

Ein Vergleich verschiedener Bauformen hydrostatischer Fahrtriebe

Dr.-Ing. H. Brunner

Technische Universität Dresden, Sektion Kraftfahrzeug-, Land- und Fördertechnik,
Bereich Traktoren und Landmaschinenfahrwerke

Hydrostatische Fahrtriebe werden in letzter Zeit bei Land- und Baumaschinen immer häufiger angewendet. Der Grund hierfür sind die bekannten Vorteile des stufenlosen Getriebes und, was noch wichtiger erscheint, die Bedienungsvereinfachungen für das Fahrpersonal.

Für einen Mähdrescherfahrer bedeutet die Ausrüstung seines Fahrzeugs mit einem hydrostatischen Fahrtrieb z. B., daß er Geschwindigkeitsregelung, Bremsen, Anhalten und Rückwärtsfahren mit der Betätigung nur eines Hebels bewerkstelligen kann. Außerdem entfällt der Kuppelvorgang.

Was sind nun die wesentlichsten Nachteile, die diesen Getrieben anhaften?

In erster Linie sind hier der gegenüber mechanischen stufenlosen Getrieben höhere Preis und der schlechtere Wirkungsgrad zu nennen.

Nachfolgend wird über einige technische Untersuchungen, vor allem Wirkungsgradmessungen, an hydrostatischen Fahrtrieben verschiedener Bauformen berichtet.

1. Bauformen hydrostatischer Fahrtriebe

Prinzipiell sind zwei Schaltungen eines hydrostatischen Fahrtriebs möglich, der offene Kreislauf und der geschlossene Kreislauf.

Bild 1 zeigt das Schema eines offenen Kreislaufs.

Die verstellbare Hydropumpe saugt das Öl aus einem Ölbehälter und fördert es über ein Wegeventil zum Hydromotor. Das aus dem Hydromotor zurückströmende Öl fließt wieder in den Ölbehälter.

Mit dieser Schaltung sind stufenlose Änderung der Motordrehzahl und Drehrichtungswechsel beim Motor (durch das Wegeventil) möglich. Eine Umkehr des Energieflusses erlaubt diese Schaltung allerdings nicht.

Das Prinzip des geschlossenen Kreislaufs zeigt Bild 2.

Hydropumpe und Hydromotor sind hier durch ein geschlossenes Leitungssystem miteinander verbunden, d. h., daß aus dem Hydromotor ausströmende Öl wird sofort der Saugseite der Pumpe wieder zugeführt. Eine Speisepumpe ergänzt dabei die im Kreislauf auftretenden Leckölverluste. Eine Drehrichtungswechsel des Hydromotors wird hier durch Wechsel der Förderrichtung an der Pumpe erreicht. Außerdem erlaubt der geschlossene Kreislauf eine Umkehr des Energieflusses, d. h., der Hydromotor wird vom Fahrzeug angetrieben und läuft als Pumpe. Hoch- und Niederdruckleitung werden vertauscht und das Fahrzeug wird abgebremst. Aufgrund dieser

Möglichkeit des Bremsens wird bei Fahrtrieben in Landmaschinen ausschließlich der geschlossene Kreislauf verwendet.

Bei den hydrostatischen Geräten selbst werden nur Axialkolbeneinheiten eingesetzt, wobei zwei verschiedene Bauformen zur Anwendung kommen, Geräte mit Schiefscheibe und Geräte mit Pleuelverbindung.

Bild 3 zeigt eine Darstellung dieser beiden Bauprinzipien.

Beim Prinzip mit Schiefscheibe (Bild 3 A) wird der mit der Welle *a* verbundene Zylinderkörper *g* angetrieben. Die im Pumpenkörper axial angeordneten Kolben *d* sind in Gleitschuhen *c* gelagert, die auf der mit dem Gehäuse fest verbundenen Schiefscheibe *h* gleiten.

Die Drehbewegung der Antriebswelle wird dadurch in eine geradlinige Bewegung der Kolben umgewandelt.

