

Leistungsverluste im Hydrauliksystem des Traktors ZT 320/323

Dozent Dr. sc. techn. E. Hlawitschka, KDT/Dr.-Ing. W. Schmidt, KDT
Universität Rostock, Sektion Landtechnik

Verwendete Formelzeichen

a	Konstante
b ₀ , b ₁	Konstanten
c ₀ , c ₁	Konstanten
C _{p0}	spezifische Wärmemenge
e ₀ , e ₁ , e ₂	Konstanten
f ₁ , f ₂	Konstanten
h ₁ , h ₂	Konstanten
k	Konstante
K ₁ , K ₂	Konstanten
m	Konstante
m ₀ , m ₁	Konstanten
n _l	Drehzahl des Lenkrades
n _p	Drehzahl der Pumpe
T	Temperatur
p	Druck
p _s	Druck in der Saugleitung
P _A	Antriebsleistung
P _v	Verlustleistung
Re	Reynoldszahl
v	Strömungsgeschwindigkeit
V _{th}	theoretisches Verdrängungsvolumen
Ḃ	Volumenstrom
α _p	mittlerer Ausdehnungskoeffizient
β	Preßzahl
η _{AZ}	Wirkungsgrad des Arbeitszylinders
η _p	Wirkungsgrad der Pumpe
ν	kinematische Viskosität
ν ₀	kinematische Viskosität für den Normzustand
ρ	Dichte
ζ	Widerstandsbeiwert

1. Einführung

Eine vorrangige Aufgabe der Landtechnik ist die effektive Nutzung der in Landmaschinen und Traktoren installierten Energie. Die Anforderungen an Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und technischen Komfort führen zu einem steigenden Anteil der Hydraulikkomponenten in diesen Maschinen. Während früher die in Traktoren eingebauten hydraulischen Geräte eine Leistung benötigten, die im Vergleich zur Motorleistung kaum ins Gewicht fiel, steigt der Anteil der hydraulischen Leistung heute bis auf 25 bis 30% der Motornennleistung [1]. Hieraus leitet sich die Notwendigkeit ab, auch auf dem Gebiet der Mobilhydraulik entsprechende Untersuchungen anzustellen, um Möglichkeiten der Senkung der „Energieverluste“ aufzudecken.

Hydraulikanlagen für Traktoren wurden bisher vornehmlich unter dem Aspekt der Erfüllung der geforderten Arbeitsaufgaben projektiert und ausgeführt. Energetische Gesichtspunkte standen dabei nicht im Vordergrund. Bei einem Vergleich von in- und ausländischen Erzeugnissen ist festzustellen, daß der Gedanke der Verlustreduzierung in anderen Ländern zu Entwicklungen und Lösungen geführt hat, die eine bessere Energieausnutzung sichern, ohne daß sich dadurch die Herstellungskosten erhöhen müssen [2]. Offenbar kann allein durch eine entsprechende Schaltung der in einem Hydraulikkreislauf angeordneten Geräte eine Verlustreduzierung erreicht werden. Zur Aufklärung der Verlustproblematik ist eine Verlustanalyse unbedingt erforderlich. Über Ergebnisse, die bei Untersuchungen der Hydraulikanlage des Traktors ZT 320/323 im Auftrag des VEB Traktoren- und Dieselmotorenwerk Schönebeck gewonnen wurden, soll nachfolgend berichtet werden.

2. Verluste in Hydrauliksystemen

Die Hydraulikindustrie bietet heute eine Vielzahl im wesentlichen standardisierter Geräte und Bauelemente an. Die Aufgabe des Projektanten von Hydraulikanlagen besteht somit darin, solche Geräte auszuwählen und in entsprechend aufgebauten Kreisläufen so anzuordnen, daß das Angebot an Hydraulikenergie dem augenblicklichen Energiebedarf der Arbeitsorgane entspricht bzw. diesem möglichst nahe kommt. Solche Schaltungen erfüllen dann am ehesten die Forderung nach Senkung der Verluste. In den üblichen Hydraulikanlagen wird der Überschuß an Hydraulikenergie in technisch nicht nutzbare Wärmeenergie umgewandelt. Neben schaltungstechnischen Maßnahmen kommt jedoch auch der Reduzierung der Druck- und Leckverluste besondere Bedeutung zu. Beide äußern sich in einer Verringerung des Arbeitsvermögens der Hydraulikanlage dergestalt, daß mit der Zunahme der inneren Leckverluste die Arbeitsgeschwindigkeit abnimmt

und infolge von Druckverlusten die Kräfte bzw. Drehmomente an den Hydraulikmotoren verringert werden.

