

Rotorcomp Verdichter GmbH

Ölfreie, wassergeschmierte Kompressoren

Abschlußbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem AZ 01100 von der
Deutschen Bundesstiftung für Umwelt

von Dipl. BW. Andreas Holleder &
Dipl. Ing. Stephan Lieberei

München den 01.06.97



Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	01100	Referat	21/0	Fördersumme	413.138,00 DM
Antragstitel		Ölfreier, wassergeschmierter Schraubenkompressor			
Stichworte		Produkt; Maschine			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
24 Monate	01/95	12/96	keine		
Zwischenberichte		quartalsweise			
Bewilligungsempfänger	Rotorcomp Verdichter Ltd. Wolfratshauer Str. 36 81379 München			Tel.: 089-72409-40 Fax.: 089-72409-38 Projektleitung: Herr Holleder Bearbeiter: Herr Lieberei	
Kooperationspartner	Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft, Abteilung Chemie der Universität Stuttgart				

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Ölgeschmierte Schraubenkompressoren sind Stand der Technik. Als Nachteilig sind das anfallende Altöl mit dem als Sondermüll zu behandelnden Filtern und Ölabscheidepatronen, sowie der Restölgehalt in der produzierten Druckluft zu nennen.

Ziel ist die Entwicklung eines wassergeschmierten Schraubenkompressors bei dem das umweltverträgliche Schmiermedium Wasser direkt und ohne zusätzliche Entsorgungsschritte dem Abwassernetz zugeführt werden kann. Ein solcher Schraubenkompressor würde nicht nur sauberere Druckluft liefern, er könnte aufgrund der höheren spezifischen Wärme des Schmier- und Kühlmediums auch den angestrebten isothermen Verdichtungsprozess näherungsweise realisieren und so weitere Energieeinsparungen ermöglichen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Vorfeld gemachte Untersuchungen zu hydrodynamischen Radialgleitlagern, zeigten daß hohe Tragzahlen realisierbar waren.

So wurde begonnen die Lagergeometrie auf die Spezifikation eines Kompressortyps auszulegen. Insbesondere waren zusätzliche Untersuchungen bei der Gestaltung der Axialgleitlager durchzuführen. Bei der Festlegung des Lagerspiels mußten die erhöhten Anforderungen an die genaue Rotorführung berücksichtigt werden. Dazu wurden Toleranzbetrachtungen durchgeführt um sicher zu stellen, daß auch beim ungünstigsten Zusammenfallen aller Fertigungsungenauigkeiten Kantenpressung vermieden wird. Die Axialgleitlager sind bei diesem Konzept hydrostatisch ausgeführt. D.h. die möglichen Tragkräfte werden über die Dimensionierung der Bohrungen für die Schmierstoffzufuhr und den entsprechenden Schmierdruck festgelegt. Insbesondere das radiale Lagerkonzept wurde mit Herrn Prof. Schilling / TU München besprochen und positiv bewertet.

Bei den Versuchen sollte über Variation der Lage der Einspritzbohrung, der zugeführten Wassermenge, des Schmierdruckes und des Lagerspiels das Verschleißverhalten der jeweiligen Lager untersucht und optimiert werden.

Die Schmierstoffversorgung wurde über eine separate Pumpe sichergestellt. Als Materialpaarung wurde beim Radiallager schließlich eine Silizium-Siliziumkarbidbuchse mit einer Chromoxid beschichteten Bronzewelle gepaart, beim Axiallager laufen zwei SiSiC-Scheiben zueinander.

Die Suche nach geeigneten korrosions- und verschleißbeständigen, Werkstoffen eines Schraubenkompressors wurden mit Hilfe von Herrn Prof. Tensi und Herrn Prof. Thomas / Institut für Werkstoffe und Materialbearbeitung begonnen.

Als geeignet erscheinen demnach: Keramik, AlSi, AlMg3, chromlegierte Stähle, chromlegierter Guß, Kupfer und Bronze (dort wo kein Abrieb zu befürchten ist) und Messing. Zudem muß bei der Materialauswahl darauf geachtet werden, daß die kombinierten Materialien nur geringe elektrochemische Potentialdifferenzen aufweisen um Korrosionsprobleme zu vermeiden. Schließlich sind diverse Beschichtungen (z.B. Wolfram-Carbid) möglich, die wiederum die Verwendung preiswerterer Materialien erlauben und die Verschleißigenschaften verbessern.

Weitere Grundlagenuntersuchungen waren auf dem Gebiet des Wasserkreislauf nötig. Hier sollte die Bioaktivität und die Biofilmbildung möglichst vermieden werden. Deshalb wurden in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Flemming / Institut für Siedlungswasserbau und Herrn Prof. Ruck / FH Weihenstephan die Art der Wasseraufbereitung und die Gestaltung des Wasserkreislaufs diskutiert.

So ist es möglich über Fein-Filter das Nährstoffangebot zu reduzieren oder durch Silberionen das Wasser zu desinfizieren. Außerdem könnte über eine erhöhte Betriebstemperatur das Bakterienwachstum begrenzt werden. Alle diese Maßnahmen scheitern aber an den Stillstandszeiten der Anlage, so daß beschlossen wurde aktive Wasseraufbereitungssysteme nicht zu installieren. Allerdings wurden einige passive Vorkehrungen getroffen, die das Bakterienwachstum verlangsamen sollen. So wurden z.B. die Oberflächen des Blocks glatt ausgeführt um ein Anhaften eines Biofilms zu erschweren. Aus dem selben Grund wurden poröse Werkstoffe wie AlMg3 vermieden, um keine Bakteriennester zu erhalten. Durch wiederholtes messen des PH-Wertes und der TOC-Konzentration (Total Organic Carbon) sollte geklärt werden in welchen Zyklen ein Wasseraustausch notwendig ist. Außerdem sollte untersucht werden ob es genügt das Wasser zu tauschen oder ob eine zusätzliche Reinigung oder gar Desinfektion erforderlich wäre.

Diese theoretischen Überlegungen mündeten in der Konstruktion eines Teststandes mit Verdichterblock und Wasserkreislauf, an dem alle Betriebszustände eines Kompressors simuliert und ausgewertet werden können.

Ergebnisse und Diskussion

Die ersten Versuche auf dem Teststand führten innerhalb kurzer Zeit zu Lagerschäden. Das Radiallager auf der Antriebsseite war gebrochen. Auf der Antriebsseite waren die radialen Belastungen durch die Spannkkräfte des Riemenantriebs besonders hoch. Deshalb wurden die Belastungen reduziert indem das Antriebsmoment nicht mehr mit Hilfe einer Riemenscheibe sondern direkt gekuppelt eingebracht wurde. Dadurch konnte die radiale Belastung um einen Faktor nahe 2 reduziert werden. So konnten mit dem Kompressor Drehzahlen von 5500 Upm und Drücke von 7 bar realisiert werden.

Die Tragfähigkeit der Lager läßt sich noch weiter verbessern, wenn für eine gelenkige Führung der Lagerbuchsen gesorgt wird, wodurch ein Ausgleich der Fertigungstoleranzen ermöglicht werden kann und somit die Schiefstellungen der Welle ausgeglichen werden soll. Eine weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Tragfähigkeit der Lager wäre die Verwendung von reinen Keramik Laufpartnern, also Zapfen und Buchse aus Keramik. Dadurch könnte verhindert werden, daß die härtere Keramiklagerbuchse die Beschichtung ins weichere Trägermaterial drückt und zerstört.

Um die Kosten, im Hinblick auf ein markfähiges Produkt, zu reduzieren, sollte die separate Schmierstoffpumpe weggelassen werden können, weshalb die Axiallager hydrodynamisch ausgelegt werden sollten. Die möglichen konstruktiven Verbesserungen der Lager wurden bereits mit kompetenten Ansprechpartnern aus der Industrie (Fa. Allweiler, Fa. Burgmann) besprochen.

Bei den verwendeten Materialien kam es bisher zu keinerlei Korrosionsproblemen. Das Verschleißverhalten der Rotore sollte verbessert werden. Sie zeigen nach Ablauf der Tests an den Stellen mit gleitender Beanspruchung, sowohl an der treibenden als auch an der nachlaufenden Zahnflanke Abrieb.

Unsere Untersuchungen zur Stabilität des Wasserkreislaufs decken sich mit den Aussagen anderer Hersteller von wassereingespritzten Schraubenkompressoren (Kirsten / Alup) und zeigen, daß der PH-Wert und TOC-Wert in dem zulässigen Bereich bleiben.

Die Verschleiß-Zu den Verschleiß

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Fazit

Die in diesem Projekt gemachten Untersuchungen zeigen, daß eine wassergeschmierte Gleitlagerung realisierbar ist. Alternative Lösungen mit fett- oder ölgeschmierten Lagern scheitern immer wieder an den durch Kalkablagerungen zerstörten Dichtungen. Somit stellt die Lagerungsproblematik den Schlüssel für die Realisierung eines markfähigen wassergeschmierten Schraubenkompressor dar. Nachgeordnete Bedeutung haben die Materialfrage und die Frage des Wasserkreislaufs.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt	2
Zusammenfassung	5
Einleitung	6
Hauptteil	7
Theoretische Untersuchungen	7
Werkstoffauswahl Gleitlager	7
Werkstoffauswahl Schrauben	7
Werkstoffauswahl Wasserkreislauf	8
Lagerdimensionierung / Toleranzbetrachtungen	8
radial	9
axial	9
Lagerungsalternativen	9
Wälzlager ungeschmiert	9
Hybrid / Keramik / Edelstahl	10
Wälzlager geschmiert	11
Wasserkreislauf / Bioaktivität	12
Konstruktive Umsetzung	12
Versuchstand / Wasserkreislauf	12
Labormuster Schraubenblock	13
Versuchsreihen	14
Radiallager	14
Axiallager	14
Labormuster Verdichteranlage	14
Weiteres Vorgehen	15
Fazit	15
Literaturverzeichnis	16
Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen	17
Bild 1 Durchbiegung	18
Bild 2 Lagerbuchse	19
Bild 3 Lagerscheibe	20
Bild 4 Laufscheibe	21
Bild 5 Druckscheibe	22
Bild 6 Teststand-Verdichteranlage	23
Bild 7 Schnittzeichnung Block	24
Bild 8 Lager-Teststand	25
Bild 9 Schmierspalt radial	26
Bild 10 Schmierspalt axial	27

Zusammenfassung

Die in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen zeigen wie ein wassergeschmierter Schraubenkompressor realisiert werden kann. Der Schlüssel dazu ist die konstruktive Umsetzung einer wassergeschmierten Gleitlagerung. In aufwendigen Testreihen wurden dazu zuerst die radialen Gleitlager gefunden. Bei den Untersuchungen zeigten sich Keramiklager allen anderen getesteten Werkstoffen insbesondere in Bezug auf ihr Verschleißverhalten als überlegen. Die experimentell gefundenen Tragfähigkeiten sind ausreichend um einen Kompressorbetrieb bei 7 bar und 5500 Upm zu gewährleisten.

Ein weiterer Schwerpunkt war die Gestaltung des Wasserkreislaufs, bei dem Korrosion, Bioaktivität mit folgender Biofilmbildung und Biokorrosion verhindert werden mußten. In Zusammenarbeit mit Prof. Flemming / Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft, sowie Herrn Prof. Ruck / FH Weihenstephan wurde ein Konzept festgelegt und konstruktiv umgesetzt, das auf eine aktive Wasseraufbereitung verzichtet, da dies nur für sich ständig in Bewegung befindliche Medien und geschlossene Kreisläufe Sinn macht. Stattdessen soll über eine geeignete Wasserzusammensetzung (50% Leitungswasser, 50 % enthärtetes Wasser), Materialauswahl, bzw. Gestaltung der Oberflächen und definierte Austauschzyklen des Wassers und Kontrollen der Wasserqualität der Kreislauf stabil gehalten werden.

Bei der konstruktiven Umsetzungen der theoretischen Erkenntnisse waren die hohen Toleranzanforderungen eines Schraubenkompressors ein weiteres Problem. Die Temperaturdifferenzen in Verbindung mit den unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialkombinationen, die Durchbiegung der Rotore und die machbaren Fertigungstoleranzen müssen berücksichtigt werden und bestimmen das kleinst mögliche Lagerspiel.

