hoher Genauigkeit ausgeführt ist, sondern auch die Genauigkeit der einzelnen zum Einbau des Lagers gehörenden und notwendigen Teile müssen unbedingt als sehr wichtige Faktoren im Zusammenhang mit der Genauigkeit des Lagers selbst berücksichtigt werden. Man nimmt deshalb heute nahezu ganz allgemein für die Genauigkeit des Lagers selbst die Genauigkeitsklassen 5 und 4 der Jap.Industrienormen.

In den Tafeln 4 und 5 sind ein Teil der Nennwerte zusammengestellt.

5. Das Beispiel des Ladegebläses

In der Abb.13 sehen wir den Längsschnitt durch ein Ladegebläse. Auf der linken Seite haben wir die Gebläsesseite (B-Seite) und auf der rechten Seite die Turbinenseite (T-Seite). Auf der B-Seite sind zwei Winkelkugellager für die Front und für die Frontkombination (DF-Form) verwendet, während wir auf der Turbinenseite ein Tiefnut-Kugellager haben. An der Außenseite der beiden Lager sind Scheiben (33) angeordnet, welche der Schmierung der Lager nach dem Scheibenschmierverfahren dienen.

An der Außenseite (dieser Scheiben?) sind in der Nähe des Ölspiegels Abstandscheiben (34) vorgesehen, welche verhüten sollen, daß durch das Rotieren der Scheiben die gesamte Oberfläche des Ölspiegels in eine wellenförmige Bewegung gerät; auf diese Weise wird erreicht, daß immer ein gleichmäßiger Ölspiegel aufrechterhalten bleibt.

Das von der Scheibe hochgeschleuderte Schmieröl wird unterhalb der mit (328) bezeichneten Stelle aufgefangen und gesammelt, von dort fließt es durch einen sich im unteren Teil des Lagergehäuses befindenden Ölkanal der Innenseite der beidseitigen Lager B und T zu und gelangt auf diese Weise in die Lager. Ein Teil des Öles geht durch das Lager hindurch zu der gegenüberliegenden Seite, der andere Teil des Öles dient der Kühlung des Lagers und fließt durch die im unteren Teile vorgesehenen Bohrungen (Öffnungen?) der jeweiligen Ölkammer zu, so daß man auf diese Weise eine Zirkulation des Öles bekommt.

Die Abb.14 zeigt ein Beispiel einer Spritzstrahlölauführung. In diesem Falle geht ein Teil des ausgespritzten Öles

Tafel 5

Die Genauigkeit des Außenringes

Nennmaß des Außenring- außendurch- messers mm		Außendurchmesser des Außenringes								Breite ungleich		Übergang der Außenringd. Außenr.		Radial- flächen- schwgg. des Außenrings		Winkelschwgg. des Außenrings		
		Toleranz von D_m				Toleranz von D												
		über	bis	Kl.5		Kl.4		Kl.5		Kl.4		Kl.5	Kl.4	5	4	5	4	5
		oben	unt.	oben	unt.	oben	unt.	oben	unt.									
2.5	6	0	-5	0	-4	0	-5	0	-4	5	2.5	8	4	5	3	8	5	
6	18	0	-5	0	-4	0	-5	0	-4	5	2.5	8	4	5	3	8	5	
18	30	0	-6	0	-5	0	-6	0	-5	5	2.5	8	4	6	4	8	5	
30	50	0	-7	0	-6	0	-7	0	-6	5	2.5	8	4	7	5	8	5	
50	80	0	-9	0	-7	0	-9	0	-7	6	3	8	4	8	5	10	5	
80	120	0	-10	0	-8	0	-10	0	-8	8	4	9	5	10	6	11	6	

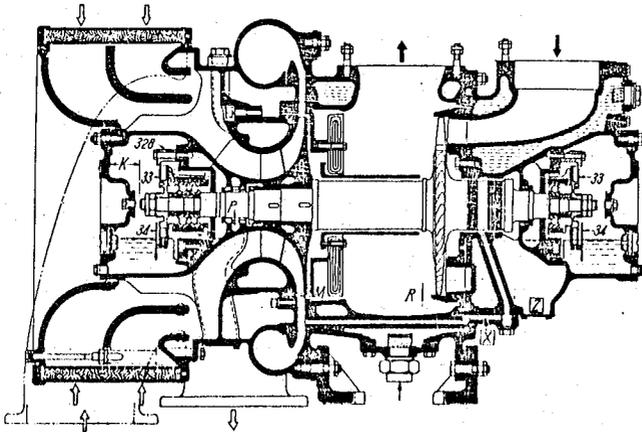


Abb.13 Ein Längsschnitt durch ein Ladengebläse

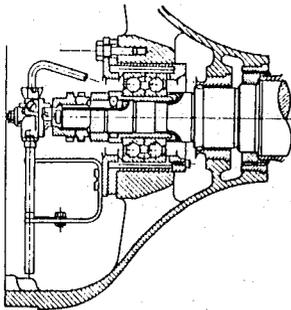


Abb.14 Die Spritzstrahl-
ölführung (2 Kugellager)