Die grundsätzlich möglichen Maßnahmen zur Energieeinsparung sind in einem Überblick im Bild 1 dargestellt worden. Von den vielen Möglichkeiten sind jedoch nur einige nutzbar, wenn bei Anwendung der Hydraulik in Landmaschinen und Traktoren der Forderung nach kostengünstigen und möglichst einfachen Lösungen entsprochen werden soll. Dazu gehört die Einflußnahme auf die Höhe der Druckverluste.

3. Druckverlustberechnung

Für die Berechnung von Druckverlusten in Hydrauliksystemen existieren in der Fachliteratur mathematisch-physikalische Modelle, auf deren Basis Werte mit für die Praxis ausreichender Genauigkeit ermittelt werden können. Im konkreten Fall beginnen jedoch die Schwierigkeiten bei der Beschaffung der für die Berechnung notwendigen Eingabedaten für den Rechner. Neben konstruktiven Daten werden vornehmlich hydraulische Angaben benötigt, die die Geräteproduzenten oft nicht oder in nur unzureichendem Maß zur Verfügung stellen. Meist werden sie auch nicht in einer berechnungsfreundlichen Form angeboten. Eine wesentliche Aufgabe besteht deshalb darin, die in Diagramm- oder Tabellenform vorliegenden Angaben in mathematische Funktionen zu fassen. Die nachfolgend aufgeführten Beziehungen erwiesen sich für die Berechnung der Druckverluste in der Hydraulikanlage des Traktors ZT 320/323 neben allgemein bekannten Formeln der Hydraulik als brauchbar.

3.1. Hydrauliköle

Hydrauliköle sind Newtonsche Flüssigkeiten. Zur Beschreibung des Viskositäts-Temperatur-Verhaltens eignet sich die Gleichung von Ubbelohde-Walter:

$$\lg(\nu + a) = k - m \lg T$$

Die Druckabhängigkeit der Viskosität kann durch die Gleichung

$$\nu = \nu_0 e^{\beta p}$$

ausgedrückt werden.

3.2. Pumpen

Das Betriebsverhalten von Pumpen läßt sich bezüglich des Volumenstrom-Druck-Verhaltens durch

$$\dot{V} = b_0 + b_1 p$$

und betreffs der Antriebsleistung durch

$$P_A = c_0 + c_1 p$$

beschreiben. Zur Erfassung der Temperaturerhöhung in Pumpen kann die von Witt [3] angegebene Beziehung

$$\Delta T = \frac{(\dot{V}/\eta_p - T \alpha_p) p}{\rho c_{p0} + \alpha_p p}$$

benutzt werden. Für Pumpen läßt sich der nachfolgend aufgeführte „äquivalente“ Druckverlust angeben:

$$\Delta p = \frac{P_A}{\eta_p \dot{V}_{th}} - p_s$$

Art	Methode	Beispiel	
Verminderung des Energiebedarfs	konstruktive Maßnahmen	Wirkungsgradverbesserung von Pumpen, Motoren und Zylindern Verringerung von Verlusten in Leitungen und Ventilen	
	schaltungstechnische Maßnahmen	konstante Verdränger	mehrströmige Pumpen Stromregelung modulierte Strom- und Drucksteuerung
		offener Verdränger	offener Kreislauf druck- und stromgeregelte Pumpe drehzahl geregelter Motor
		geschlossener Verdränger	geschlossener Kreislauf Servopumpe
Energierückgewinnung	offener und geschlossener Kreislauf	Rückspeisung von kinetischer und potentieller Energie Nutzung von Abwärme	

