

zur Kontrolle der Anzeige des Betriebsmanometers und des für den Motor erforderlichen Mindestöldrucks geeignet ist, liefert die Ölstrommessung bei Einhaltung eines bestimmten Meßregimes Aussagen über den mittleren Verschleiß der am Schmierölkreislauf angeschlossenen Lagerstellen. Dieses Verfahren mit der entsprechenden Gerätevariante wird für die landtechnische Praxis als geeignet eingeschätzt.

Zur gleichzeitigen Messung von Ölstrom und Öldruck wird eine Kombination von elektrischen Meßwertaufnehmern vorgestellt. Dieses Verfahren ist ebenfalls zur Lagerspieldiagnose geeignet und bietet einige anwen-

dungstechnische Vorteile. Es befindet sich gegenwärtig im Erprobungsstadium.

Literatur

- [1] Wohlbe, H. u. a.: Überprüfung von Traktoren und Lastkraftwagen. Ing.-Büro für vorbeugende Instandhaltung Dresden 1975.
- [2] Thum, E.: Die technische Restnutzungsdauerprognose als Mittel zur Rationalisierung der landtechnischen Instandhaltung. Karl-Marx-Universität Leipzig, Habilitationsschrift 1968.

- [3] Fenske: Demontageleise Verschleißzustandsbestimmung. VEB Dieselmotorenwerk Schönebeck/E., Themenabschlußbericht 08-00.02-76.
- [4] Balusinski, J.; Kutscherek, E.: Beurteilung des technischen Zustandes von Kurbelwellengleitlagern ohne Demontage des Motors. Warszawa, Forschungsarbeit 1968 (Übersetzung der Versuchs- und Entwicklungsstelle des Kraftverkehrs Dresden).
- [5] Maack, H.-H.; Troppens, D.: Verfahrenssystematisierung Technische Diagnostik. Universität Rostock, Sektion Landtechnik, Abschlußbericht 1975.
- [6] Schleede, H.: Testung einer Ölstrom-Öldruck-Meßeinrichtung. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Landtechnik, Diplomarbeit 1976. A 1599

Lässigkeitsverluste in Axialkolbenpumpen

Hochschul.-Gertraud Wolff, KDT, Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Landtechnik

Die hydraulischen Antriebe haben auch im Landmaschinenbau in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Eine Analyse der technischen Entwicklung im internationalen Landmaschinenbau zeigt, daß überall an der Schaffung spezialisierter leistungsfähiger Landmaschinen gearbeitet wird. Besonders weit fortgeschritten ist diese Entwicklung bei den Maschinen für die Halmfrüchtere. Für den Mähdrescher ergibt sich ein kompliziertes Belastungs-Bewegungs-Verhalten, das aus der Doppelfunktion dieser selbstfahrenden Landmaschine resultiert. Einmal ist die Funktion eines vollwertigen Fahrzeugs zu erfüllen und zum anderen die Funktion einer Halmfrüchtermaschine (Mähen, Transportieren, Dreschen, Trennen und Ausgabe der Ernteprodukte). Aufgrund dieser Anforderungen lassen sich die angewendeten hydraulischen Ausrüstungen moderner Landmaschinen in zwei Gruppen teilen, nämlich in die Arbeitshydraulik und in die Fahrhydraulik. Die weiterentwickelten Landmaschinen, wie der Mähdrescher E 516, sind

mit einem hydrostatischen Fahrtrieb ausgerüstet. Die Begründung für diesen Schritt ergibt sich aus den Vorteilen des stufenlosen hydrostatischen Antriebs, aus der Bedienerleichterung für das Fahrpersonal und aus der Freizügigkeit der Anordnung (neue Anordnungs- und Einbaumöglichkeiten bei minimaler Behinderung des eigentlichen technologischen Prozesses in der Maschine). Nachteilig wirkt sich dagegen aus, daß hydrostatische Fahrtriebe schlechtere Wirkungsgrade und höhere Herstellungskosten als mechanische aufweisen.

Als Verdrängeraggregate (Hydraulikpumpe und -motor) werden im hydrostatischen Fahrtrieb ausnahmslos Axialkolbenaggregate (Bild 1) eingesetzt. Bei der Entwicklung der Axialkolbenaggregate ist eine Tendenz zur Steigerung der Betriebsdrücke zu verzeichnen, damit das Masse-Leistungs-Verhältnis geringer wird. Das erfordert wiederum zur Verringerung der Lässigkeitsverluste besonders enge und damit schmutzempfindliche Dichtspalte zwischen den bewegten, an der Flüssigkeitsförderung betei-

ligten Elementen. Wie sehr gerade ein hoher Betriebsdruck z. B. einer Pumpe die Schmutzempfindlichkeit vergrößert, wird im Bild 2 verdeutlicht [1].