Die durchgeführten Versuche zeigen, daß eine wassergeschmierte Gleitlagerung realisierbar ist. Stand der Technik sind mit fett- oder ölgeschmierte Lager. Dieser Weg scheitert aber immer wieder an den durch Kalkablagerungen zerstörten Dichtungen. Somit stellt die Lagerungsproblematik den Schlüssel für die Realisierung eines marktfähigen wassergeschmierten Schraubenkompressors dar. Nachgeordnete Bedeutung haben die Materialfrage und die Frage des Wasserkreislaufs.

Einleitung

Ölgeschmierte Schraubenkompressoren sind Stand der Technik. Als Nachteilig sind das anfallende Altöl mit den als Sondermüll zu behandelnden Filtern und Ölabscheidepatronen, sowie der Restölgehalt in der produzierten Druckluft zu nennen. Die Ursache liegt darin, daß bei der Verdichtung von Luft Kondensat anfällt, welches sich mit dem eingespritzten Öl vermischt. Die Trennung der Luft vom Öl und Wasser geschieht in nachgeschalteten Abscheidebehältern. Dieses Kondensat muß später aufwendig entsorgt werden.

Zudem verbleibt immer ein Restölgehalt in der geförderten Druckluft, der bei Schraubenkompressoren zwischen 1-5 ppm liegt und so die Luft verschmutzt. Schließlich muß der Ölkreislauf ständig gefiltert werden, damit die Schmierung der Lager und der Rotore in der benötigten Qualität gesichert ist. Diese Filter mit dem enthaltenen Filterpapier müssen bei den Filterherstellern als Sondermüll kostenintensiv entsorgt werden.

Mit trockenlaufenden Kompressoren ließen sich diese Nachteile vermeiden. Hier müssen andere Punkte beachtet werden. So benötigen sie z.B. ein Synchronisationsgetriebe, da keine Berührung der Rotore erfolgen darf. Um die Leckgasmengen gering zu halten, muß die Drehzahl etwa doppelt so hoch wie bei öleingespritzten Schraubenkompressoren gehalten werden. Ein weiterer Nachteil sind die herkömmlichen ölgeschmierten Lager, die mit aufwendigen Dichtungen vom Druckraum getrennt werden müssen. Es handelt sich also um ein Produkt das in der Anschaffung teuer und im Betrieb mit einem schlechten Wirkungsgrad arbeitet.

Ziel ist die Entwicklung eines wassergeschmierten Schraubenkompressors bei dem das umweltverträgliche Schmier- / Kühlmedium Wasser direkt und ohne zusätzliche Entsorgungsschritte dem Abwassernetz zugeführt werden kann. Dieser Schraubenkompressor würde nicht nur sauberere Druckluft liefern, er könnte aufgrund der höheren spezifischen Wärme von Wasser (doppelt so hoch als Öl) auch den angestrebten isothermen Verdichtungsprozess näherungsweise realisieren und so theoretisch bis zu 20 % der Antriebsleistung einsparen.

Das technische Risiko bei der Lösung dieser Aufgabe liegt im wesentlichen bei der Werkstoffauswahl, der Lagergestaltung und dem Betriebsverhalten des Wasserkreislaufs.

Bei der Werkstoffauswahl für die vom Wasser berührten Bauteile steht an erster Stelle die Frage nach der Korrosionsbeständigkeit, die die Auswaschungen aus der Luft in dem Wasser berücksichtigen muß. Im Bereich der Rotore und der Lager müssen außerdem die mechanischen und tribologischen Belastungen beachtet werden. Schließlich muß bedacht werden, daß es bei der Kombination unterschiedlicher Materialien zu keiner Spannungskorrosion kommen darf.

Wassergeschmierte Lager, die so hohe Belastungen bei so geringem Bauraum bewältigen müssen sind bisher nicht bekannt. Durch Variation Lagergeometrie, der Schmierstoffmengen, Drücke und Materialien wurde eine geeignete Lagerung gefunden.

Das Wachstum von Bakterien, Pilzen, Hefen und Viren in einem geschlossenem Wasserkreislauf zu begrenzen ist eine weitere Aufgabe. In Zusammenarbeit mit Prof. Flemming wurde ein Konzept gefunden mit dem der Kreislauf stabil gehalten werden kann.

Hauptteil

Theoretische Untersuchungen

Werkstoffauswahl Gleitlager

Für sich aufeinander bewegende Bauteile wird standardmäßig eine Materialkombination mit einem weichen und einem harten Laufpartner verwendet. Dies soll insbesondere während der Einlaufphase dazu führen, daß das weiche Bauteil die Rauigkeitstäler des Laufpartners zudeckt. Durch die unterschiedlichen Materialien wird so auch ein Fressen der Lager vermieden. Im Falle eines wassergeschmierten Gleitlagers muß außerdem Korrosion vermieden werden. So wurde in einem ersten Versuch eine Kunststoffbuchse und eine Welle aus Aluminiumoxid getestet. Dabei konnte die Kunststoffbuchse die geforderten Belastungen nicht verschleißfrei ertragen. Um Verschleißfreiheit zu erlangen wurde eine Kombination hart gegen hart gewählt, Silizium-Siliziumkarbid gegen Aluminiumoxid. Dabei zeichnet sich SiSiC durch seine freien Siliziumanteile aus, die im Trockenlauf wie ein Schmierstoff wirken und die Reibung reduzieren. Weiterhin kann Keramik sehr genau und mit sehr glatten Oberflächen gefertigt werden. Dadurch ist es möglich den Schmierspalt sehr klein zu halten und trotzdem im Bereich der Flüssigkeitsreibung zu arbeiten. Das Aufbringen von Aluminiumoxid auf das Trägermaterial Bronze ist schwierig, bzw. der Haftverbund unzureichend. Deshalb wurde schließlich eine Chromoxid-Schicht verwendet.

Werkstoffauswahl Schrauben

Bei der Suche nach dem geeigneten Schraubenwerkstoff müssen außer der Korrosionsbeständigkeit auch die tribologischen Eigenschaften des System berücksichtigt werden. Wesentlich für die tribologischen Eigenschaften sind dabei der Werkstoff des Gegenkörpers, Anfangsrauigkeit, Gleitgeschwindigkeiten, Schmiermedium und die Kraftverhältnisse an der Kontaktfläche. Anzustreben sind elastische sehr harte Werkstoffe. Elastisch sollen sie sein, damit die aufeinander reibenden Rauigkeitsgebirge wegfedern können und nicht zu abrasivem Verschleiß führen. Hart sollen sie sein, damit die im Kontaktbereich herrschenden Flächenpressungen nicht zum Eindringen der jeweiligen Werkstoffen führen. Im Gegensatz zu Zahnrädern sind die Schrauben der Rotoren nur mäßigen Kräften dafür aber hohen Umfangsgeschwindigkeiten ausgesetzt. Daher ist die Vergleichbarkeit zu bekannten Verschleißuntersuchungen (Scheibe-Stift) nur bedingt gegeben [3]. Zuerst wurde eine harte PVD-Beschichtung aus Wolfram-Karbid ausprobiert. Der Auftrag war aber zu unregelmäßig und es zeigten sich nach kurzer Zeit Spuren des blanken Trägermaterials. Schließlich wurde ein Versuch mit reinen Bronzerotoren gestartet. Kupfer-Zinn-Legierungen verbinden hohe Härte und Duktilität mit sehr guter Korrosionsbeständigkeit und verfügen zudem über gute Gleit- und Trockenlaufeigenschaften. So werden sie auch bisher für hochbelastete Gleitlager und Schneckenräder verwendet. Außerdem müssen die Rotore nicht geschliffen werden, da die rauhen Oberflächen sich beim Einlaufen im Kontaktbereich glätten.

Werkstoffauswahl Wasserkreislauf

Für die Werkstoffauswahl des Wasserkreislaufs sind neben der Korrosionsbeständigkeit die bakteriologische Unbedenklichkeit wesentlich. Durch die Auswaschungen der SO₂- und Nitratanteile aus der Luft könnte sich der PH-Wert des Wassers über die Betriebszeit reduzieren. Dadurch könnten selbst Edelstähle angegriffen werden. Es ist also darauf zu achten, daß der PH-Wert im neutralen Bereich bleibt, indem z.B. rechtzeitig frisches Leitungswasser zugeführt wird.

Ablagerungen von Bakterien, die zu Biofilmen führen können, und Kalkablagerungen sind zu vermeiden. Deshalb sollten porenfreie Werkstoffe mit glatten Oberflächen zur Anwendung kommen und enge, schlecht spülbare Spalte vermieden werden. Glatte Oberflächen ließen sich z.B mit Teflon oder PVC beschichteten Bauteilen erzeugen. Diese Alternative wurde aber aus Kostengründen nicht umgesetzt. Stattdessen wurden die Oberflächen, insbesondere im Bereich enger Spalte, mittels mechanischer Bearbeitung glatt ausgeführt.

Kalkablagerungen können auch mit enthärtetem Wasser vermieden werden. Dazu sind diverse elektrolytische Verfahren preiswert auf dem Markt erhältlich. Reinstwasser ist aber sehr

Zuerst wurde eine Dimensionierung nach den herkömmlichen Berechnungsmethoden [1,2] durchgeführt. Danach wären die Abmessungen der Gleitlager so groß geworden, daß ein Einbau, in den durch den Achsabstand der Rotore begrenzten Raum des Kompressors, nicht möglich war. Mit den Versuchen konnte jedoch gezeigt werden, daß die Tragfähigkeiten von kleineren Lagern ausreichen, um den Betrieb eines Schraubenkompressors zu gewährleisten. Dies ist nach den bekannten Berechnungsmethoden nur mit sehr geringen Schmierstichthöhen zu erklären. So geringe Schmiersticht verlangen sehr hohe Rauheitsgüten und genaue Formtoleranzen, um einen Betrieb im Mischreibungsbereich zu vermeiden.

Das minimale Lagerspiel ergab sich aus den erreichbaren Fertigungstoleranzen und der errechneten Rotordurchbiegung. Da das Lagerspiel ausreichend groß gewählt war wurde auf zusätzliche Ausgleichselemente, wie z.B. eine ballige Aufnahme der Lagerbuchse verzichtet werden. Als zusätzliche Maßnahme gegen zu vermeidende Kantenpressung sind großzügige Phasen und ein Verhältnis von Durchmesser zur Breite < 1 gewählt (Bild 2). Außerdem wurden zwei Einspritzbohrungen vorgesehen, um ein schnelles Aufschwimmen der Lager sicherzustellen. Da der Schmierstoffkreislauf durch eine externe Pumpe betrieben wird, konnte ein Trockenlaufen der Lager ausgeschlossen werden. Dadurch wird die entstehende Reibungswärme auch im Anlauf abgeführt wird.

Axial

Die Axiallager sind hydrostatisch ausgeführt (Bild 3).

Über die unterschiedliche Anzahl und die unterschiedlichen Größen der Bohrungen für die Schmierstoffzufuhr, kann das Axiallager auf einen Betriebspunkt optimal ausgelegt werden. Bei sich verändernden Belastungen verschiebt sich die mittlere Lagerscheibe. Dadurch entstehen unterschiedlich breite Spalte vor den Lagerscheiben, so daß die im Lager entstehenden Druckdifferenzen zum Kräftegleichgewicht führen.

Lagerungsalternativen

Wälzlager wassergeschmiert

-Keramiklager erscheinen, wegen ihrer guten Notlaufeigenschaften und ihrer Beständigkeit gegen alle Arten von Schmierstoffen, als erste mögliche Alternative zu Gleitlagern. Jedoch benötigen alle Lager die Ausbildung eines Schmierfilms um den Verschleiß beim Festkörperkontakt der Wälzpartner zu vermeiden. Untersuchungen [4, 5] zeigen, daß sich bei HFA-Flüssigkeiten (Hydraulikflüssigkeiten mit 98% Wasseranteil) kein Schmierfilm aufbaut. Dies wird unter anderem wesentlich von dem Druck-Viskositäts-Koeffizienten beeinflusst. Bei herkömmlichen Schmierstoffen führen die hohen Druckspitzen im Kontaktbereich der Wälzkörper zu einem Anstieg der Viskosität und ermöglichen den Aufbau des Schmierfilms. Dem Wasser fehlt diese Eigenschaft, weshalb die Kraftübertragung im Wälzkontakt hauptsächlich durch Festkörperkontakte erfolgt und abrasiven Verschleiß verursacht. Es gibt Anwendungen in denen Keramiklager ungeschmiert, also trocken laufen. Diese Anwendungsfälle besitzen aber entweder geringe Belastungen oder sehr niedrige Drehzahlen, so daß hier ein Vergleich schwierig ist. Keramiklager sind auch schwierig zu adaptieren, da die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen Welle, Gehäuse und Lager eine Preßpassung, zumindest der Lagerinnenringe, nicht zuläßt. Außerdem sind Keramiklager im Vergleich zu anderen Standardlagern sehr teuer.