Beim Prinzip mit Pleuelverbindung (Bild 3 B) ist der gesamte Zylinderkörper *c* gegenüber der An- bzw. Abtriebs-

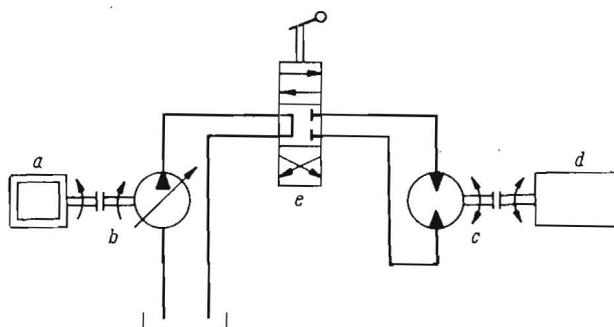


Bild 1. Schema eines offenen Kreislaufs; *a* Antriebsmotor, *b* Hydropumpe, *c* Hydromotor, *d* Arbeitsmaschine, *e* Wegeventil

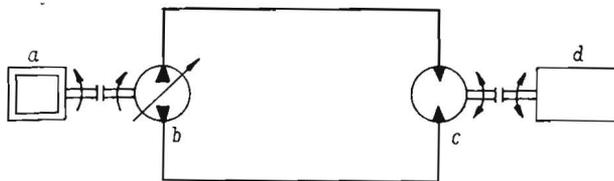


Bild 2. Schema eines geschlossenen Kreislaufs (Erläuterung s. Bild 1)

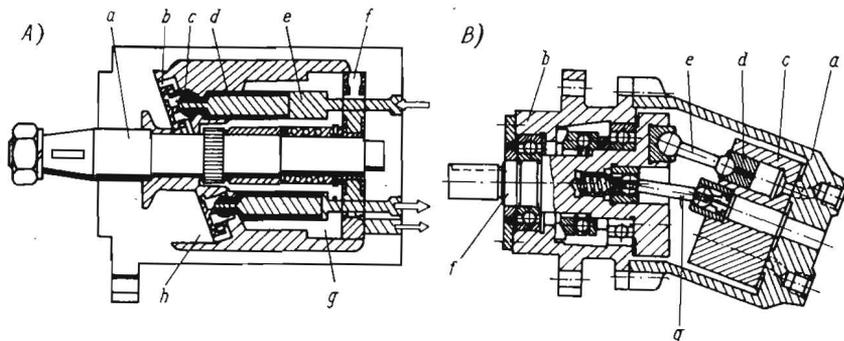


Bild 3
Bauprinzipien der untersuchten Axko-Geräte;
A) Prinzip mit Schiefscheibe;
a Welle, *b* Niederhaltering, *c* Gleitschuh, *d* Kolben, *e* Kolbenbohrungen, *f* Steuerspiegel, *g* Zylinderkörper, *h* Schrägscheibe
B) Prinzip mit Pleuelverbindung
a Zylindergehäuse, *b* Lagergehäuse, *c* Zylinderkörper, *d* Kolben, *e* Pleuel, *f* Welle, *g* Kuppelstück mit Gelenk

welle f geneigt, wodurch die hin- und hergehende Bewegung der Kolben bei Drehung der Welle entsteht. Die einzelnen Kolben sind mit der An- bzw. Abtriebswelle durch die Pleuel e verbunden.

Bei Verstellereinheiten ist der gesamte Zylinderkörper schwenkbar angeordnet.

Entsprechend dem unterschiedlichen konstruktiven Aufbau ergeben sich unterschiedliche Verhaltensweisen der Antriebe im Betrieb. Die durchgeführten Untersuchungen sollten das beweisen.

2. Wirkungsgraduntersuchungen

Bild 4 zeigt das Wirkungsgradkennfeld eines Fahrtriebs, bestehend aus einer verstellbaren Hydropumpe mit einem Fördervolumen von $75 \text{ cm}^3/\text{U}$ und einem Hydromotor mit einem konstanten Schluckvolumen von $50 \text{ cm}^3/\text{U}$. Dem hydrostatischen Antrieb nachgeschaltet war ein 3stufiges Wechselgetriebe. Dieser Aufbau entspricht der einfachsten Form eines hydrostatischen Fahrtriebs.

Die Geräte dieses Fahrtriebs waren hydrostatische Standardbauelemente, die nach dem Gleitschuhprinzip arbeiten. Es handelt sich also um keine spezielle Entwicklung für Fahrtriebe.