Axialkolbenaggregate sind also komplizierte technische Gebilde, die hohe Ansprüche z. B. an die Qualität des Öls und an die Qualifikation des Bedien- und Instandsetzungspersonals stellen. Jeder Ausfall ruft wegen des Kampagnecharakters der landwirtschaftlichen Produktion erhebliche Störungen und Unterbrechungen des Produktionsablaufs hervor. Da aber Hydraulikaggregate besonders in Landmaschinen wegen der ungünstigen Betriebsbedingungen hohen Beanspruchungen ausgesetzt sind, wird ihre Betriebstauglichkeit weniger durch kurzzeitige Überlastung als vielmehr durch hohe Verschleißbeanspruchung gemindert [1]. Häufig existieren aber noch Unklarheiten über

- Arten und Grad des Verschleißes, dem die einzelnen Bauelemente unterliegen
- Verschleißursachen
- Auswirkungen der Schädigung auf das Betriebsverhalten der Axialkolbenaggregate.

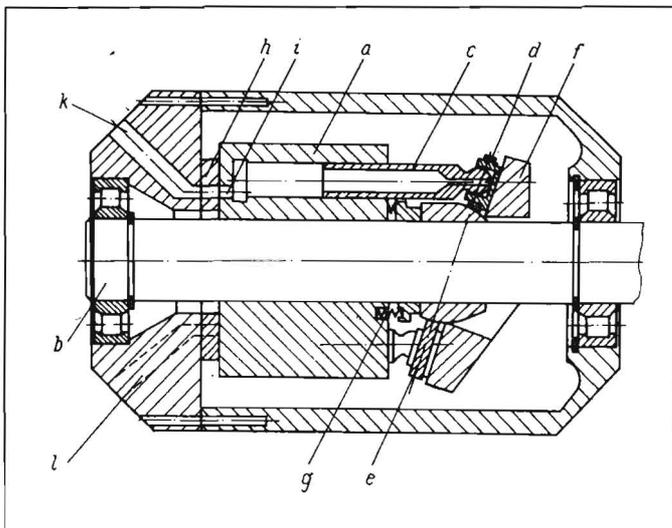


Bild 1. Axialkolbenpumpe der Schrägscheibenbauform (schematisch):
 a Zylindertrommel, b Antriebswelle, c Kolben, d Gleitschuh, e Andrückplatte, f Schrägscheibe, g Feder, h Steuerspiegel, i Steuerscheibe, k Saugleitung, l Druckleitung

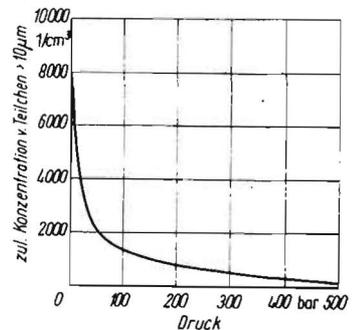


Bild 2. Zulässige Verschmutzung als Funktion des Systemdrucks für eine Pumpe bei gleicher Grenznutzungsdauer (nach [1])

1. Zur Entstehung der Lässigkeitsverluste

Am Beispiel der Axialkolbenpumpe soll zunächst die Frage geklärt werden, welche Arten von Verlusten auftreten können.

Die Leistungsverluste von Axialkolbenpumpen setzen sich wie bei allen Pumpenarten aus mechanischen Verlusten, Lässigkeitsverlusten und Strömungsverlusten zusammen. Da für den Anwender die Größe des Wirkungsgrades von Bedeutung ist und die Lässigkeitsverluste einen der bedeutendsten Einflußfaktoren auf die Größe des Wirkungsgrades darstellen, soll nachfolgend die Auswirkung der Schädigung auf die Größe der Lässigkeitsverluste einer Axialkolbenpumpe der Schrägscheibenbauform (Bild 1) untersucht werden.

Die Lässigkeitsverluste treten infolge des konstruktiv bedingten Spiels in drei Hauptgleitpaarungen auf:

- Gleitpaarung Steuerspiegel—Zylindertrommel (Bild 3)
- Gleitpaarung Kolben—Zylinderbohrung (Bild 4)
- Gleitpaarung Gleitschuh—Schrägscheibe (Bild 4).