Bild 1
Maßnahmen zur Energieeinsparung in der Hydraulik

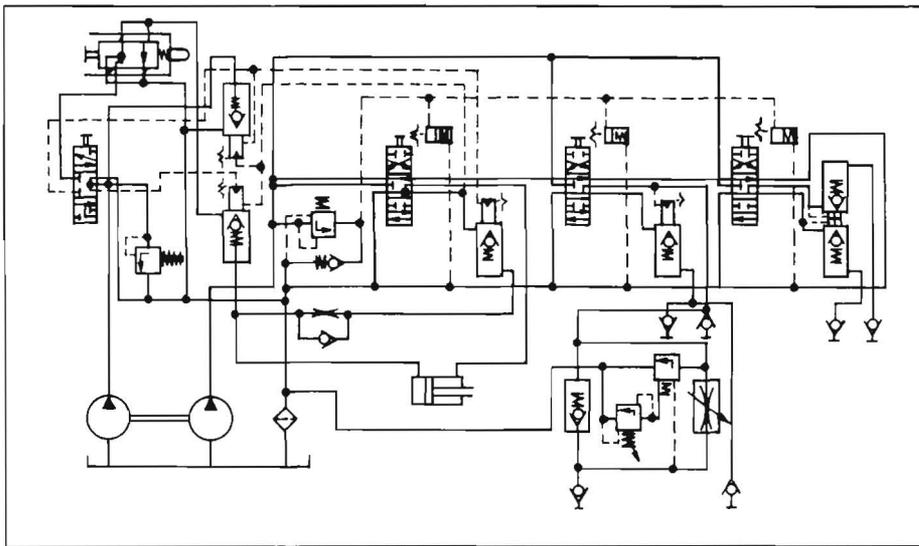


Bild 2. Arbeitshydraulik des Traktors ZT 320/323

3.3. Arbeitszylinder

Verluste im Arbeitszylinder lassen sich durch die Wirkungsgradangaben erfassen. Der Hersteller angegebene Wirkungsgrad η_{AZ} auf kann durch ein Polynom zweiten Grades gut angenähert werden:

$$\eta_{AZ} = e_0 + e_1 p + e_2 p^2.$$

Bild 3. Blockstruktur der Arbeitshydraulik des Traktors ZT 320/323; PUMP Pumpe, ARZY Arbeitszylinder, FILT Filter, RKN1 Rohrleitung mit Knie, STBL Steuerblock, TS Teilsystem

Damit lässt sich ein „äquivalenter“ Druckverlust durch die Beziehung

$$\Delta p = (1 - \eta_{AZ}) p$$

herleiten.

3.4. Lenkaggregat

Das Lenkaggregat ist ein sehr kompliziertes Gebilde. Deshalb können nur durch Experimente Angaben zu den Druckverlusten gewonnen werden. Für die Neutralstellung lässt sich die Druckverlustkennlinie durch die Gleichung

$$\Delta p = f_1 \dot{V} e^{f_2}$$

beschreiben. Die Druckverluste beim Lenken mit der Drehzahl n_L am Lenkrad werden mit folgender Beziehung erfasst:

$$\Delta p = h_1 \dot{V} e^{h_2 n_L}$$

3.5. Wegeventile, Rohr- und Schlauchleitungen, Filter, Schwenkverschraubungen

Die Widerstandscharakteristik der aufgeführten Geräte lässt sich grundsätzlich durch das gleiche mathematische Gesetz beschreiben. Mit dem Widerstandsbeiwert

$$\zeta = \frac{K_1}{Re} + K_2$$

kann der Druckverlust

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho}{2} v^2$$

berechnet werden. Natürlich unterscheiden sich die Konstanten K_1 und K_2 für die verschiedenen Elemente.

3.6. Querschnittsänderung

Die Druckverluste durch plötzliche Querschnittsveränderungen (Verengung bzw. Erweiterung) sind gering. Sie lassen sich durch den linearen Ansatz

$$\zeta = m_0 + m_1 Re$$

ausreichend genau erfassen.

Für die Hydraulikanlage des Traktors ZT320/323 liegen die in den vorangegangenen Beziehungen enthaltenen Konstanten vor [2]. Für diesen Traktor wurden auch die