Das Kennfeld zeigt den Gesamtwirkungsgrad aus hydrostatischem Getriebe und Wechselgetriebe. Das Maximum ist mit 67 Prozent wesentlich schlechter als bei mechanischen stufenlosen Getrieben. Berücksichtigt man noch, daß Fahrtriebe vorwiegend im Teillastbereich betrieben werden, so kommt man auf Wirkungsgrade von 55 Prozent.

Das Kennfeld eines weiteren Antriebs, dessen Geräte nach dem Gleitschuhprinzip arbeiten, zeigt Bild 5. Es handelt sich um einen Fahrtrieb mit einer verstellbaren Pumpe von $64 \text{ cm}^3/\text{U}$ Fördervolumen und zwei Motoren, deren Schluckvolumen in 3 Stufen veränderlich war.

Den Motoren waren jeweils Stirnradgetriebe mit konstanter Übersetzung nachgeschaltet. Das Kennfeld zeigt also wieder den Wirkungsgrad des hydrostatischen Getriebes mit dem Endgetriebe. Die Funktion des Wechselgetriebes übernehmen hier die in Stufen schaltbaren Hydromotoren.

Das Maximum des Wirkungsgrades liegt in allen 3 Fahrstufen ähnlich wie in der dargestellten 1. Stufe, nahe der rechten oberen Ecke des Kennfeldes, d. h. in der Nähe der höchsten Leistung.

Diese Feststellung traf auch schon auf den 1. Antrieb zu. Die Höhe des Wirkungsgradmaximums und der Abfall im Teillastgebiet sind allerdings im vergleichbaren Gang günstiger als beim 1. Antrieb.

30 PS Antriebsleistung werden hier über dem gesamten Drehzahlbereich mit Wirkungsgraden zwischen 60 und 66 Prozent übertragen.

Feststellen ist bei derartigen Antrieben noch, daß die besten Wirkungsgrade bei größtem Schluckvolumen der Motoren, also in der 1. Fahrstufe erreicht werden.

Je mehr das Schluckvolumen im Interesse einer Drehzahlsteigerung verringert wird, desto ungünstiger wird der Wirkungsgrad.

Für den untersuchten Fahrtrieb ergeben sich diesbezüglich folgende Werte:

1. Fahrstufe : $\eta_{\max} = 75$ Prozent
2. Fahrstufe : $\eta_{\max} = 70$ Prozent
3. Fahrstufe : $\eta_{\max} = 60$ Prozent

Die Verläufe der Wirkungsgradlinien bleiben in allen 3 Fahrstufen grundsätzlich gleich. Auch an der Lage des Maximums im Kennfeld ändert sich nichts.

Als nächstes seien die Untersuchungsergebnisse eines Fahrtriebs dargestellt, dessen Geräte nach dem Pleuelstangen-

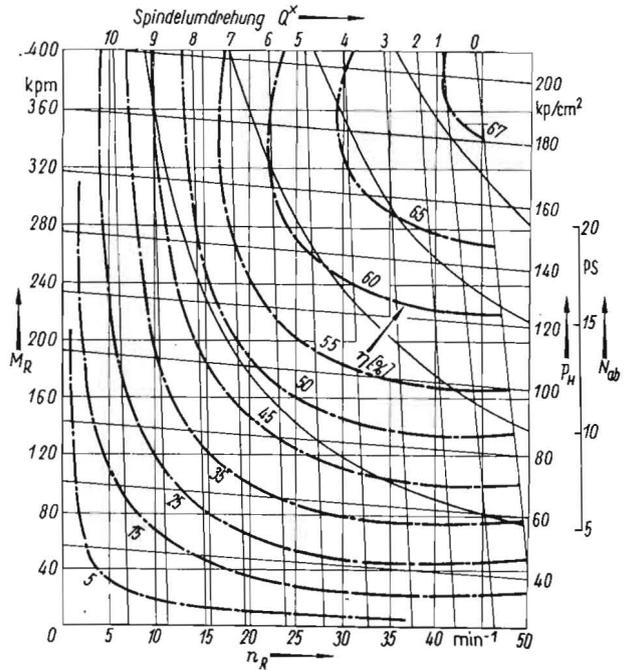


Bild 4. Wirkungsgradkennfeld eines Antriebs aus Standardbauelementen (Wechselgetriebe Gang 2)