Mit zunehmendem Verschleiß ändert sich das Betriebsverhalten der Axialkolbenpumpe sehr rasch. Das Erreichen hoher Wirkungsgrade setzt das Einhalten enger Spalte voraus. Die Spaltweite in den einzelnen Paarungen bestimmt maßgeblich die Größe der Lässigkeitsverluste und damit die Größe des Wirkungsgrades. Außerdem ist die Größe der Lässigkeitsverluste von den Betriebsparametern Druck, Drehzahl und Temperatur des Öls abhängig. Zwischen den Lässigkeitsverlusten und den konstruktiven Größen, Betriebsgrößen und Einsatzbedingungen besteht folglich eine wechselseitige Beziehung.

Entsprechend den zuvor genannten Gleitpaarungen, die an der Flüssigkeitsförderung in der Pumpe beteiligt sind, läßt sich der Gesamtlässigkeitsstrom in drei Teilströme aufteilen.

1.1. Teilverluststrom I (Gleitpaarung Steuerspiegel—Zylindertrommel)

Zwischen Steuerspiegel und Zylindertrommel tritt ein funktionsbedingtes Spiel s_s auf (Bild 3). Der Steuerspiegel steht fest. Der Zylinderkörper ist mit der Antriebswelle über ein Zahnwellenprofil verbunden und führt entsprechend der Antriebsdrehzahl Drehbewegungen aus. Um eine den Betriebsbedingungen angepaßte Dichtwirkung zu erreichen, wird der Zylinderkörper mit Federn an den Steuerspiegel gepreßt. Diese Vorpreßkraft, die durch die Federn erzeugt wird, darf einen minimalen Wert nicht unterschreiten, um auch bei hohen Drücken (bis 400 bar) den Spalt s_s klein zu halten (5 bis 8 μm), und einen maximalen Wert nicht überschreiten, um Mischreibung auszuschließen. Der Spalt hat folglich eine bewegte Begrenzungsfläche, die sowohl rotatorische als auch translatorische Bewegungen ausführt. Auf den Flüssigkeitsfilm, der sich zwischen Steuerspiegel und Zylindertrommel ausbildet, wirken sowohl der Druckunterschied $\Delta p = p_1 - p_0$ im Spalt und der Temperatureinfluß als auch die Zentrifugalkraft infolge der Drehbewegung der Zylindertrommel, so daß sich der Lässigkeitsstrom für diese Paarung in zwei Anteile aufteilen läßt:

- Innere Lässigkeitsverluste durch den Druckunterschied zwischen Druck- und Saugniere
- äußere Lässigkeitsverluste, die aus dem Steuerspiegel in das Gehäuse gelangen.

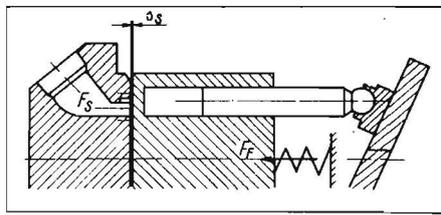


Bild 3. Gleitpaarung Steuerspiegel—Zylindertrommel; s_s Spaltweite, F_s Steuerspiegelkraft, F_F Federkraft

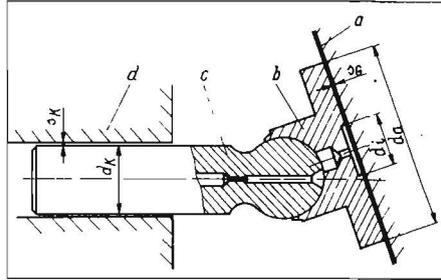


Bild 4. Gleitpaarungen Kolben—Zylinderbohrung und Gleitschuh—Schrägscheibe; a Schrägscheibe, b Gleitschuh, c Kolben, d Zylinder

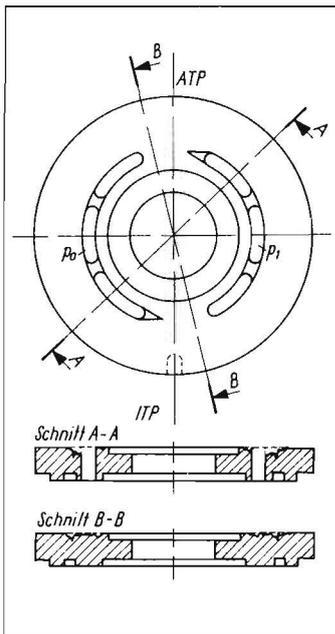


Bild 5. Steuerspiegelgeometrie und Verschleißbilder eines verschlissenen Steuerspiegels (Verschleiß vergrößert dargestellt);
— im Bereich der Steuernieren (Schnitt A-A)
— im Bereich der Überdeckung (Schnitt B-B)