-Hybridlager bestehen aus Keramikkugeln und herkömmlichen Wälzlagerstahl. Die Lagerringe sind also nicht rostfrei. Sonderformen mit Lagerringen z.B. aus CRONIDUR sind möglich. Beschichtungen, in der Regel Hartchrom, sind bisher nicht dauerhaft beständig. Vergoldete Lagerringe werden im Instrumentenbau eingesetzt. Dort bestehen aber keine Erfahrungen mit hoch belasteten Lagern. In jedem Fall sind korrosionsfeste Lager nicht im Standardprogramm der Lagerhersteller enthalten, so daß mit einem zusätzlichem Kosten- und Zeitaufwand gerechnet werden muß.

Standardhybridlager sind Spindellager, da dort der Vorteil der geringen Kugelgewichte für höhere Drehzahlbereiche genutzt werden kann. Außerdem zahlt sich dort der geringe Wärmeausdehnungskoeffizient der Keramik aus, was zu konstanteren Lagervorspannungen führt. Schließlich verbessert der hohe E-Modul und die größere Anzahl von Kugeln die

aggressiv, während Kalk die Korrosionsfreudigkeit des Wassers dämpft. Eine passive Maßnahme zur Reduzierung der Kalkablagerungen, wäre dafür zu sorgen, daß die Temperatur im Wasserkreislauf nicht über 60 °C steigt. Eine reduzierte Betriebstemperatur ist auch anzustreben um Kavitation an den kritischen Stellen (z.B. Einspritzbohrungen der Lager) zu vermeiden.

Die Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit der verwendeten Werkstoffe ließe sich durch Inhibitoren im Wasser reduzieren. Diese Additive stellen aber gute Nährstoffe für Bakterien dar und wurden deshalb nicht weiter geprüft.

Aus dem selben Grund wurde auch der Einsatz von Frostschutzmitteln nicht weiter verfolgt.

Für den Teststand wurden folgende Materialien verwendet: Edelstahl für die Rohre, Verschraubungen Filter und den Abscheidebehälter;

Gußbronze und Messing für den Verdichter;

Aluminium für den Kühler.

Für das Serienprodukt sollten einheitliche Materialien verwendet werden. Angestrebt wird die Nutzung von AlSi5Mg.

Lagerdimensionierung

Die Lebensdauer hydrodynamischer Gleitlager ist unbegrenzt, wenn es gelingt einen Schmierpalt aufzubauen, der den Betrieb in Flüssigkeitsreibung gewährleistet. Der Schmierpalt entsteht im keilförmigen Spalt zwischen den Gleitflächen dank der Zähigkeit und Adhäsion des Schmierstoffs. Die Schmierpalthöhe wiederum ist von einer Reihe von Parametern abhängig.

- Viskosität: Ein dickflüssiges Schmiermedium erleichtert die Ausbildung eines genügend großen Schmierpalts führt aber auch zu erhöhten inneren Reibverlusten.
- Winkelgeschwindigkeit: Hohe Drehzahlen verringern die Sommerfeldzahl (Maß für die Belastung, $So > 1$ entspricht Schwerlastbereich) und fördern die Ausbildung des benötigten Schmierpalts.
- Belastung: Eine hohe Belastung führt zu starker Flächenpressung, die in erster Linie durch die Materialauswahl begrenzt wird.
- Oberflächengüte, Formtoleranzen: Bei hohen Oberflächengüten und Formtoleranzen genügen geringere Schmierpalthöhen um Flüssigkeitsreibung zu gewährleisten.
- relatives Lagerspiel: Ein kleines Lagerspiel führt zu erhöhten Reibverlusten, während ein großes Lagerspiel eine ungenauere Wellenführung zur Folge hat.

Um den Schmierpalt nicht unnötig zu reduzieren, ist eine Veränderung der Wellenlage möglichst zu vermeiden. Insbesondere Winkelverlagerung sind kritisch, da hier ein ungleichmäßiger Schmierpalt über die gesamte Lagerbreite entsteht. Außerdem ist die Abschätzung der Tragfähigkeit eines so ungleichmäßigen Schmierpalts bisher nicht möglich. Um Kantenpressung zu vermeiden sollte das Verhältnis von Breite zu Innendurchmesser $b/d < 1$ sein.

Toleranzbetrachtungen

Die in Schraubenkompressoren bestehenden Toleranzanforderungen folgen aus den Wünschen nach bestmöglichen Wirkungsgraden und geringen Geräuschpegeln. Deshalb werden für den Bereich, der die Güte des Abwälz- und Abdichtverhaltens der Rotore definiert, in der Regel die Toleranzen vorgesehen, die fertigungstechnisch machbar und ökonomisch noch vertretbar sind. Für die Fluchtung der Rotore in ihren Lagerbohrungen muß dann noch die Durchbiegung (Bild 1) bei den vorgesehenen Belastungen berücksichtigt werden. Mit diesen Vorgaben wurde untersucht wie groß die Abweichung der Rotor in den jeweiligen Lagerbuchsen sein kann und herausgefunden, daß die Schiefstellung der Rotore den Schmierpalt über der Lagerbreite um maximal 18 Mikrometer verändern. Bei einem empfohlenen relativem Lagerspiel von 1,2 Promille, also 35 Mikrometer, kommt es demnach noch nicht zum Anlaufen der Welle an den Lagerenden.

Radial

Lagersteifigkeit. Die große Härte, die hohen Oberflächengüten der Keramikugeln und die geringe Adhäsion zwischen Keramik und Stahl führen zu günstigen Reibverhältnissen in den Lagern. Dies verbessert die Notlaufeigenschaften bei Mangelschmierung.

Trockenlauf ist bisher aber nur mit langsam laufenden und wenig belasteten Lagern möglich. Erfahrung mit wassergeschmierten Hybridlagern liegen bei den Herstellern nicht vor.

-Edelstahllager aus X65Cr13 und X102CrMo17 zeigen bei Beanspruchung im Kondenswasser-Wechselklima mit schwefeloxidhaltiger Atmosphäre an mechanisch unbelasteten Stellen einen leichten flächigen Korrosionsangriff. Die Oberfläche mechanisch beanspruchter Stellen zeigt sich reaktionsfreudig.

Die Lebensdauer von HFA-geschmierten Rillenkugellagern kann mit **13 % der nominellen Lebensdauer** [4] angenommen werden. Unter Umständen zeigen mit reinem Wasser geschmierten Wälzlager ein noch schlechteres Schmierverhalten.

Wälzlager öl- / fettgeschmiert

Geschmierte Wälzlager müssen immer vom Druckraum mittels Dichtungen und Sperrkammern getrennt werden.

Die einfachste Ausführungsform einer Dichtung stellt dabei der Radialwellendichtring dar. Hier schleift eine vorgespannte Dichtlippe auf der rotierenden Welle. Als bisher ungelöstes Problem sind die Kalkablagerungen an der Dichtlippe zu nennen, die beim Start-Stop-Betrieb des Kompressors nicht vermieden werden können.

Aufwendige Dichtungssysteme, wie gespülte Gleitringdichtungen oder Labyrinthdichtungen mit folgendem Radialwellendichtring erzwingen eine größere Bauweise, sind kostenintensiv und bedingen ein längere Rotorausführungen, was wiederum zu erhöhten Biegebeanspruchungen und Abwälzproblemen der Rotore führt.

Wasserkreislauf / Bioaktivität

Das Kühl- und Schmiermedium Wasser verändert sich im Laufe der Betriebszeit. Schon in Abhängigkeit des Aufstellungsortes und der Jahreszeit treten Schwankungen in der Wasser- und Luftzusammensetzung auf wie sie in Untersuchungen des Umwelt Bundes Amtes [6] dokumentiert sind. Diese Luftveränderungen wurden in den theoretischen Vorüberlegungen als Problem mit nachgeordneter Bedeutung eingestuft und sollen erst in Feldversuchen experimentell untersucht werden.

Die Menge des Wassers wird über die Verdunstung und Kondensation beeinflusst. Bei einem offenen System besteht die Möglichkeit den Ausgleich über eine Niveauregelung auszugleichen. Die Menge des Wasserdurchsatzes richtet sich im wesentlichen nach der angestrebten Temperaturerhöhung während des Verdichtungsprozesses. Daraus ergibt sich auch die Dimensionierung des Abscheidebehälters, der sehr groß ausgelegt wurde, damit sich das Wasser schnell beruhigen bzw. ausgasen kann.

Um Kavitation an kritischen Stellen, wie den Lager und den Schrauben zu vermeiden sollte die Betriebstemperatur unter 60 °C liegen. Außerdem fällt bei höheren Temperaturen verstärkt Kalk aus. Auf der anderen Seite wäre eine Temperatur darüber anzustreben um das Bakterienwachstum zu behindern oder gar die Bakterien zu töten. Die Bakterien könnten auch über Zusätze wie Silberionen abgetötet werden. Allerdings ist nicht auszuschließen, daß sich resistente Bakterienstämme [7] ausbilden. Insbesondere stellen die häufigen Stillstandszeiten ein Problem dar. Da in dieser Phase kein Austausch der Ionen stattfinden kann.

Das Bakterienwachstum kann auch über integrierte Filter, mit denen sowohl Partikel als auch Mikroorganismen dem Kreislauf entzogen werden, verringert werden.

Eine Möglichkeit die Bildung von Biofilmen zu vermeiden ist, die Strömungsgeschwindigkeiten hoch zu halten z.B. mit relativ kleine Querschnitten in den durchströmten Bauteilen. In den schnell durchströmten Bauteilen herrschen dann Scherspannungen die hoch genug sind Partikel von den Wänden zu lösen. Auch hier sind die Stillstandszeiten das Problem.

Die Kontrolle der Stabilität des Wassers erfolgt über PH-Wert und TOC-Messungen (Total Organic Carbon). Außerdem sind verschiedene Schrauben für Untersuchungen so in den Kreislauf eingebracht, daß sie als bevorzugte Plätze zur Ausbildung von Biofilmen dienen sollen. Mit Hilfe dieser Schrauben kann ein Biofilmbildung leicht kontrolliert werden.

Konstruktive Umsetzung

Versuchststand mit Wasserkreislauf

Der Versuchsstand (Bild 3) wurde so konzipiert, daß folgende Parameter variiert und erfaßt werden können.

Drehzahl

Die Drehzahl kann über den mit Hilfe eines Frequenzumrichter angesteuerten Motors stufenlos verändert werden. Dabei sind 8000 Umdrehungen als Obergrenze vorgesehen. Über verschiedene Riemenscheiben auf der Motorwelle und auf der Antriebswelle des Blocks können aber auch Übersetzungen realisiert werden, die den Zugang zu erhöhten Drehzahlbereichen ermöglichen. Die Drehzahl kann direkt am Frequenzumrichter abgelesen werden oder mit Hilfe eines Tachometers an der Antriebswelle abgenommen werden.

Einspritzmenge Block

Die an den Schrauben eingespritzte Wassermenge beeinflusst wesentlich die Betriebstemperatur und den Wirkungsgrad des Verdichters. Mit Hilfe eines Nadelventils, mit nachgeschaltetem Durchflußmesser (Schwebekörperprinzip), können die gewünschten Mengen eingestellt und kontrolliert werden.

Einspritzmenge Lager

Ziel ist die Ausbildung eines Schmierfilms in den Gleitlagern. Dazu muß Schmiermedium in ausreichender Menge zur Verfügung gestellt werden. Die Wassermenge kann auch hier mit Hilfe eines Nadelventils, mit nachgeschaltetem Durchflußmesser, eingestellt und kontrolliert werden.

