



Zwischen den Drücken lesen

Effizienzsteigerung durch ein Konstantdrucksystem mit Zwischendruckleitung

Peter Dengler, Marcus Geimer

Ein Konstantdrucksystem mit Zwischendruckleitung erlaubt den energieeffizienten Betrieb von translatorischen Verbrauchern in mobilen Arbeitsmaschinen. Über 3/2-Wegeventile kann der Arbeitsdruck für Linearverbraucher angepasst und die Drosselverluste reduziert werden.

Ein Hydraulikspeicher ermöglicht zusätzlich die Speicherung rekupe-rierter potentieller Energie aus der Arbeitshydraulik.

Autoren: Dipl.-Ing. Peter Dengler (wissenschaftlicher Mitarbeiter) und Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer (Institutsleiter) sind beide am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) tätig

Hydraulische Antriebssysteme in mobilen Arbeitsmaschinen

Für den Antrieb der Arbeitshydraulik mobiler Arbeitsmaschinen sind derzeit drei verschiedene Energieversorgungssysteme vorzufinden:

- Konstantstromsysteme,
- Konstantdrucksysteme sowie
- Load-Sensing-Systeme (LS-Systeme).

Bei Konstantstromsystemen treten beim Betrieb von Verbrauchern mit geringer Volumenstromanforderung relativ hohe Verluste auf, weil die Pumpe ständig den maximalen Volumenstrom liefert. Der überschüssige Volumenstrom wird direkt in den Tank geleitet. Diese Verluste könnten in einem ersten Schritt durch Konstantdrucksysteme mit regelbaren Pumpen durch eine Anpassung des Volumenstroms der Pumpe reduziert werden. Dennoch muss der überschüssige Druck am Verbraucher durch ein Proportionalventil abgedrosselt werden, so dass vor allem im Teillastbereich hohe Verluste entstehen können.

LS-Systeme stellen derzeit das grundsätzlich energieeffizienteste Antriebssystem dar, da sich sowohl der Volumenstrom der Pumpe als auch der Systemdruck an den aktuellen Bedarf der Verbraucher anpasst (**Bild 1**). Dadurch können systembedingte Verluste noch weiter reduziert werden.

Nachteilig werden an LS-Systemen neben der Schwingungsanfälligkeit auch die hohen Verluste angesehen, die beim parallelen Betrieb mehrerer Verbraucher mit hohen Volumenströmen und unterschiedlichen Lastdrücken auftreten.

Konstantdrucksysteme mit angeschlossenem Speicher neigen weniger zum Schwingen als LS-Systeme, da die Pumpenregelung von der Regelung der Verbraucher entkoppelt ist [1]. Weiterentwicklungen in der Motorenregelung haben Konstantdrucksysteme zu sehr effizienten Systemen werden lassen, indem durch eine reine Motorregelung (Sekundärregelung) prinzipbedingte Verluste theoretisch eliminiert werden [2], [3]. Konstantdrucksysteme mit Sekundärregelung benötigen für die Leistungsregelung keine Ventile und sind daher vor allem beim parallelen Betrieb mehrerer (rotatorischer) Verbraucher effizienter als LS-Systeme. Konzepte für sekundärregelte Motoren liegen vor und werden heute erfolgreich eingesetzt [4], [5].

Problematisch ist jedoch nach wie vor die energieeffiziente Druckversorgung von linearen Verbrauchern in einem Konstantdrucksystem. Bislang musste der hohe Druck an einem Proportionalventil abgedrosselt werden, um Linearaktuatoren im Teillastbereich zu betreiben. Anders als bei Hydromotoren ist eine Anpassung des Ver-

brauchers an unterschiedliche Lasten durch eine Änderung der Zylinderfläche nicht möglich. Hierzu sind spezielle Komponenten wie z. B. der Hydrotransformator (**Bild 2**) oder Zylinder mit zuschaltbaren Wirkflächen nötig, um diese effizient in einem Konstantdrucksystem betreiben zu können [6], [7], [8]. Diese Systeme sind seit langer Zeit bekannt, jedoch bis heute nicht serienreif verfügbar.

Eine wesentliche Herausforderung bei der Entwicklung energiesparender Konstantdrucksysteme als Gesamtantriebssystem für sowohl rotatorische als auch lineare Verbraucher ist demnach die energie- und kosteneffiziente Integration der Arbeitshydraulik in ein Konstantdrucksystem.