1.2. Teilverluststrom II (Gleitpaarung Kolben—Zylinderbohrung)

Die Drehbewegung der Antriebswelle wird in eine geradlinige Bewegung der Kolben umgewandelt. Jeder Kolben führt je Umdrehung der Antriebswelle einen Saug- und einen Druckhub aus. Die Kolbenräume werden über den Steuerspiegel mit der Druck- und Saugleitung der Pumpe verbunden. Die Lässigkeitsverluste dieser Paarung sind abhängig von folgenden Größen:

- Spaltweite s_k zwischen Kolben und Zylinderbohrung (Bild 4)
- Druckunterschied Δp

— Öltemperatur (Ölviskosität, Wärmedehnung der Bauteile)

— Antriebsdrehzahl.

Der Teilverluststrom II nimmt seinen Ausgang von der Paarung Steuerspiegel—Zylindertrommel und bewegt sich durch den Spalt s_k in das Gehäuse der Axialkolbenpumpe.

1.3. Teilverluststrom III (Gleitpaarung Gleitschuh—Schrägscheibe)

Die im Zylinderkörper axial angeordneten Kolben sind in Gleitschuhen (Bild 4) gelagert, die auf der im Gehäuse angebrachten Schrägscheibe gleiten. Der Gleitschuh wird kolbenseitig über eine Bohrung zur hydrostatischen Abstützung und zur Schmierung auf der Schrägscheibe mit Hydraulikflüssigkeit versorgt. Bei der Auslegung von Axialkolbenpumpen ist zu beachten, daß zwischen der der Schrägscheibe zugekehrten kreisförmigen Lagerfläche des Gleitschuhs und der Schrägscheibe für eine möglichst kleine Summe von Lässigkeitsverlusten und hydrodynamischen Scherverlusten die theoretisch günstigste Spaltweite vorhanden ist.

Bekanntlich nehmen die Lässigkeitsverluste mit steigender Spaltweite zu, während die Scherverluste gleichzeitig kleiner werden, so daß ein echtes Optimierungsproblem vorliegt.

Die Spaltweite s_G zwischen Gleitschuh und Schrägscheibe wird durch folgende Größen beeinflusst:

- Zuführter Druckölstrom
- Anstellung der Gleitschuhe auf der Schrägscheibe
- thermische Druckaufbaueffekte, besonders bei kleinen Spaltweiten
- Druckpulsation (Wechsel von Hoch- und Niederdruck)
- elastische Gleitschuhverformungen infolge der verhältnismäßig großen Kräfte
- Einfluß von Kolbenbewegung und Kolbenreibung auf die Gleitschuhmechanik
- Einflüsse durch Fliehkräfte.

Der Teilverluststrom III wird vom Steuerspiegel durch die zentralen Bohrungen im Kolben und im Gleitschuh zum Lager geführt und tritt durch den Spalt s_G nach außen in das Gehäuse der Axialkolbenpumpe.

Durch die Lässigkeitsverluste wird der effektive Förderstrom um die Summe aller Verluste kleiner als der theoretisch errechnete Förderstrom:

$$\dot{V}_{\text{eff}} = \dot{V}_{\text{th}} - (\dot{V}_{\text{LS}} + \dot{V}_{\text{LK}} + \dot{V}_{\text{LG}});$$

\dot{V}_{eff} effektiver Förderstrom

\dot{V}_{th} theoretischer Förderstrom

\dot{V}_{LS} Steuerspiegellässigkeitsverlust

\dot{V}_{LK} Kolbenlässigkeitsverlust

\dot{V}_{LG} Gleitschuhlässigkeitsverlust.

Die genannten Gleitpaarungen liefern unterschiedlich große Anteile zum Gesamtlässigkeitsverlust der Axialkolbenpumpe. Während die Lässigkeitsverluste zwischen Kolben und Zylinderbohrung durch fertigungstechnische Maßnahmen, wie Einschränkung der Toleranzen und Verbesserung der Oberflächenqualität an den Gleitflächen, beeinflusst werden können, hängen die Lässigkeitsverluste am Steuerspiegel wesentlich von der Wahl und Anordnung der Steuernuten, von der Ebenheit der sich zueinander relativ bewegenden Flächen (Steuerspiegel und Zylindertrommel), von der Werkstoffpaarung u. a. ab.