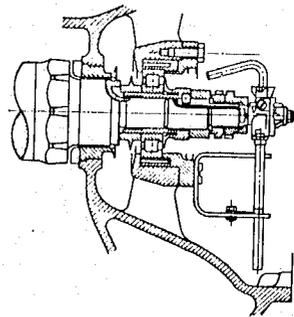


Abb.15 Eine andere Ausführung
der Spritzstrahlölführung
(Zylinderrollenlager)

Tafel 6

Typ des Ladengebläses.	Drehzahl des Ladengebläses	
	maximal U/min	dn-Wert ($\times 10^4$)
VTR 160	42 000	84
200	34 000	85
250	27 000	81
320	21 000	84
400	17 000	76.5
500	13 500	74.25
630	10 500	78.75

durch das Innere des Lagers hindurch nach der entgegengesetzten Seite, während der andere Teil des Öles der Kühlung des Lagers dient und zum Öltank zurückfließt.

In der Abb.15 sehen wir den Fall eines Zylinderrollenlagers mit Spritzstrahlölauführung. Wir haben hier also flossenförmige Körper, welche auf die Welle aufgepaßt und an der Seitenfläche des Innenringes starr befestigt sind und sich zusammen mit dem Innenring drehen, und die Spritzstrahlen sind auf die Grundrichtung dieser flossenförmigen Körper eingestellt. In einem solchen Falle geht also die Spritzstrahlströmung nicht unmittelbar in das Lager hinein, sondern sie trifft zunächst einmal auf die flossenförmigen Körper auf, wird dort zerstäubt und dringt in fein verteilter Nebelform in das Lager ein und schmiert es.

Als Besonderheit dieses Lagers ist zu erwähnen, daß das Öl hier nicht unmittelbar in das Lager eintritt, sondern daß es zu einem aus einem Gemisch von Luft und Öl bestehenden nebelartigen Gebilde wird, daß wir also eine mittelbare Schmierung haben und daß dadurch, daß die mittlere Genauigkeit nicht so hoch zu sein braucht, wie im Falle der ausschließlichen Ölschmierung eine Verringerung des Umrührwiderstandes zu erwarten ist; auch hinsichtlich der Öldurchlauffunktion des Lagers fällt uns auf, daß eine gewisse Grenze berücksichtigt werden muß.

In der Tafel 6 haben wir die Drehzahlen der Ladegebläse und die d_n -Werte der verwendeten Lager zusammengestellt.

6. Schlußwort

Die vorliegende Arbeit befaßt sich zwar zum größten Teil

mit dem Problem der Schmierung und was über die Wälzlager für hohe Drehzahlen, vorallem bei den Ladegebläsen gesagt werden müßte, fehlt in dieser Arbeit zum größten Teil noch es soll jedoch bei einer späteren Gelegenheit nachgeholt werden.

Über die noch nicht gelösten Probleme der Lager für hohe Drehzahlen, muß natürlich für die Zukunft eine Lösung geplant werden, welche die Forschungsaufgaben auf den einzelnen von diesen Problemen berührten Gebieten zusammenfaßt; wir hoffen jedoch mit unserer Arbeit bereits einen kleinen Beitrag geleistet zu haben.

Allen Herren, die uns bei unserer Forschungsarbeit durch wertvolle Hinweise oder durch tatkräftige Unterstützung geholfen haben, möchten wir bei dieser Gelegenheit unseren herzlichsten Dank aussprechen.

Literaturhinweise

- 1) Kamakura: Die schnellaufenden Bezinmotoren, 1960.
- 2) S.R.Puffer: Trans.ASME, Nov., 1951.
- 3) E.F.Macks, Z.N.Nemeth, W.J.Anderson: Trans.ASME, Juli 1952, Vol.74, Nr.5.
- 4) A.Fogg, J.S.Webber: J.Inst.Petrol. 39.Nov. 1953.
- 5) W.J.Anderson, Z.N.Nemeth: Lubrication Engineering, Jan.-Febr. 1955.
- 6) C.C.Moore, F.F.Jones: Trans.ASME Juli 1956, Vol.78, Nr.5.
- 7) Masuda, Miyakawa: Berichte der Forschungsanstalt für Raumfahrt und Luftfahrt, Bd.1, Heft Nr.3 (B) 1965, September.
- 8) Masuda, Miyakawa u.a.: Referat auf der Tagung für Schmierung 1966, Mai.
- 9) Masuda: Die Maschinenforschung, Bd.6, Heft 1, 1954, Januar.
- 10) Izawa: Wissenschaftl.Forschungsberichte, Folge-Nr.31, H.2
- 11) Sasaki: Sammlung von Forschungsarbeiten der Jap.Gesellschaft für Mechanik, Bd.17, Heft Nr.59, (1951).
- 12) Noto: Der NTN-Bearing Engineer, Bd.1, Heft Nr.1, 1950.
- 13) Noto, Kato: Der NTN-Bearing Engineer, Bd.14, Heft 1, 1965.
- 14) Kato: Firmeninterner Bericht der Fa. Toyo-Bearing.