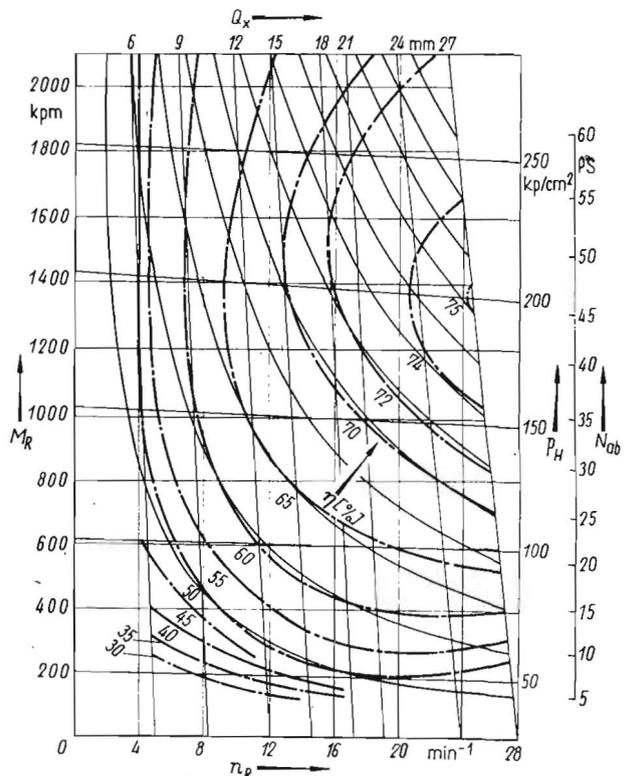


Bild 5. Wirkungsgradkennfeld eines Fahrtriebs mit stufenweiser Verstellung der Motoren (1. Fahrstufe)

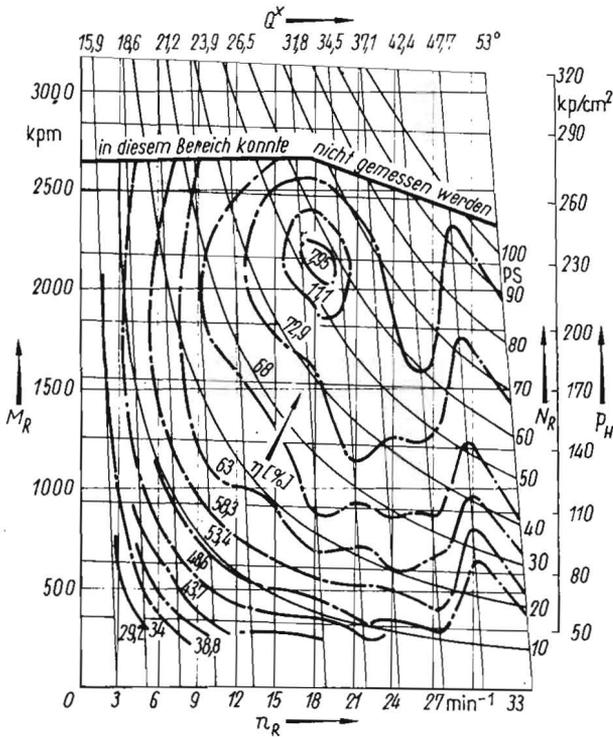


Bild 6. Wirkungsgradkennfeld eines Fahrtriebs mit Geräten, die nach dem Pleuelstangenprinzip arbeiten (1. Fahrstufe)