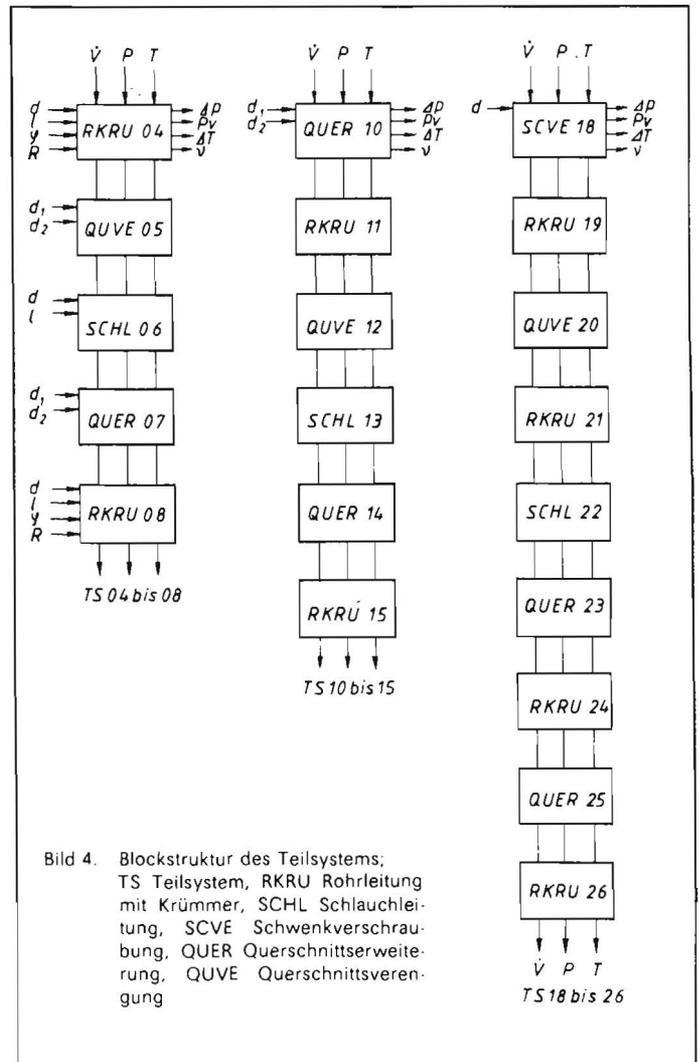
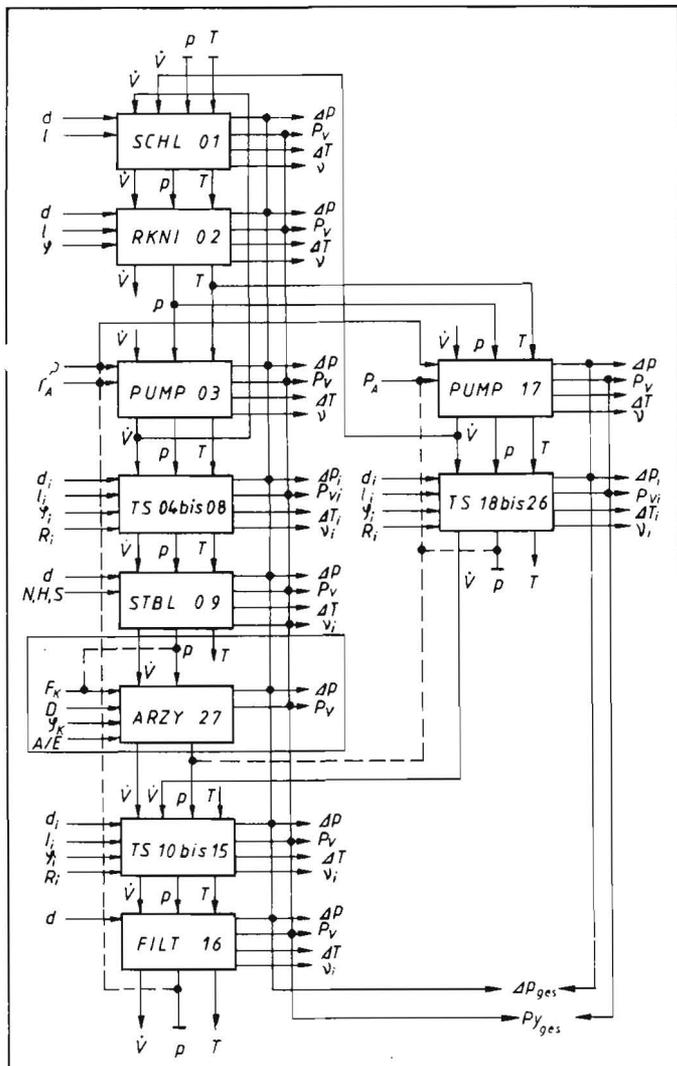


Bild 4. Blockstruktur des Teilsystems; TS Teilsystem, RKRU Rohrleitung mit Krümmer, SCHL Schlauchleitung, SCVE Schwenkverschraubung, QUER Querschnittserweiterung, QUVE Querschnittsverengung

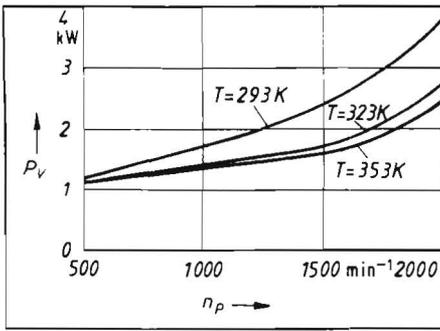
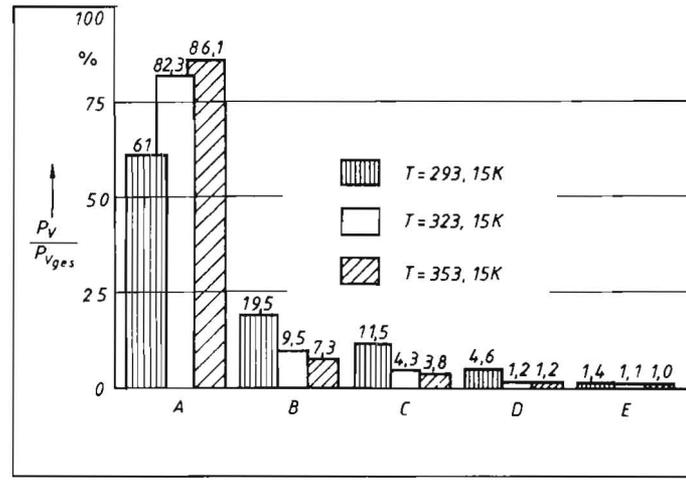