Einspritzdruck

Der Einspritzdruck ist bei dem hydrostatischem Axiallager bestimmend für die Tragfähigkeit und die entstehenden Schmierpalte. Die im Kreislauf integrierte Pumpe ermöglicht theoretisch Drücke bis zu 120 bar. Diese Drücke werden über ein Druckbegrenzungsschalter auf 12 bar limitiert. Eine Variation des Druckes erfolgt auch hier über das Nadelventil, daß wie eine Drossel wirkt und den Druck dahinter absenkt. Der Druck im Wasserkreislauf kann an verschiedenen Stellen kontrolliert werden.

Luftdruck

Der Luftdruck im Kompressor ist entscheidend für die Belastungen der Lager. Durch das innere Verdichtungsverhältniss des Kompressors sind die Lager auch im Leerlauf etwas (ca. 600 N) belastet. Ein ansteigen des Luftdrucks wird über einen Kugelhahn durch das Verringern der Auslaßmenge eingestellt. Ein Sicherheitsventil verhindert dabei, daß der Druck über 15 bar ansteigt.

Betriebstemperatur

Die Betriebstemperatur des Wasser sollte unter 60 Grad Celsius bleiben. Um die Temperatur zu variieren, können am Kühler zwei Ventilatoren separat zugeschaltet werden und es kann die Einspritzmenge am Block verändert werden. An verschiedenen Stellen im Kreislauf sind Temperatursensoren zur Kontrolle angebracht.

Weiterhin können der eingebrachte Drehmoment, die abgebende Motorleistung und die geförderte Luftmenge erfaßt werden.

Der Wasserkreislauf konnte wie folgt kontrolliert werden:

Ein Meßrohr am Abscheidebehälter ermöglicht das Ablesen des aktuellen Wasserstands.

Eingebrachte Schrauben können an verschiedenen Stellen jederzeit ausgetauscht werden und auf möglichen Bewuchs von Biofilm untersucht werden.

Eine Probenentnahme des Wassers ist an diversen Stellen des Kreislaufes möglich. Mit den Wasserproben soll dann der aktuelle PH- und TOC-Wert ermittelt und eine Aussage über die Bioaktivität des Wassers gemacht werden.

In dem Wasserkreislauf wurden ein Grob- und ein Feinfilter integriert (8µm und 1µm Partikel). Damit sollte vermieden werden, daß Fremdkörper in die Lager oder Schrauben gelangen und dort erhöhten Verschleiß verursachen. Dies sind außerdem die geeigneten Stellen für die

Entnahme der Wasserproben zur TOC-Untersuchung, da sich in den Filtern auch die Nährstoffe ansammeln.

Um den Wasserverbrauch und damit mögliche Austauschzyklen zu reduzieren, wird das Kondensat dem Kreislauf wieder zugeführt.

Die Anlage wurde mit 60 Liter Wasser befüllt. Dabei wurde zur Hälfte Leitungswasser und zur anderen Hälfte enthärtetes Wasser verwendet.

Labormuster Schraubenblock

Die konstruktive Umsetzung des Schraubenblocks (Bild 7), geschah nach einer Marktanalyse, die den gewünschten Einsatzbereich in einer Leistungsklasse von 15-30 KW sieht, was einer Fördermenge von ca. 4,5 m³/min bei ca. 10 bar entspricht.

Somit konnte auf Erfahrungen aus der Produktpalette des Hauses aufgebaut werden und z.B. das Schraubenprofil übernommen werden.

Jedoch mußten auch die Rotore modifiziert werden, da die neuen Werkstoffe infolge ihres kleineren E-Moduls größere Durchbiegungen bedingen. Die verwendete Bronze mußte außerdem die Beschichtung der Lagerzapfen ermöglichen, da sonst Abrieb und Verschleiß im Lager wegen der hohen Belastung nicht zu vermeiden wäre. Auf die Beschichtung im Bereich der Schrauben wurde verzichtet, da dort nur stark reduzierte Kräfte angreifen.

Ein weiterer Konstruktionsschwerpunkt war die Adaption der Lagerbuchsen und die Gestaltung der Schmierzufuhr. Da Keramik Druckspannungen gut verträgt und empfindlich auf Zugspannungen reagiert, wurde eine leichte Preßpassung für die Lagerbuchse gewählt. Die Spannungen in der Lagerbuchse, die durch die Preßpassung hervorgerufen werden, reduzieren sich während des Betriebs des Kompressors, da sich die Bronze stärker ausdehnt als die Keramik. Unnötige zusätzliche Spannungen können wegen der hohen Fertigungsgüte der SiSiC-Buchsen vermieden werden, da hohe Fertigungstoleranzen nur geringe Schwankungen der Einbauspannungen verursachen.

Die Gestaltung der Wasserzufuhr konnte so realisiert werden, daß lediglich eine Anschlußleitung die Versorgung aller Lager realisiert. Dabei ist im Anlauf eine Pumpe vorgesehen um den benötigten Druck im Wasserkreislauf sicherzustellen. Wenn der Betriebsdruck erreicht ist kann die Pumpe ausgeschaltet werden.

Bei der Konstruktion des Verdichtergehäuses aus Bronzeguß mußten besonders die hohen Schwundmaße beachtet werden.

Die Festlegung der Toleranzen an den funktionbestimmenden Stellen des Kompressors wurden an den bestehenden Produkten angelehnt und richten sich danach, was fertigungstechnisch und ökonomisch machbar ist.

Bei dem ausgeführten Labormuster wurde außerdem dafür Sorge getragen, daß ein schneller Ausbau der Lager und Rotore möglich ist, um sie für Verschleißuntersuchungen und für Modifikationen leicht zugänglich zu machen.

Außerdem wurden Teile aus dem Standardprogramm, wie der Grundregler, die Steuereinheit und der Ansaugluftfilter (Typ C100) übernommen, so daß zusätzliche Kosten und Fehlerquellen vermieden werden konnten.

Versuchsreihen

Radiallager

Die Lager werden auf dem Teststand (Bild 8) mit Hilfe einer veränderlichen Riemenspannung radial belastet. Die Versorgung mit Schmierstoff geschieht über eine separate Pumpe. Das Wasser wird im Kreislauf geführt. Als erstes wurde eine genutete Kunststoffbuchse gegen eine Welle aus Aluminiumoxid getestet. Dabei kam es zu Verschleiß in der Buchse und zu kleine Ausbrüche auf der Welle (Kavitation). Mit einem modifizierten Versuch, die Buchse wurde ohne Nut ausgeführt, konnten die Ausbrüche auf der Welle vermieden werden, die Verschleißerscheinungen blieben jedoch. Die Kunststoffbuchse wurde deshalb durch eine SiC-Buchse ersetzt. Um ein schnelleres Aufschwimmen der Lager zu erlangen wurden zudem 2 Zulaufbohrungen in die Buchse eingebracht. Der Verlauf der Wellenmittelpunktslage in Abhängigkeit der Belastung ist in Bild 9 zu sehen.

Dabei zeigt sich, daß die entstehenden Schmierpalte unter den empfohlenen 9 Mikrometer liegen. Es wurden 1000 Stunden mit 10 bar und 7340 Umdrehungen pro Minute ohne erkennbaren Verschleiß bewältigt. Das kann nur mit den Reibungseigenschaften der SiC-Keramik erklärt werden, die es offensichtlich erlauben, solche Lager auch im Mischreibungsgebiet dauerhaft zu betreiben.

Axiallager

Die Axiallager erlauben eine geringe axiale Verschiebung der Rotore in Abhängigkeit von der jeweiligen Belastung. Die axialen Kräfte schwanken im Betrieb aber nur in einem kleinem Bereich, so daß auch mit den relativ großen Spiel die Funktion des Kompressors gewährleistet ist. Bild zeigt den Zusammenhang der Spaltveränderung zur Belastung. Die Axiallager wurden 110 Stunden bei 7 bar und 6600 Umdrehungen pro Minute ohne erkennbaren Verschleiß getestet.

Labormuster Verdichteranlage

Die Test mit dem Schraubenblock führten besonders in der Anfangsphase zu unvorhergesehen Schäden an den Bauteilen.

So mußte als erstes das zu geringe Axialspiel des Rotors vergrößert werden um ein Berühren mit dem Gehäusedeckel zu vermeiden. Das benötigte Axialspiel wird bestimmt durch die Druckdifferenzen und Spalte des Axiallagers (Bild 10). Da im Leerlauf geringere axiale Kräfte herrschen als unter Vollast stellen sich je nach Betriebsart verschieden große Spalte ein. Daraus folgt, daß der Spalt zwischen Rotor und Gehäuse mindestens so groß sein muß wie der größte Spalt im Axiallager und Abweichungen durch Fertigungstoleranzen.

Ein weiteres Problem war die gewünschte Integration der Drehmomentenmeßwelle, die sowohl zur Kraftübertragung wie auch zur Krafterfassung gedacht war. Sie mußte wieder entfernt werden, da es nicht gelang die Meßwelle genau genug auszurichten. Dies bedingte radiale Ausschläge von bis zu 40 Mikrometer und führte zu Ausbrüchen an den Einspritzbohrungen der Radiallager. Der eingebrachte Drehmoment wird nun direkt über den Frequenzumrichter kontrolliert. Der Hauptläufer wurde dann über eine Riemenscheibe angetrieben, was die auf dem Markt gängige Art ist. Dadurch werden aber insbesondere die Lager auf der Saugseite des Hauptläufers mit den Spannkraften des Riemens zusätzlich beansprucht. So entstanden bei diesem Lager Rattermarken in Richtung der Keilriemenkräfte. Schließlich wurde der Antrieb direkt mittels einer Bogenzahnkupplung vorgenommen, die in der Lage ist radiales Spiel und einen Winkelversatz der Wellen auszugleichen. Damit konnten erstmals Belastungen von 7 bar bei 5500 Upm realisiert werden.

Weiteres Vorgehen

Die bisherigen Versuche haben gezeigt, daß ein wassereingespritzter Schraubenkompressor realisierbar ist. Es gilt nun die erzielten Ergebnisse in ein marktgerechtes Produkt zu überführen. Dazu ist eine Kostenreduzierung erforderlich und es müssen die Ergebnisse langfristig bestätigt werden.

Eine Kostenreduzierung bietet sich an folgenden Stellen an:

- Das hydrostatische Axiallager sollte hydrodynamisch ausgeführt werden. Dadurch ließe sich die Pumpe im Wasserkreislauf, die den Druckaufbau im Lager während des Anlaufs sicherstellt, einsparen. Da Keramiklager durchaus zeitweise im Mischreibungsbereich betrieben werden können steht einer zügigen Umsetzung nicht im Weg.
- Vergrößerte Fertigungstoleranzen könnten die Produktionskosten der Bauteile erheblich reduzieren. Die Toleranzen wurden von den öleingespritzten Schraubenkompressoren übernommen. Wie sich jedoch das Zusammenspiel der einzelnen Bauteile mit dem Schmiermedium Wasser auf die wirklich benötigten Toleranzen auswirkt, müßte noch experimentell geklärt werden.
- Vergrößerte Fertigungstoleranzen ließen sich z.T. mit winkelverstellbaren Lagerhalterungen ausgleichen. Dabei wäre zu prüfen ob eine solche Halterung nicht wieder mehr Kosten verursacht als sie einspart.
- Eine auf Kosten bezogene optimierte Werkstoffauswahl birgt weitere erhebliche Einsparungspotentiale. Die bisherigen Test zeigen, daß die Korrosionsproblematik nicht so kritisch ist. Hingegen müssen die Werkstoffe der Rotore auf ihr verschleißverhalten optimiert werden. Dort stehen preiswerte Beschichtungsverfahren und kostengünstige Trägerwerkstoffe zur Verfügung (Ck45 mit NIFLOR-Schicht).
- Die Gleitlager sind weitestgehend unempfindlich gegen kleine Partikel. Dadurch könnte zumindest der Feinfilter entfallen.

Zudem sollten weitere Druckbereiche erschlossen werden, um ein größeres Marktsegment abdecken zu können. Dabei erscheint der Weg mit Lagerbuchsen und Hülsen aus Keramik als vielversprechend.