2. Erscheinungsbilder des Verschleißes

Eine im VEB Industriewerk Karl-Marx-Stadt durchgeführte Schadensanalyse an Axialkolbenpumpen, die im Zeitraum vom 1. Januar 1969 bis zum 31. März 1974 ausfielen und im

Industriewerk instand gesetzt wurden, brachte folgende Ergebnisse:

- Die häufigste Schadenserscheinung war ein zu hoher Verschleißbetrag in den Gleitpaarungen, der bei den untersuchten Aggregaten sowohl auf konstruktive Mängel als auch auf Bedien-, Pflege- und Wartungsfehler zurückzuführen war.
- Bei einer ausgereiften Konstruktion treten Schäden in erster Linie an den Gleitpaarungen Steuerspiegel—Zylindertrommel und Gleitschuh—Schrägscheibe auf, die weniger auf Überlastung als vielmehr durch Verunreinigungen im Betriebsmittel herbeigeführt wurden.
- Am stör anfälligsten ist die Paarung Steuerspiegel—Zylindertrommel. Sie liefert auch den größten Anteil an den Gesamtlässigkeitsverlusten.

Für die bei den weiteren Betrachtungen wichtigsten Bauteile wurden die in Tafel I zusammengefaßten Verschleißbilder ermittelt.

Die Auswertung der Verschleißbilder führte für die Paarung Steuerspiegel—Zylindertrommel zu folgenden Aussagen:

- Steuerspiegel und Steuerscheibe zeigen ein ähnliches Verschleißbild.
- Der Verschleiß am äußeren Dichtsteg ist bei Steuerspiegel und Steuerscheibe größer als am inneren Dichtsteg.
- Die Riefentiefe nimmt sowohl am inneren als auch am äußeren Dichtsteg zur Niere hin zu.
- Der Verschleiß an der Saugniere ist größer als an der Druckniere.

Die in Tafel I genannten Verschleißerscheinungen am Gleitschuh sind ebenfalls durch ein verunreinigtes Betriebsmittel verursacht worden.

Fremdkörper im Öl bzw. Alterungsprodukte des Öls können dazu führen, daß sich die Bohrung, über die der Gleitschuh mit Öl versorgt wird, zusetzt. Damit werden die Flüssigkeitszufuhr und auch die Schmierung vermindert und sogar unterbrochen. Die Folge ist Mischreibung zwischen Gleitschuh und Schrägscheibe. Der Verschleiß am Gleitschuh wird solange fortschreiten, bis die Tragfähigkeit der Lauffläche des Gleitschuhs nicht mehr gewährleistet ist und am Gleitschuh ein Bruch auftritt.

Die Schadensanalyse ergab, daß der Verschleiß an der Paarung Kolben—Zylinderbohrung vernachlässigbar gering ist und nur geringe Auswirkungen auf die Größe der Lässigkeitsverluste der Axialkolbenpumpe hat.

Daher kann festgestellt werden, daß eine derartige Analyse relativ schwierig ist, da ein Schaden mehrere Ursachen und eine Schadensursache mehrere Schäden zur Folge haben kann. Die Schadensfälle sind abhängig vom

Tafel I. Verschleißerscheinungen der an der Ölförderung beteiligten Einzelteile der Axialkolbenpumpe

Einzelteil	Verschleißbild
Steuerspiegel	— Riefen über dem Dichtsteg (s. Bild 5) — örtliche Deformationen und Abweichungen von der Ebenheit infolge Druck- und Temperatureinfluß (Steuerspiegel verwirft)
Zylindertrommel (Steuerscheibe)	— Riefen
Gleitschuh	— Riefen an den Laufflächen — Abtragen der Laufflächen

konstruktiven Reifegrad, von der Einsatzdauer und von den Einsatzbedingungen.

Im praktischen Anwendungsfall unterliegen alle Gleitpaarungen mehr oder weniger dem Verschleiß, besonders bei verunreinigtem Betriebsmittel. Daraus ergeben sich die Fragen, welche der Gleitpaarungen bei Verschleißwirkungen den größten Einfluß auf die Wirkungsgradminderung hat und welcher Diagnoseparameter als Kriterium für die Bestimmung des Schädigungszustands der Axialkolbenpumpe vorzusehen ist.