Bild 5
Verlustleistung
in der Arbeits-
hydraulik
(Neutralstellung)

Bild 6
Verlustleistungs-
anteile in der
Arbeitshydraulik
bei Motornen-
drehzahl
(Neutralstellung);
A Radialkolben-
kombination,
B Steuerblock,
C Rohre,
D Schläuche,
E Filter



erforderlichen geometrischen Größen des Hydrauliksystems ermittelt und damit Voraussetzungen für die rechen-technische Erfassung der hydraulischen Verlustleistung geschaffen.

4. Berechnungsmethode

Zur Berechnung der Verluste an Nutzenergie in Hydraulikanlagen von Traktoren steht bisher keine Software zur Verfügung. Die Erarbeitung eines speziellen Programms auf der Basis eines Rechenmodells erscheint auch nicht zweckmäßig, da der Zeitaufwand hierfür recht hoch und die universelle Anwendung eingeschränkt ist. Daher wurde auf das bewährte, an der Sektion Schiffstechnik der Universität Rostock entwickelte Systemprogramm ASTADY zurückgegriffen. Dieses Systemprogramm realisiert die sinnvolle Verbindung von Teilsystemen zu einer entsprechenden Systemstruktur bei festzulegendem Rechenablauf. Dabei können in Abhängigkeit von Erkenntnisstand und Aufgabenstellung die Teilsysteme bequem verändert werden. In [4] wird dargelegt, daß die allgemeinen Rechenabläufe sowie die Erfassung und Abarbeitung der Systemstruktur, d. h. die mathematische Kopplung zwischen den Teilsystemen, das Programm selbst bearbeitet, während die Erstellung der einzelnen Modelle der Teilsysteme dem Anwender obliegt. Im vorliegenden Fall entspricht jedes im Hydraulikkreislauf angeordnete Gerät bzw. Element (z. B. Pumpe, Wegeventil, Rohrleitung usw.) einem Teilsystem. Durch sinnvolle Kopplung der Teilsysteme kann damit das Betriebsverhalten des Gesamtsystems ermittelt werden.

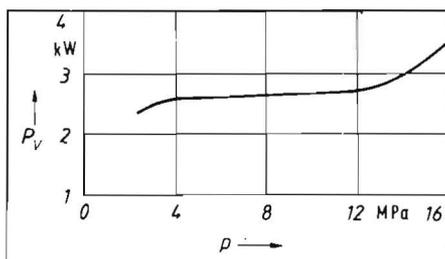
Das Systemprogramm ASTADY ist in der Sprache FORTRAN erstellt worden und kann im Normalfall an ESER-Rechenanlagen über PSU-Betrieb genutzt werden. Für die vorgesehene Berechnung der hydraulischen Verlustleistung liegt auch eine Version vor, die für den Einsatz eines PC7150 bzw. IBM XT nutzbar ist.

5. Berechnungsergebnisse

5.1. Arbeitshydraulik

Obwohl die Arbeitshydraulik des Traktors

Bild 7. Verlustleistung in der Arbeitshydraulik – Heben ($T = 323\text{ K}$, $n_p = 1500\text{ min}^{-1}$)



ZT320/323 einschließlich der Anlagenteile für die Regelhydraulik (Bild 2) ein recht kompliziertes System ist, gelingt es, für das o. g. Systemprogramm die Blockstruktur zu erarbeiten (Bild 3). Sie zeigt die Kopplung sowie die Ein- und Ausgabedaten. Es ist weiterhin möglich, bestimmte Teilsysteme weiter aufzugliedern (Bild 4) und der Berechnung zugänglich zu machen, z. B. für die Teilsysteme der Leitungsabschnitte 04 bis 08, 10 bis 15 und 18 bis 26. Für neutralen Umlauf, Heben und Senken lassen sich auf diesem Weg der Gesamtdruckverlust und die gesamte Verlustleistung berechnen.