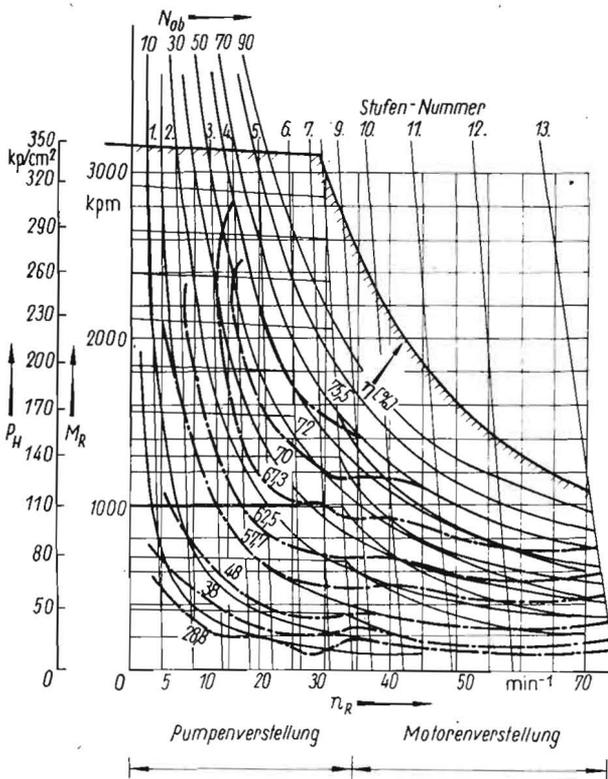


Bild 7. Wirkungsgradkennfeld eines Fahrtriebs mit stufenlos verstellbaren Motoren

prinzip arbeiten. Der Antrieb bestand aus einer verstellbaren Pumpe mit einem Fördervolumen von $105 \text{ cm}^3/\text{U}$ und 2 Motoren mit dem gleichen Schluckvolumen, wobei die Motoren in 2 Stufen verstellbar waren.

Analog dem 2. Antrieb wurden auch hier den Motoren Stirnradgetriebe mit konstanter Übersetzung nachgeschaltet.

Bild 6 zeigt das Kennfeld dieses Antriebs in der 1. Fahrstufe. Zunächst erkennt man den grundsätzlichen Unterschied zu den bisher gezeigten Kennfeldern.

Das Maximum des Wirkungsgrads liegt bei etwa $2/3$ des maximalen Moments und bei etwa der Hälfte der Höchstdrehzahl, also im Teillastgebiet. (Zu berücksichtigen ist hier, daß aus prüfstandsbedingten Gründen die hohen Momente nicht abgebrems werden konnten, d. h., das Kennfeld ist unvollständig.)

Eine derartige Charakteristik ist für Fahrtriebe als besonders günstig zu bewerten, da die besten Wirkungsgrade in der Nähe des am häufigsten benutzten Betriebsbereichs liegen. 50 PS Fahrleistung werden maximal mit einem Wirkungsgrad von 79 Prozent übertragen, was für hydrostatische Fahrtriebe einen sehr guten Wert darstellt.

Ein unmittelbarer Vergleich gleicher Fahrleistungen mit dem zuletzt beschriebenen Fahrtrieb mit Schiefscheibenprinzip ist nicht möglich, da die beiden Antriebe in ihren Leistungsdaten zu weit voneinander abweichen. Festzustellen ist noch, daß im Wirkungsgradverhalten, d. h., im Abfall vom Maximum, kein nennenswerter Unterschied zwischen den beiden Bauprinzipien vorliegt.

Analog dem Antrieb mit Schiefscheibe ist auch bei diesem Fahrtrieb die 2. Fahrstufe wirkungsgradmäßig schlechter. Das Wirkungsgradmaximum liegt ungünstiger im Kennfeld und ist auch gegenüber der 1. Fahrstufe um 2 Prozent niedriger.

Als letztes Beispiel sollen die Untersuchungen eines Antriebs gezeigt werden, bei dem neben der Pumpe auch die Motoren stufenlos verstellbar waren.

Die Geräte hatten ein Förder- bzw. Schluckvolumen von $89 \text{ cm}^3/\text{U}$, wobei eine Pumpe und zwei Motoren mit nachgeschalteten Stirnradgetrieben zur Anwendung kamen. Die Verstellung des Antriebs war so ausgebildet, daß Pumpe und Motoren hintereinander verstellbar wurden. Zur Erhöhung der Abtriebsdrehzahl wurde also zunächst bei konstantem Motorvolumen das Pumpenvolumen vergrößert und anschließend bei maximalem Pumpenvolumen stufenlos das Motorvolumen verkleinert.

Die Geräte dieses Antriebs arbeiteten wieder nach dem Gleitschuhprinzip. Bild 7 zeigt das Kennfeld.