3. Ergebnisse der experimentellen Untersuchung

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Schadensanalyse sind experimentelle Untersuchungen an einer Axialkolbenpumpe der Baugröße 100/320 mit simuliertem Verschleiß in den Gleitpaarungen Steuerspiegel—Zylindertrommel und Gleitschuh—Schrägscheibe bei den veränderlichen Betriebsparametern Druck, Drehzahl und Öleingangstemperatur durchgeführt worden.

Diese experimentellen Untersuchungen führten zu folgenden Ergebnissen:

- Die Lässigkeitsverluste sind bei Steuerspiegelverschleiß größer als bei Gleitschuhverschleiß.
- Zwischen Lecköltemperatur und Verschleißzustand des Steuerspiegels besteht keine eindeutige Abhängigkeit. Die Lecköltemperatur ist in erster Linie von der Einspeisetemperatur des Öls abhängig.
- Zwischen Verschleißzustand der Gleitschuhe und Lässigkeitsmenge konnte kein proportionaler Zusammenhang festgestellt werden. Die Lecköltemperatur steigt aber mit zunehmendem Verschleiß am Gleitschuh.

Da im praktischen Anwendungsfall Steuerspiegel und Gleitschuh dem Verschleiß unterliegen, sollte zweckmäßig die Lässigkeitsmenge und

nicht die Lecköltemperatur als Kriterium für die Überprüfung der Betriebstauglichkeit vorgesehen werden.

4. Hinweise für den Anwender

Zur Verringerung der Anzahl der Ausfälle und zur Erhöhung der Grenznutzungsdauer sollen für den Einsatz von Axialkolbenpumpen in hydraulischen Anlagen landtechnischer Arbeitsmittel folgende Hinweise gegeben werden:

- Fremdkörper können den Systemen nur durch eine kontinuierliche und ausreichende Filtrierung wieder entzogen werden. Deshalb sind die Filterauswahl und die Reinigung der Filter besonders zu beachten.
- Neue Hydraulikflüssigkeiten enthalten meist sehr viele Schmutzteilchen (z. B. Lackreste und Staub) aus den Transportbehältern. Deshalb sollte das Einfüllen von Hydrauliköl in den Kreislauf nur durch feine Siebe bzw. Filter vorgenommen werden.
- Man muß darauf achten, daß nie verschiedene Sorten von Hydraulikflüssigkeiten in einen Hydraulikkreislauf eingefüllt werden, da sich nicht alle Hydrauliköle mischen lassen. Nur das vom Hersteller vorgeschriebene Hydrauliköl ist zu verwenden.
- Beim Betrieb von Axialkolbenpumpen beträgt die zulässige Arbeitsmitteltemperatur -20°C bis $+70^{\circ}\text{C}$.

5. Schlußbetrachtung

Die Funktionsprinzipien der Axialkolbenaggregate weisen keine Mängel auf. Bei einer ausgereiften Konstruktion und unter normalen Betriebsbedingungen zeichnen sich die untersuchten Axialkolbenpumpen durch geringen Verschleiß und durch Funktionssicherheit aus. Häufig ist aber festzustellen, daß infolge der Unkenntnis des Bedienpersonals über die Anforderungen einer Hydraulikanlage Abweichungen von den Normalbedingungen (geringer Verschmutzungsgrad der Hydraulikflüssigkeit, zulässige Öltemperaturen, Alterungsbeständigkeit des Öls) auftreten. Die Nichtbeachtung dieser Forderungen hat Verschleiß in den Gleitpaarungen zur Folge. Die stör anfälligste Paarung einer Axialkolbenpumpe ist die Gleitpaarung Steuerspiegel—Zylindertrommel. Sie hat im Fall einer Schädigung den größten Einfluß auf die Lässigkeitsverluste.

Literatur

- [1] Böinghoff, O.: Ursachen und Folgen der Verschmutzung von Hydraulikflüssigkeiten. Grundlagen der Landtechnik 24 (1974) H. 2, S. 46—50.
- [2] Krull, H.: Schädigungsverhalten und Strömungsmechanismus in Axialkolbenpumpen. Universität Rostock, Sektion Landtechnik, Diplomarbeit 1974 (unveröffentlicht). A 1619

Folgende Fachzeitschriften des Maschinenbaus erscheinen im VEB Verlag Technik:

agrar-technik; Die Eisenbahntechnik; die Technik; Feingerätetechnik; Fertigungstechnik und Betrieb; Hebezeuge und Fördermittel; Kraftfahrzeugtechnik; Luft- und Kältetechnik; Maschinenbautechnik; Metallverarbeitung; Schmierungstechnik; Schweißtechnik; Seewirtschaft