Eine Bestätigung der bisherigen Ergebnisse müßte durch zusätzliche Feldversuche mit weiteren Anlagen unter verschiedenen Einsatzbedingungen erbracht werden.

Fazit

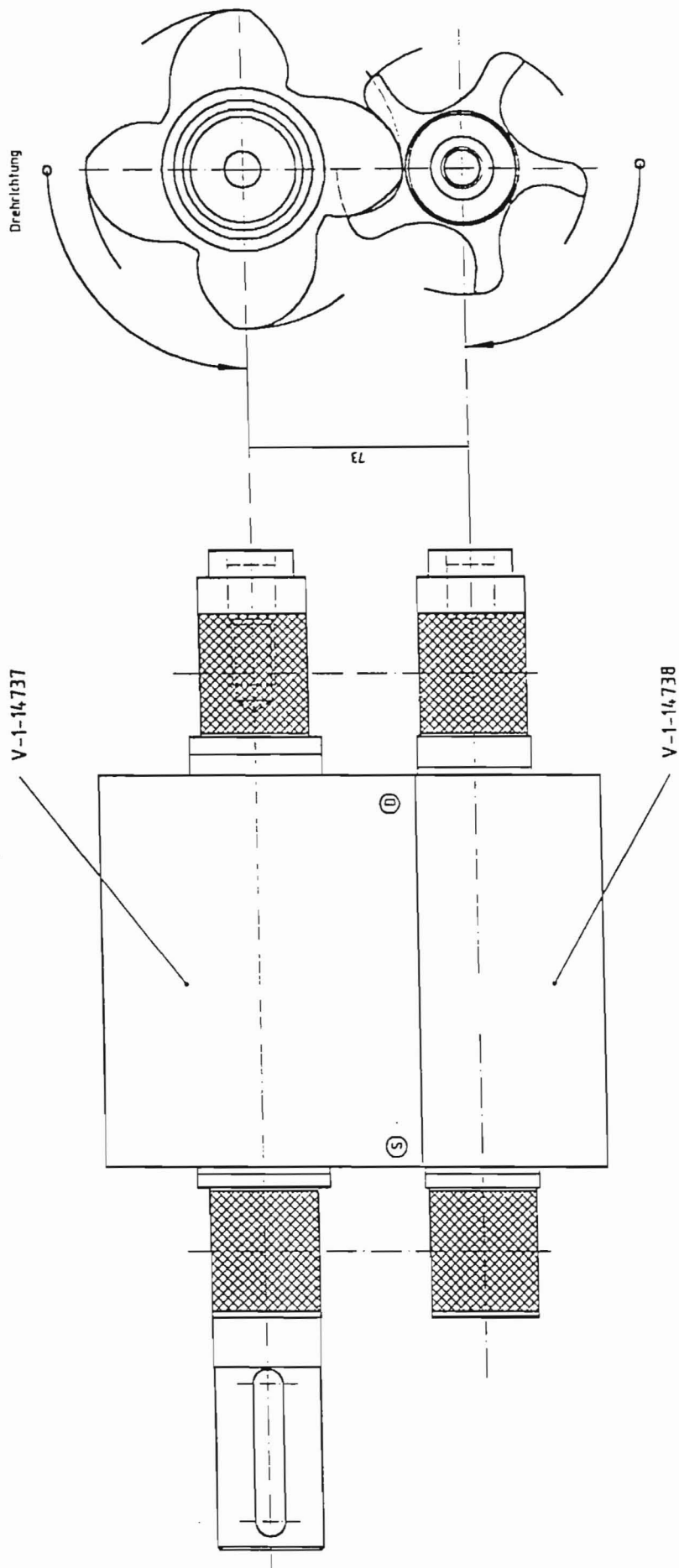
Die in diesem Projekt gemachten Untersuchungen zeigen, daß eine wassergeschmierte Gleitlagerung realisierbar ist. Alternative Lösungen mit fett- oder ölgeschmierten Lagern scheitern immer wieder an den durch Kalkablagerungen zerstörten Dichtungen. Somit stellt die Lagerungsproblematik den Schlüssel für die Realisierung eines marktfähigen wassergeschmierten Schraubenkompressor dar. Nachgeordnete Bedeutung haben die Materialfrage und die Frage des Wasserkreislaufs.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN 31652 Berechnung von hydrodynamischen Radial-Gleitlagerauslagern
- [2] Lang und Steinhilper Gleitlagerberechnung
Springer Verlag
- [3] K. Kauder; Tribologische Problem in Schraubenmaschinen
In Tribologie in der Forschung und Antriebstechnik (1992)
Berlin: Technik und Kommunikationsverlag
- [4] Werries, H.: Korrosionsbeständige Wälzlager in
wasserhaltigen Hydraulikflüssigkeiten,
Dissertation 1995 / Uni Hannover
- [5] Guide for Calculating the Life of Ball Bearings when
used in Contact with Fire resitant
Hydraulik Fluids. BSI (British Standard Institution) PD 6487 (1979).
- [6] Umweltbundesamt: Luft kennt keine Grenzen; Berlin 94
Druckhaus Schmergow GmbH
- [7] Dr. Hans-Curt Flemming, Biofouling auf Ionentauschern,
Willy-Hager-Stiftung 91

Verzeichnis von Bildern und Zeichnungen

Bild 1 Durchbiegung	18
Bild 2 Lagerbuchse	19
Bild 3 Lagerscheibe	20
Bild 4 Laufscheibe	21
Bild 5 Druckscheibe	22
Bild 6 Teststand-Verdichteranlage	23
Bild 7 Schnittzeichnung Block	24
Bild 8 Lager-Teststand	25
Bild 9 Schmierpalt radial	26
Bild 10 Schmierpalt axial	27



- Ⓢ Saugseite Inlet side
- ⓓ Druckseite Discharge side
Verzahnungsangaben nach R.1-12008

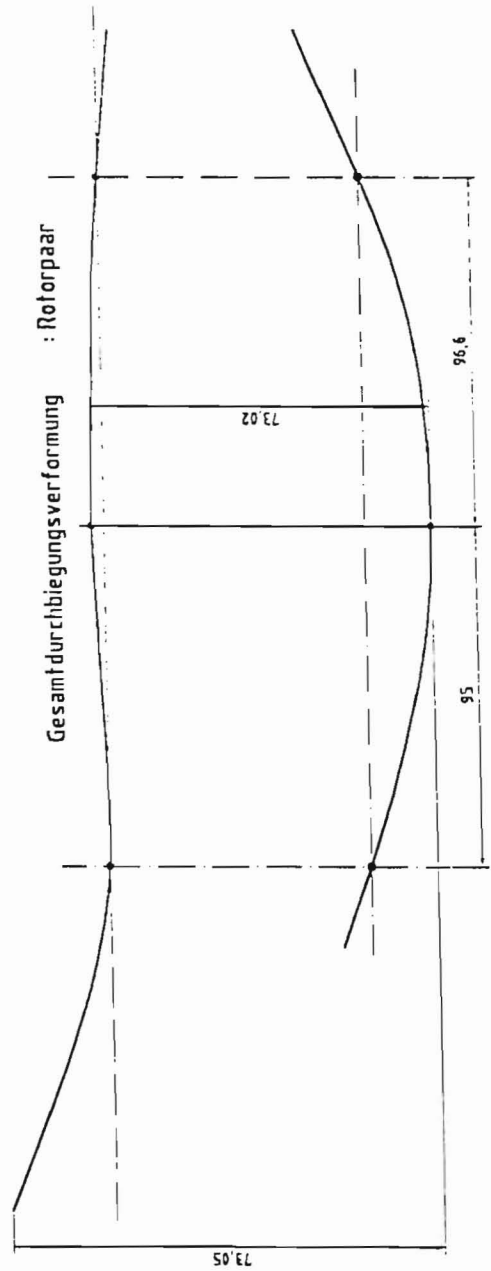
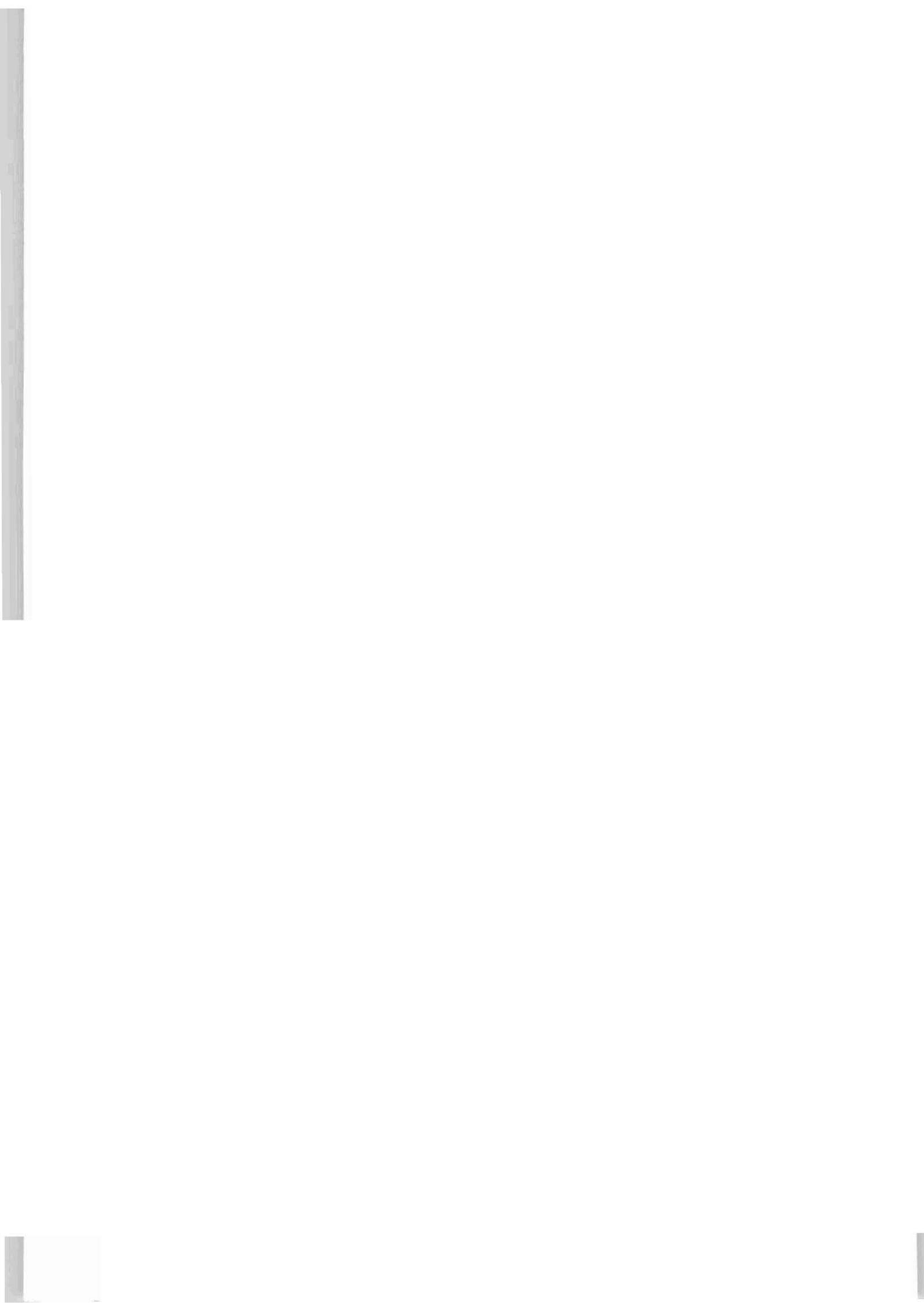
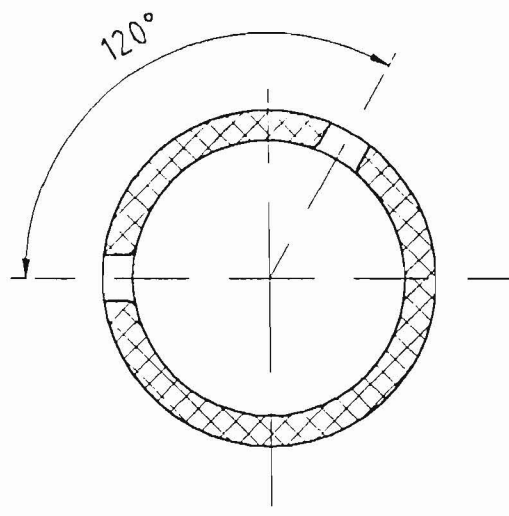
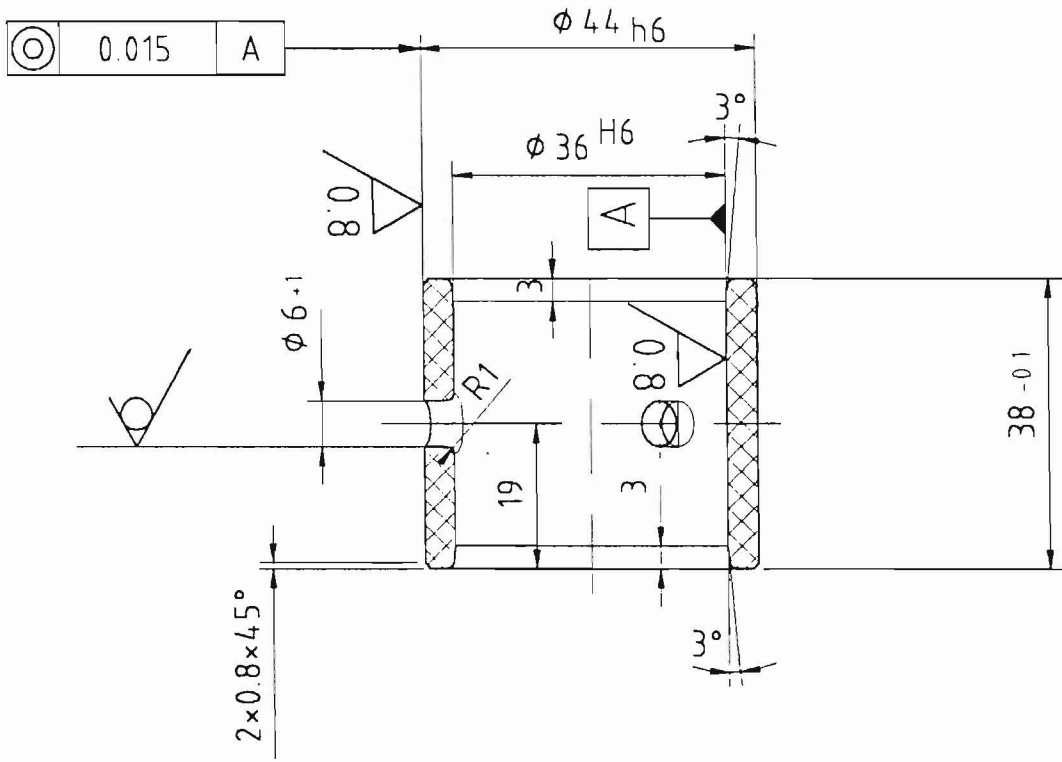