Es fällt zunächst auf, daß das Kennfeld nicht das von den anderen Antrieben gewohnte Aussehen hat. Durch die stufenlose Motorverstellung sind die Linien konstanten Drucks in der Hochdruckleitung im Motorverstellbereich keine Geraden mehr, sondern zeigen den dargestellten Abfall. Die Erklärung hierfür ist das bei konstantem Druck absinkende Moment, da das Motorschluckvolumen verkleinert wird. Das Maximum des Wirkungsgrads liegt mit 75,5 Prozent etwa 2 bis 4 Prozent niedriger als bei dem Antrieb mit Pleuelverbindung.

Auch die für das Schiefscheibenprinzip typische Lage des Wirkungsgradmaximums in der Nähe der höchsten Leistung findet man hier wieder. Im Teillastgebiet werden gegenüber dem Antrieb mit Pleuelverbindung etwa 3 bis 5 Prozent niedrigere Wirkungsgrade erreicht.

Für diesen Antrieb sprechen Stufenlosigkeit im gesamten Fahrbereich und die sehr gute Bremswirkung, die durch das stufenlose Verstellen der Motoren erreicht wird.

Die Unterschiede zwischen den beiden Bauprinzipien der hydrostatischen Getriebe kommen durch die unterschiedlichen volumetrischen und hydraulisch-mechanischen Verluste zustande. Die mit einfachen Mitteln durchzuführenden Leckmessungen beweisen, daß ein beträchtlicher Unterschied im volumetrischen Wirkungsgrad besteht.

3. Grenznutzungsdauer und Wartung

Neben dem Wirkungsgrad sind für den Anwender hydrostatischer Fahrtriebe noch Aussagen zur Grenznutzungsdauer und zum Wartungsaufwand von Bedeutung.

Nachfolgend soll über einige Untersuchungen zu diesem Komplex berichtet werden.

Um eine Aussage über Grenznutzungsdauer und Wartungsaufwand zu bekommen, wurde ein 2000-h-Dauerlauf mit einem hydrostatischen Fahrtrieb durchgeführt. Das Versuchsprogramm für diesen Dauerlauf basiert auf dem Einsatzzyklogramm einer Landmaschine. Der Dauerlauf erfolgte in Kampagnen zu je 240 h, wobei nach jeder Kampagne eine Wirkungsgradkurve der 1. Fahrstufe gemessen wurde.

Die Öltemperatur im Ölbehälter betrug während der Messung $60 \pm 3^\circ\text{C}$. Bei den Messungen ergab sich, daß während der 2000 h kein nennenswerter Wirkungsgradabfall eintritt. Diese Feststellung wird durch das Kennfeld der 1. Fahrstufe nach 2000 h bestätigt (Bild 8).

Es handelt sich um den Fahrtrieb mit stufenweise verstellbaren Motoren. Die Bilder 5 und 8 sind also unmittelbar vergleichbar und beweisen den sehr geringen Unterschied des Wirkungsgrads im Neuzustand und nach 2000 Betriebsstunden. Aus dem festgestellten geringfügigen Anstieg des Wirkungsgrads während der ersten beiden Kampagnen ist zu schließen, daß während dieser Zeit Einlauferscheinungen auftreten.

Für den Konstrukteur bedeutet diese Tatsache, daß der hydrostatische Fahrtrieb auf alle Fälle die geplante Nutzungsdauer z. B. einer selbstfahrenden Landmaschine weit überschreitet. Von seiten des Wartungsaufwandes und der Kosten sind vor allem die Ölwechselfristen von Interesse. Während des 2000-h-Dauerlaufs wurden deshalb Ölanalysen durchgeführt, deren Ergebnisse im Bild 9 dargestellt sind. Die einzelnen Untersuchungen zeigen für das Öl E 36 folgende Ergebnisse:

Viskosität bei 50°C

Es ergibt sich über den gesamten Zeitraum von 2000 h nur ein unbedeutender Anstieg der Viskosität.

Verseifungszahl VZ

Die Verseifungszahl beinhaltet die öleigenen Veränderungen. Die Zunahme von $0,5 \text{ mg KOH/g}$ über 2000 h kann nicht als kritisch bezeichnet werden.

Sulfatasche

Anhand der Sulfatasche kann der Additivabbau kontrolliert werden. Der geringe Abfall der gemittelten Kurve ist unbedeutend, es kann praktisch von keiner Änderung gesprochen werden. Diese Tatsache bedeutet, daß das Öl keine Ölkohle gebildet hat, denn die DD-Additivs sind nicht verbraucht. Die Beanspruchung des Öls durch die Temperatur ist also nicht zu groß gewesen.