Ein Ergebnis der Rechnung für den neutralen Umlauf des Öls ist im Bild 5 dargestellt. Typisch ist zunächst die Drehzahl- und Temperaturabhängigkeit der hydraulischen Verlustleistung. Als markant muß herausgestellt werden, daß bei der Motornendrehzahl von 1800 min^{-1} und einer Betriebstemperatur von 50°C Leistungsverluste in Höhe von 2 kW auftreten.

Daß neben den Druckverlusten vornehmlich die Leckverluste in der Radialkolbenpumpenkombination den größten Anteil ausmachen, wird im Bild 6 erkennbar. Während der Steuerblock und die Rohre einen noch merklichen Leistungsverlust erbringen, ist dieser für Schläuche und Filter vernachlässigbar klein.

Der Verlauf der Leistungsverluste in der Arbeitshydraulik beim Heben des Krafthebers wurde im Bild 7 dargestellt. Für mittlere Drücke ist die Verlustleistung nahezu konstant und liegt bei $2,7\text{ kW}$. Insgesamt wird sie im wesentlichen vom Arbeitszylinder bestimmt. Rohr- und Schlauchleitungen sind von untergeordneter Bedeutung.

Für das Senken des Krafthebers ist der Fall von Interesse, daß dieser Vorgang lastlos erfolgt. Für eine Pumpendrehzahl von 500 min^{-1} und eine Öltemperatur von 50°C beträgt die Verlustleistung $1,7\text{ kW}$. Nimmt man jedoch den Fall, daß sich der Kraftheber ohne Druckeinwirkung beim Auftreten einer äußeren Kraft senken soll, dann ergeben sich Verhältnisse, wie sie im Bild 8 dargestellt wurden. Die dann hohen Leistungsverluste werden besonders durch die Drosselverluste des Steuerblocks bestimmt und sind deshalb größer als beim Heben des Krafthebers.

5.2. Lenkhydraulik

Bild 9 enthält den Schaltplan der Lenkhydraulik des Traktors ZT 320/323. Die für das Systemprogramm ASTADY aufgestellte Blockstruktur ist Bild 10 zu entnehmen. Zum

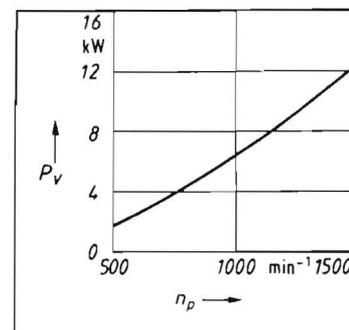
Teilsystem (TS) A gehört die Saugleitungsstrecke, mit TS B wird die gesamte Leitung von der Pumpe zum Lenkaggregat dargestellt. Wird die Pumpe nicht betätigt, so erfolgt nach dem Lenkaggregat über TS C die Verbindung zum Behälter. Beim Lenken sind TS D und TS E die Leitungen zum bzw. vom Lenkzylinder. Der Rechts- oder Linkschlag wird durch die Eingangsgröße P-R oder P-L am Lenkaggregat LAGB 02 entschieden.

Die sehr unterschiedlichen geometrischen Verhältnisse der Strömungskanäle im Lenkaggregat zwangen zur Festlegung von äquivalenten Leitungslängen. Ebenso mußten die Durchmesser gemittelt werden. Zur exakteren Berechnung wäre die getrennte rechen-technische Analyse dieser Teilsysteme notwendig.

Für den Fall, daß keine Lenkbewegung ausgeführt wird, zeigt Bild 11 die berechneten Leistungsverluste. Sie sind mit der eingesetzten Antriebsleistung identisch. Wegen des mit der Drehzahl wachsenden Volumenstroms steigen die Verluste stark an. Das betrifft auch den Betrieb bei niedrigen Temperaturen.

Im Bild 12 sind die Ergebnisse bei Lenkbewegung für unterschiedliche Drücke am Lenkzylinder zusammengestellt. Vorausgesetzt wurde hierfür ein Volumenstrom am Lenkzylinder von 5 l/min , was einer Drehzahl am Lenkrad von 24 min^{-1} entspricht. Die Unterschiede im Berechnungsergebnis für Rechts- und Linkseinschlag der Räder sind außerordentlich gering. Auffallend sind jedoch die relativ hohen Verluste an hydraulischer Leistung, was eine Folge der verwendeten großvolumigen Konstantpumpe ist. Bei niedrigem Bedarf an Volumenstrom am Lenkzylinder sind die Verluste besonders hoch.