Bild 1 Durchbiegung des Rotorpaars

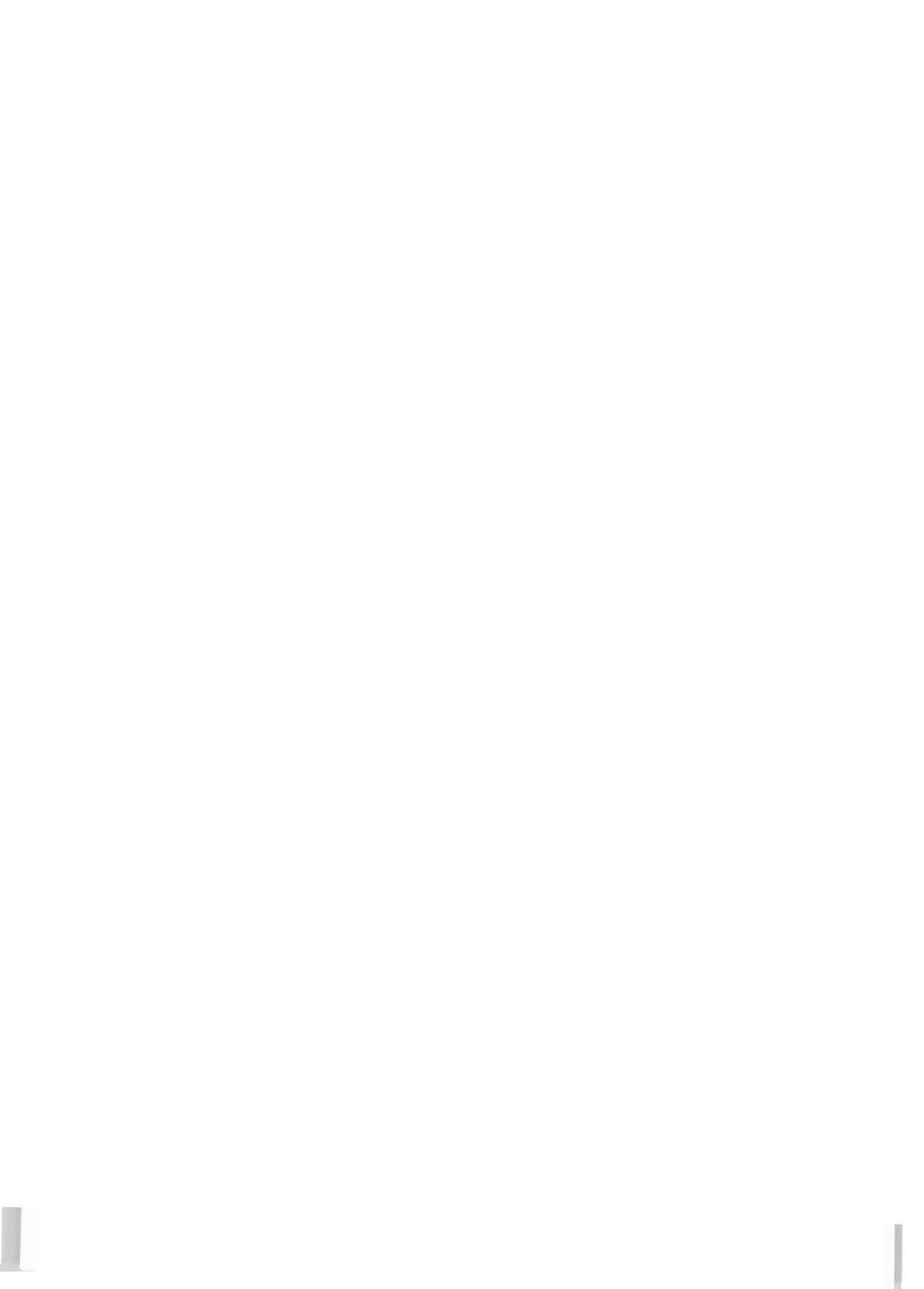


3.2 / (0.8)



Breitenverhältnis $B/D = 32/36 = 0,89$

Bild 2 Lagerbuchse



12.5 / 0.8

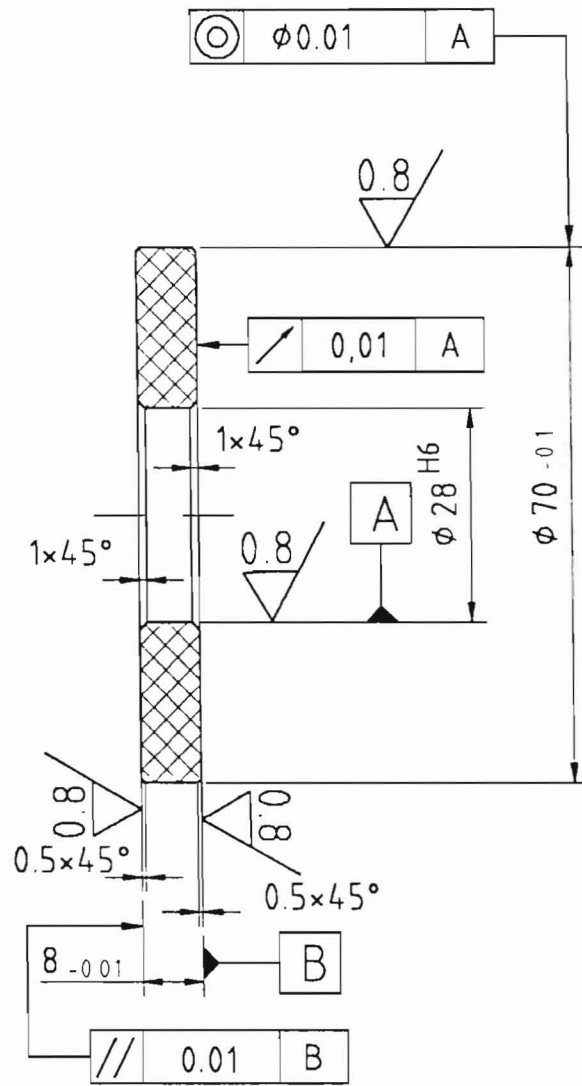
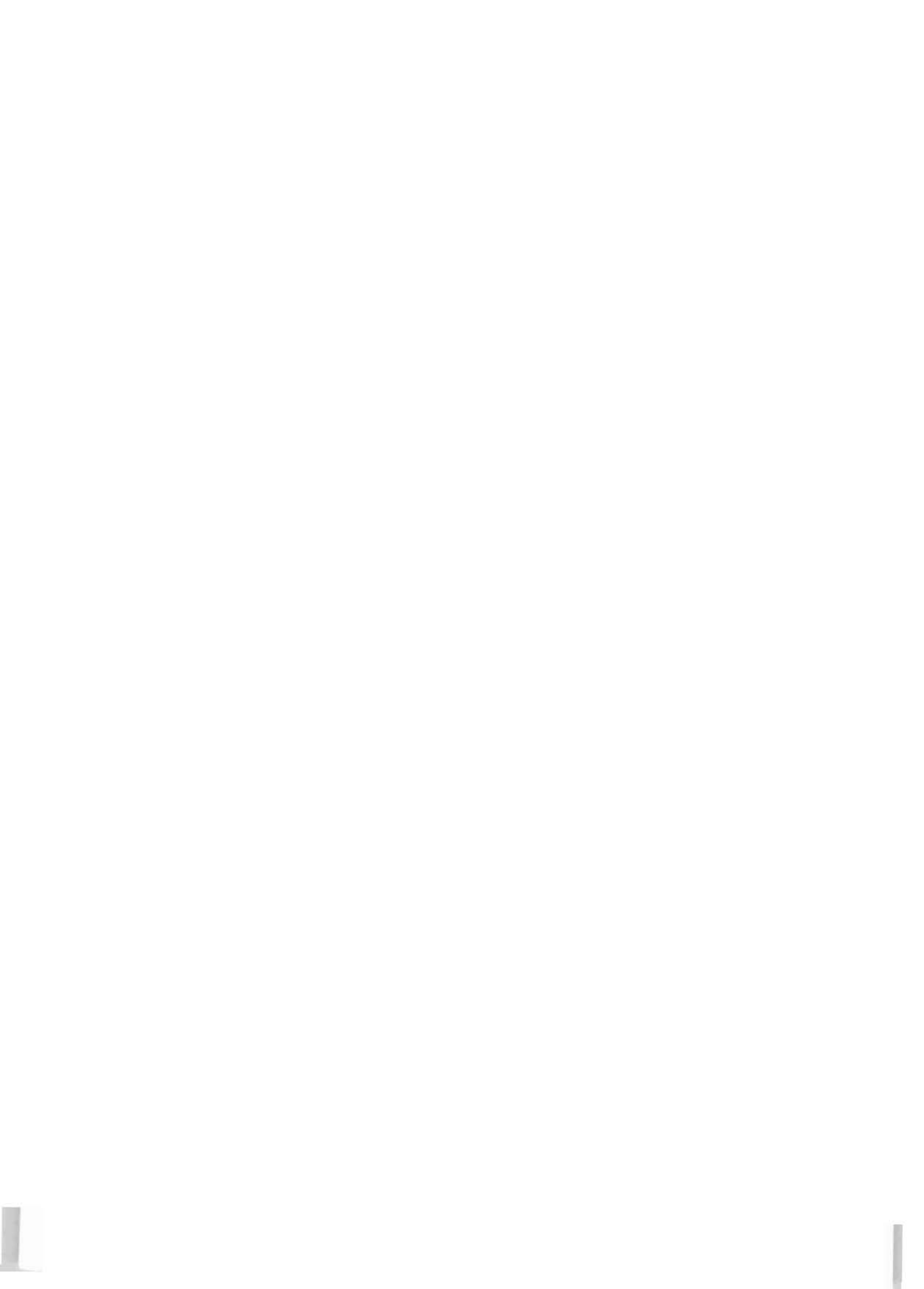
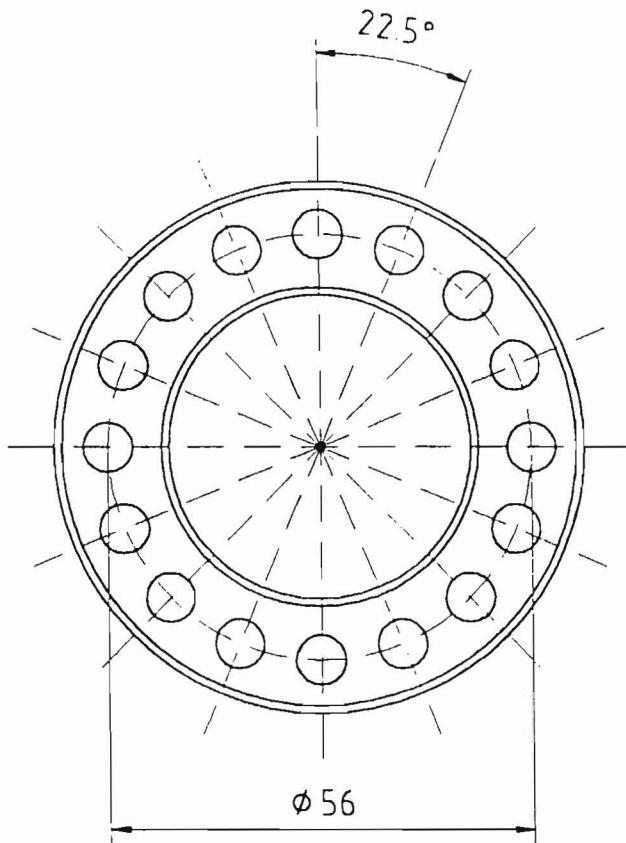