Schlamm

Sieht man von den beiden eingeklammerten Werten ab, die wahrscheinlich Analysenfehler sind, so kann man über die gesamte Betriebszeit von einer durchschnittlichen Verschmutzung von $0,04 \text{ Masseprozent}$ sprechen.

Zusammenfassend läßt sich also feststellen, daß von seiten des Öls beim Einsatz hydrostatischer Fahrtriebe keine Probleme zu erwarten sind.

Masse

Durch die Bauweise bedingt, ergeben sich für das Prinzip mit Pleuelverbindung etwas ungünstigere Verhältnisse bezüglich des Masse-Leistungs-Verhältnisses.

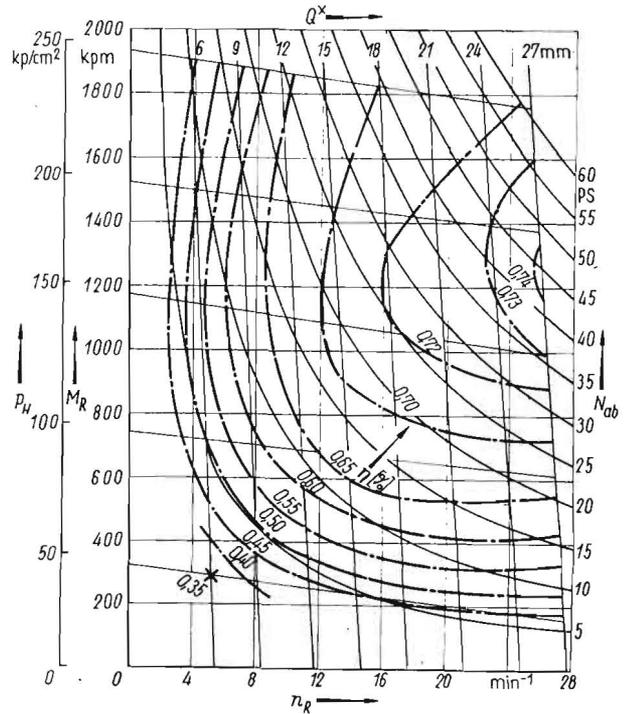


Bild 8. Wirkungsgradkennfeld nach 2000 Betriebsstunden (vgl. Bild 5)

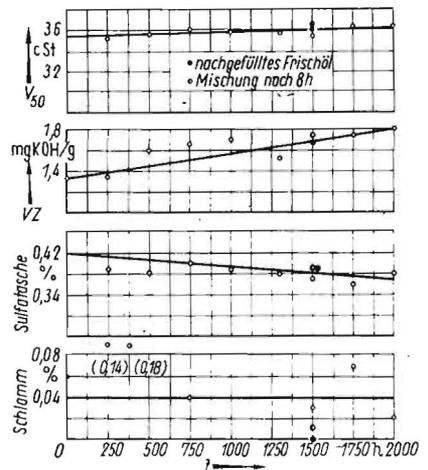


Bild 9. Ölanalysen während eines 2000-h-Dauerlaufs

Als Beispiel sollen 2 der untersuchten Antriebe dienen. Das Verhältnis von Motor- plus Pumpenmasse, bezogen auf die Eckleistung, ergibt für den Antrieb mit Pleuelverbindung ($105 \text{ cm}^3/\text{U}$) einen Wert von $1,4 \text{ kg/PS}$ und für den Antrieb mit Schiefscheibe ($89 \text{ cm}^3/\text{U}$) $1,3 \text{ kg/PS}$.

4. Schlußbetrachtung

Die Untersuchungen zeigen, daß von seiten des Wirkungsgrads das Bauprinzip mit Pleuelverbindung für einen Fahrtrieb besser geeignet ist. Allerdings sind diese Antriebe gegenüber denen mit Schiefscheibe konstruktiv aufwendiger und hinsichtlich der Masse etwas ungünstiger. Setzt man eine Nutzungsdauer von 2000 h an, so wird beim Einsatz in Landmaschinen die Grenznutzungsdauer eines hydrostatischen Fahrtriebs die der Landmaschine überschreiten.

A 9394