Bild 8. Verlustleistung in der Arbeitshydraulik – Senken ($T = 323\text{ K}$)



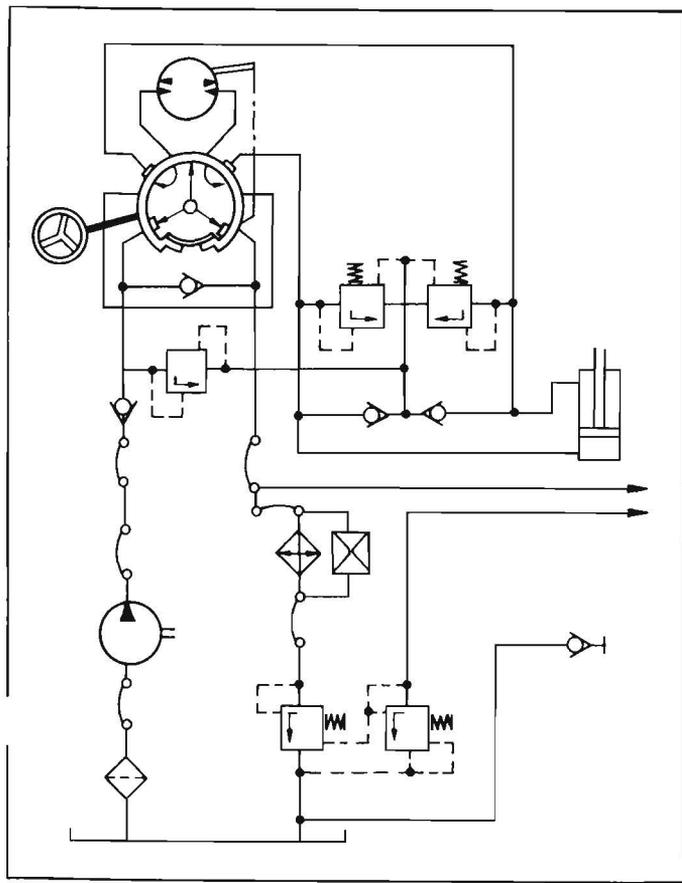


Bild 9. Lenkhydraulik des Traktors ZT 300/323

6. Schlußfolgerungen

Die Untersuchung des Hydrauliksystems des Traktors ZT 320/323 bezüglich der auftretenden Leistungsverluste deckte sowohl die Verlustquellen als auch die Höhe der Verluste auf. Zusammenfassend lassen sich folgende Schlußfolgerungen ableiten:

- Das für Antriebsprobleme universell nutzbare Programmsystem ASTADY ermöglicht die Berechnung der Leistungsverluste in der Arbeits- und Lenkhydraulik von Traktoren. Damit kann bereits im Stadium der Projektierung die günstigste schaltungstechnische Variante ausgewählt werden.
- Von den Produzenten der Hydraulikgeräte muß verlangt werden, daß die Gerätedaten, -kennwerte usw. in vereinheitlichter, rechnerfreundlicher Form (siehe [5, 6]) dargestellt werden.
- Der Volumenstrom der Pumpe für die Arbeitshydraulik im Traktor ZT 320/323 ist im Vergleich zu anderen Erzeugnissen relativ hoch. Deshalb treten bereits bei lastlosem Betrieb (Leerlauf der Pumpe) beachtenswerte