Bild 3 Lagerscheibe
- 20 -





12.5 / (0.8 /)

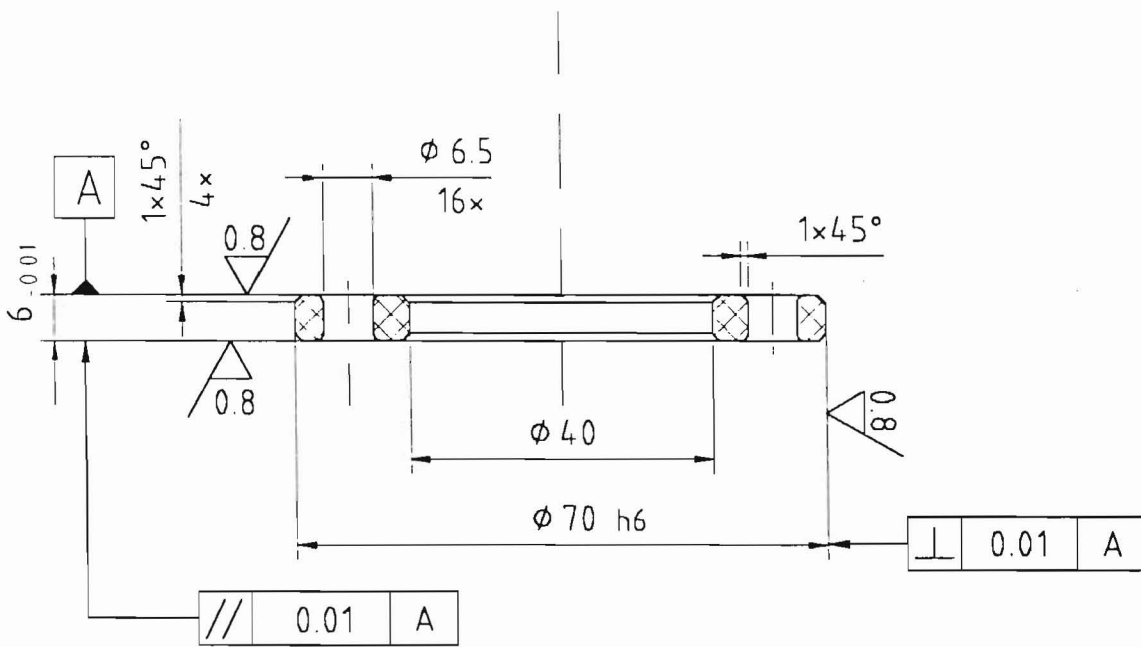


Bild 4 Laufscheibe



12.5 / (0.8 /)

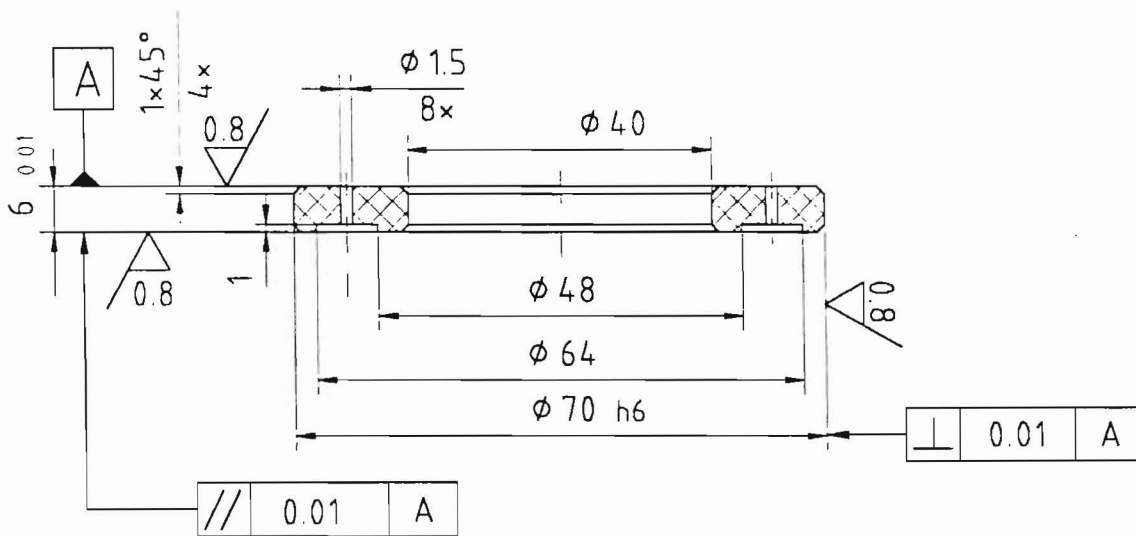
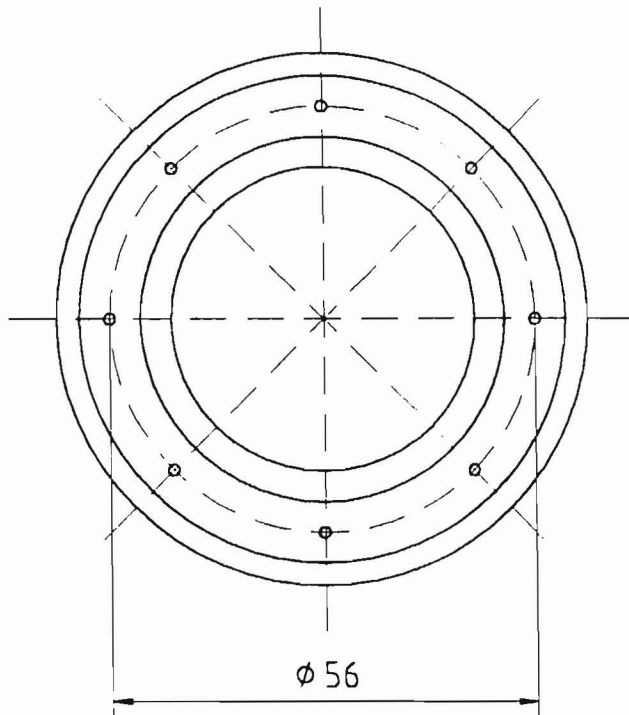


Bild 5 Druckscheibe
- 22 -



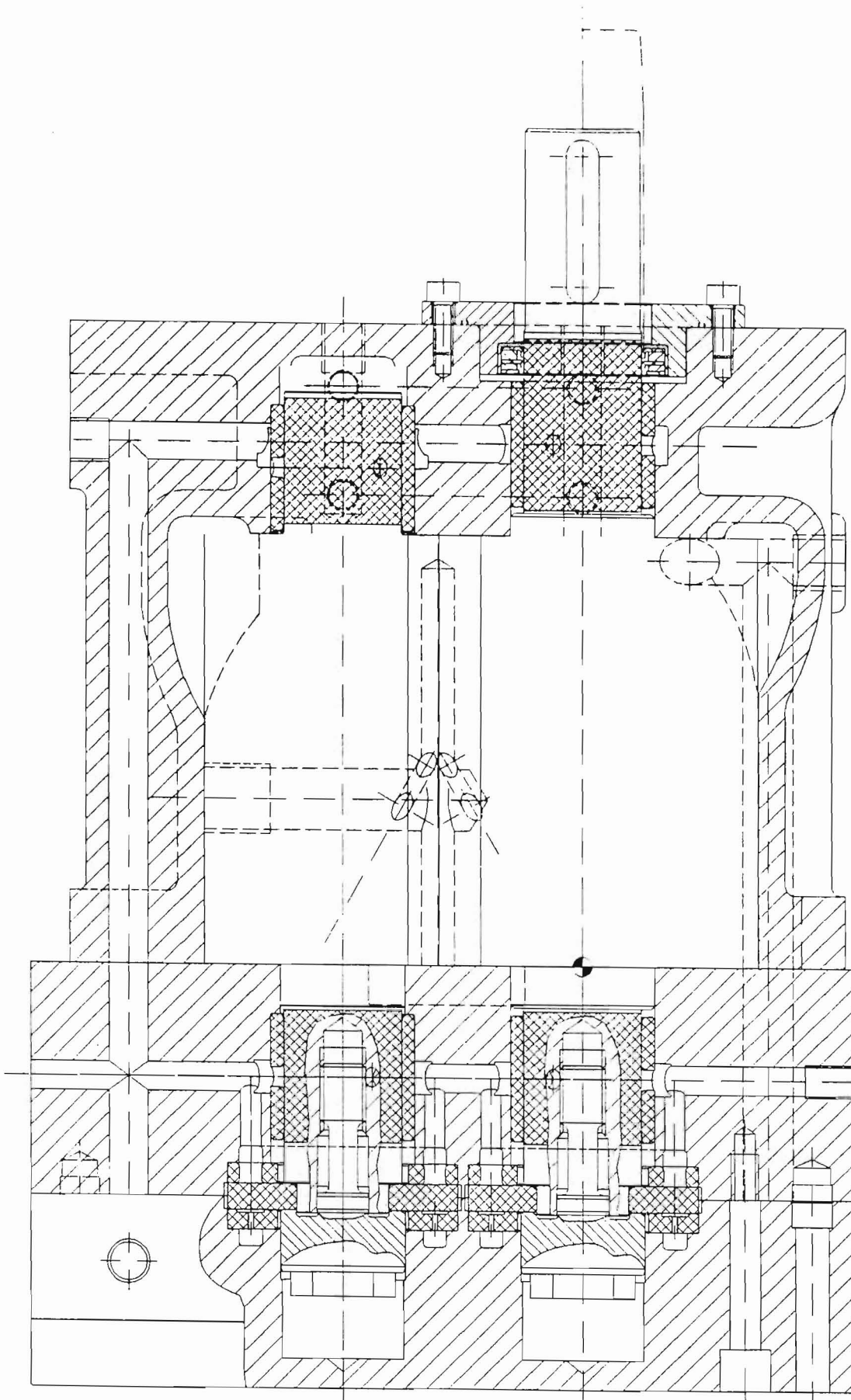


Bild 7 Schnittzeichnung Block



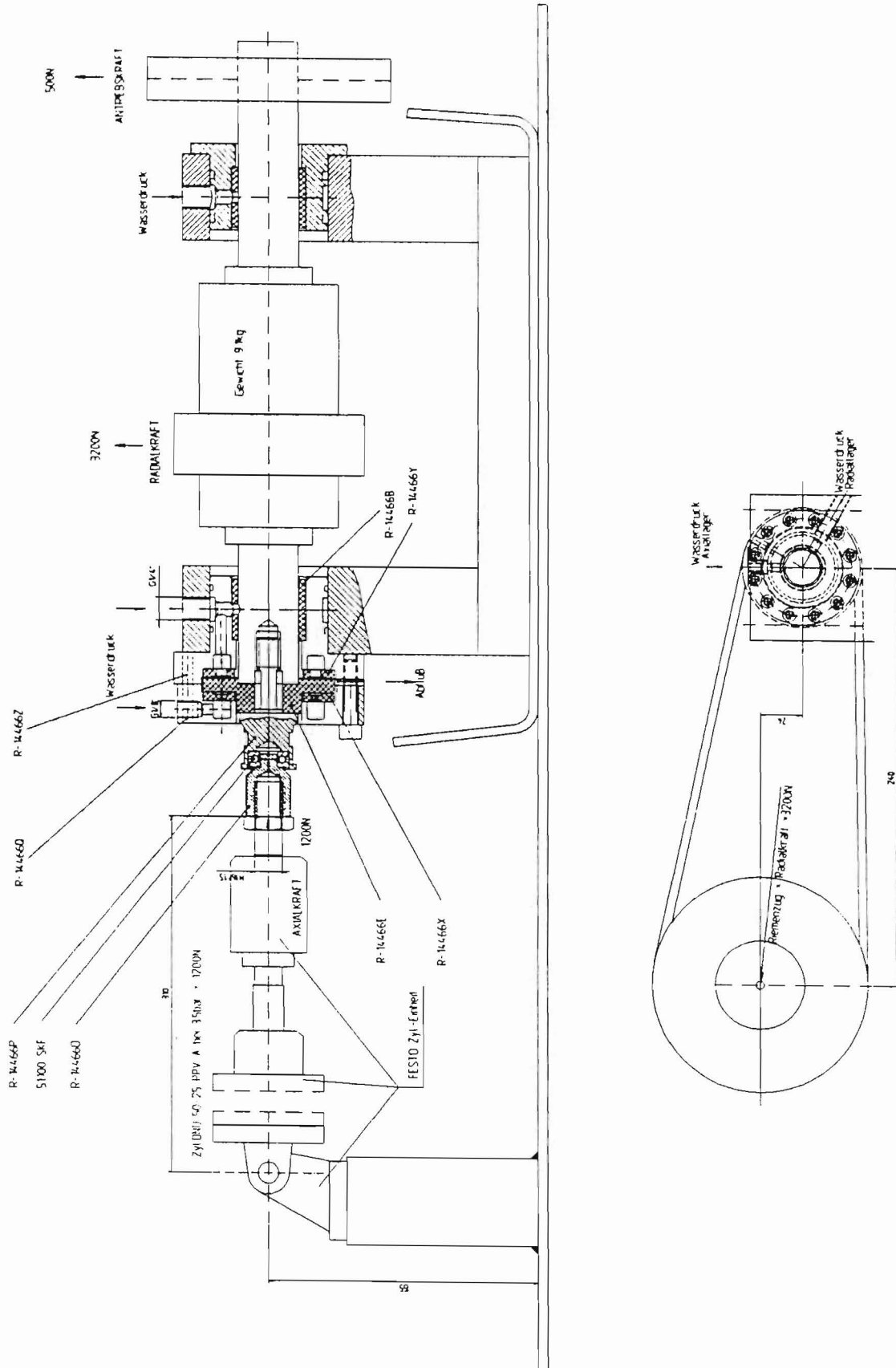


Bild 8 Lagerteststand
- 25 -



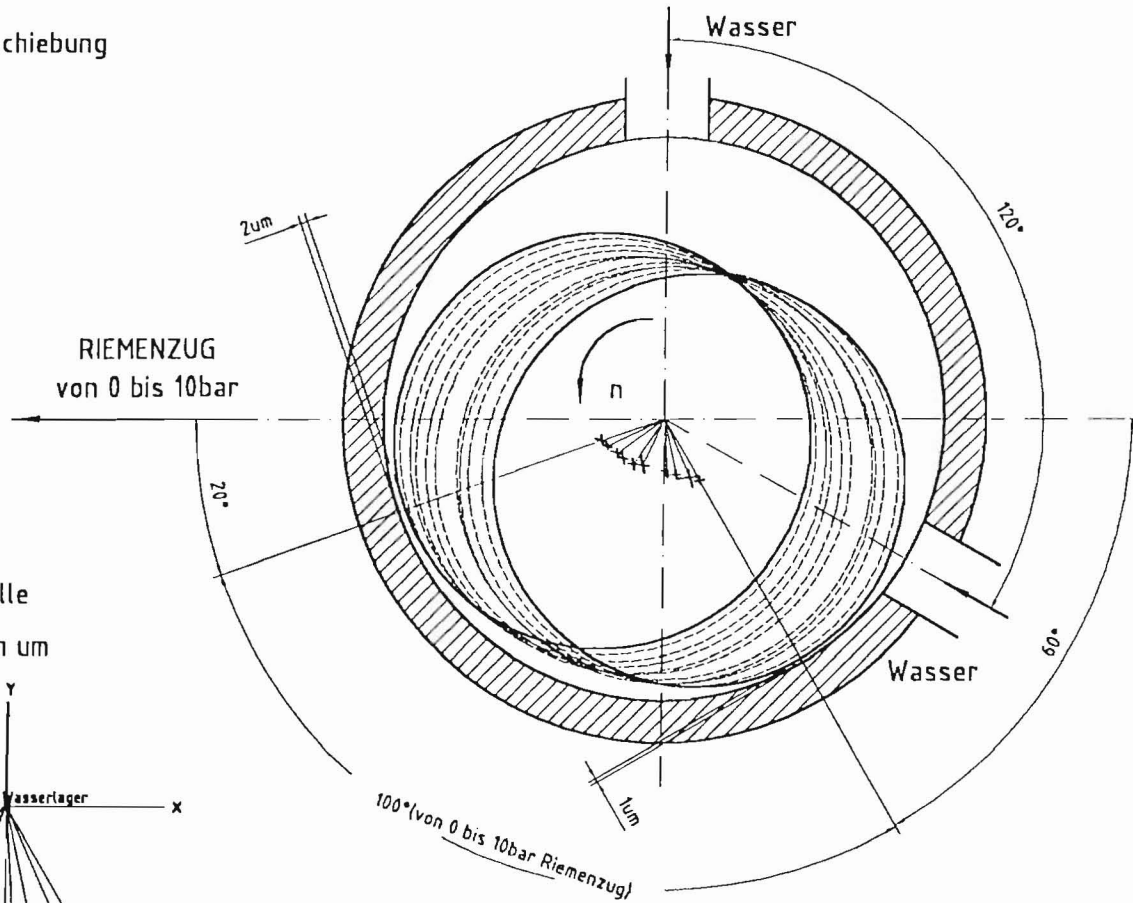
Hydrodynamische Schmierspaltverschiebung

von 0 bis 10 bar Riemenzug

Wasserdruck 20 bar

Drehzahl 7000 1/min.

Lagerspiel 35µm



Mittelpkt.-verschiebung der Rotorwelle

von 0 bis 10bar Riemenzug

in µm

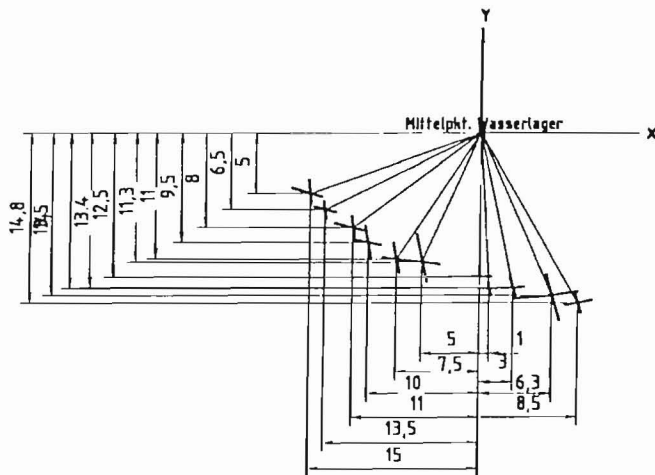


Bild 9 Schmierspalt radial



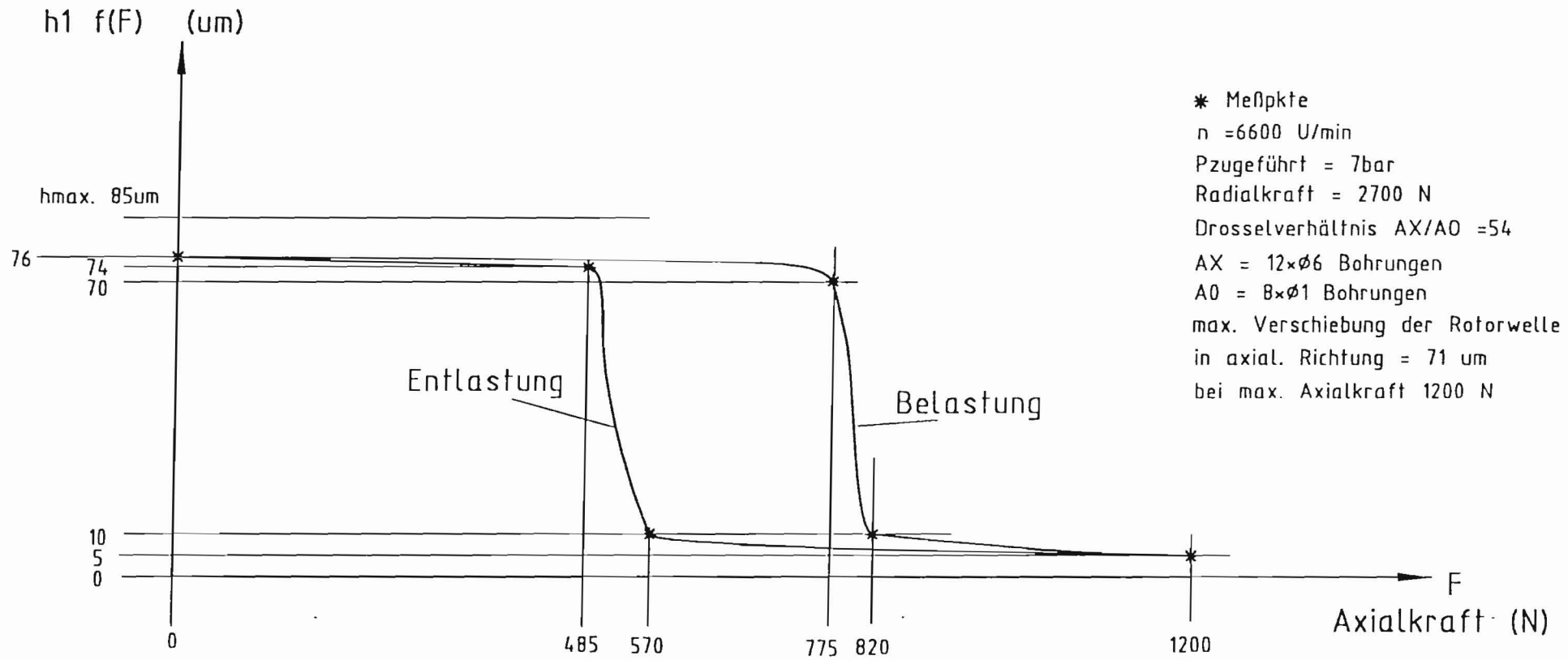


Bild 10 Schmierspalt axial
- 27 -