Bild 11. Verlustleistung in der Lenkhydraulik – ohne Lenkbewegung

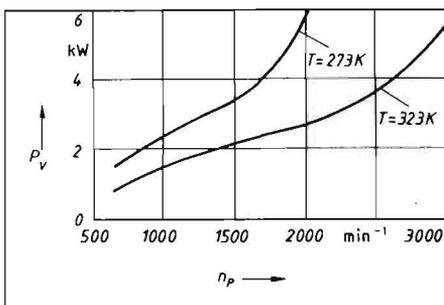
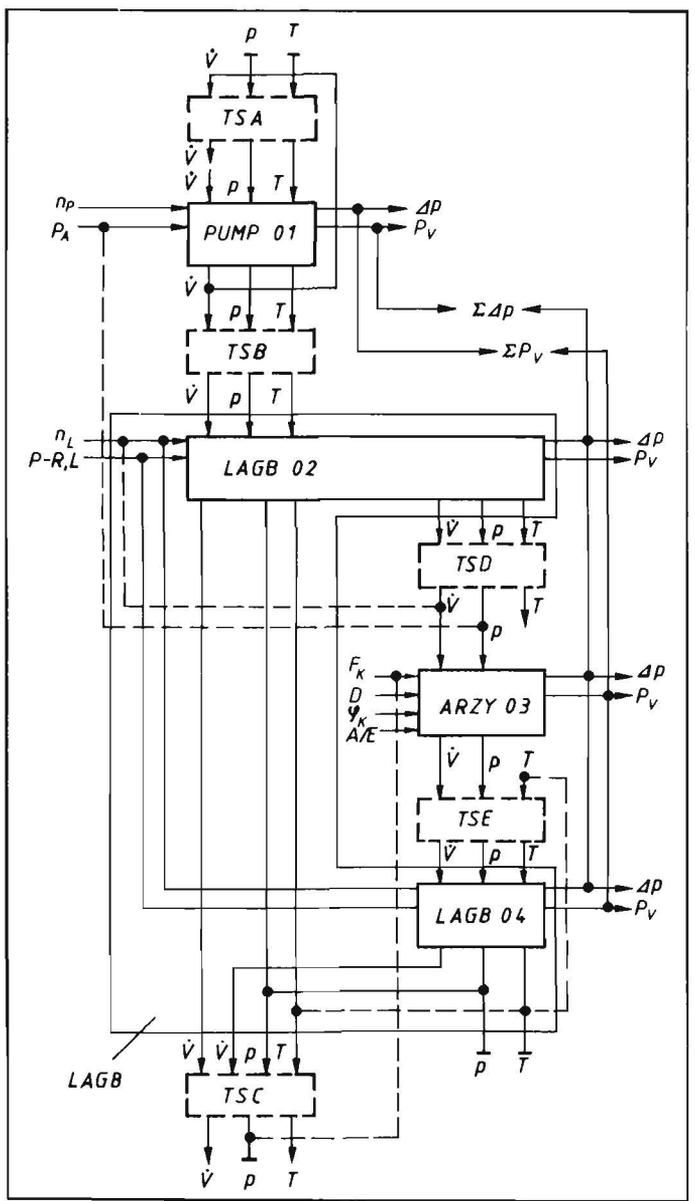


Bild 10. Blockstruktur der Lenkhydraulik des Traktors ZT 320/323; PUMP Pumpe, LAGB Lenkaggregat, ARZY Arbeitszylinder, TS Teilsystem



Leistungsverluste auf. Bei Nichtbenutzung der Arbeitshydraulik sollte daher die Zweistrom-Radialkolbenpumpe zum Zweck der Verlustsenkung abgeschaltet werden.

- Ein großer Teil der Verluste in der Hydraulikanlage entsteht im Lenkungsreislauf. Im Normalfall wird ein zu geringer Teil des geförderten Öls zum Lenken benötigt. Der Rest fließt ungenutzt in den Behälter ab.
- Es ist lohnend, über Veränderungen im Hydrauliksystem des Traktors ZT 320/323 nachzudenken und nach Lösungen zu suchen, die den Energieaufwand senken. Dabei ist die Mehrfachnutzung des Volumensstroms von Pumpen zu beachten. Systeme, die das Anpassen des Druckölangebots an den Druckölbedarf gewährleisten, sind energetisch vorteilhaft.

Literatur

[1] Schmidt, W.: Hydraulikdaten von Traktoren. agrartechnik, Berlin 39(1989)4, S. 183–185.
 [2] Schmidt, W.: Energetische Untersuchungen an Hydrauliksystemen. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Landtechnik, Forschungsbericht 1989 (unveröffentlicht).

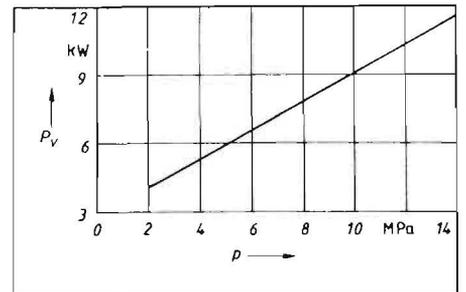


Bild 12. Verlustleistung in der Lenkhydraulik – mit Lenkbewegung (T = 323 K, $n_p = 1500 \text{ min}^{-1}$, $n_l = 24 \text{ min}^{-1}$)

[3] Witt, K.: Berechnungsgrundlagen zur Auswertung von Temperatur- und Temperatur-Druckmessungen. Ölhdraulik und Pneumatik, Mainz 21(1977)3, S. 161–169.
 [4] Stieper, K.: Anwenderinformation zum Programmsystem ASTADY. Wilhelm-Pieck-Universität, Rostock, Sektion Schiffstechnik (unveröffentlicht).
 [5] Will, D.: Ermittlung der Druckverluste in hydraulischen Anlagen. Maschinenbautechnik, Berlin 24(1975)4, S. 177–182.
 [6] Will, D.; Ströhl, H.: Einführung in die Hydraulik und Pneumatik. Berlin: VEB Verlag Technik 1981. A 5879