Ein Beitrag dazu wird am Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) zusammen mit der ARGO-HYTOS GmbH, der Fluidon GmbH und der Hermann Paus Maschinenfabrik GmbH geleistet. Hier wird im Rahmen des Projekts „KonZwi“ an einem Konzept gearbeitet, das einen energieeffizienten Betrieb von Linearaktoren in einem Konstantdrucksystem erlaubt. Dieses Konzept soll am Beispiel eines Radladers untersucht werden und wird im Rahmen dieses Beitrags näher erläutert.

Höhere Effizienz mit einer Zwischendruckleitung

Ausgehend von einem Konstantdrucksystem wird neben der Hochdruckleitung, die direkt von der Pumpe gespeist wird, zusätz-

lich eine weitere Druckleitung vorgesehen (**Bild 3**). An diese Leitung ist ein Speicher angeschlossen, in dem Energie zwischengespeichert werden kann. Der Speicher ist auf einen Druck vorgespannt, der niedriger als der Druck in der Hochdruckleitung, jedoch höher als der in der Tankleitung ist, so dass von einer Zwischendruckleitung gesprochen werden kann. Das System, bestehend aus einer Konstantdruck- und einer Zwischendruckleitung, wird im Folgenden **KonZwi**-System genannt.

Durch einfache 3/2-Wegeventile kann individuell für jeden Zylinder eine eigene Druckstufe definiert werden, indem Kolben- und Ringseite mit Hoch-, Zwischen- oder Tankdruckleitung verbunden werden. Dadurch verringert sich der Differenzdruck am Verbraucher, was zu geringeren Drosselverlusten führt, wenn ein Zylinder mit geringeren Lasten verfahren werden soll. Die Feinsteuerung der Bewegung erfolgt über ein Proportionalventil. Zusätzlich kann z. B. beim Absenken von Lasten Energie im Speicher gespeichert und beim späteren Anheben wieder abgerufen werden. Dadurch ist die Grundlage für ein hybrides Antriebssystem geschaffen, das ohne weitere spezielle Komponenten auskommt.

Betriebspunkte und Speichermanagement

Das KonZwi-System ist grundsätzlich um beliebig viele weitere Zwischendruckleitungen erweiterbar, wodurch eine noch

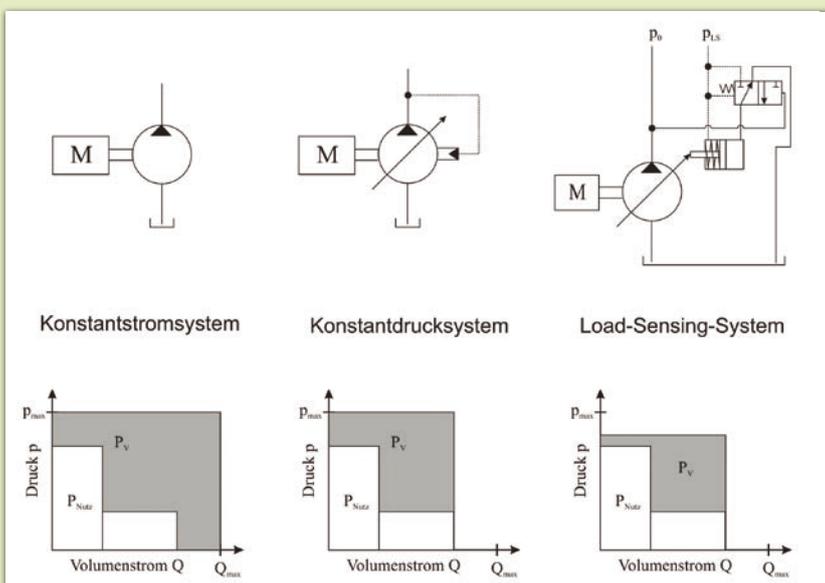
feinere Einteilung der Druckstufen möglich wäre. Dadurch würden jedoch auch die Komplexität des Systems und damit die Anzahl der notwendigen Ventile steigen. Ein Beispiel hierfür ist die Matrixschaltung [9]. In einem ersten Schritt wird also zunächst nur eine Zwischendruckleitung betrachtet, welche folgende Druckstufen erlaubt:

- Hochdruck (HD) - Tankdruck (TD),
- Hochdruck - Zwischendruck (ZD),
- Zwischendruck - Hochdruck,
- Zwischendruck - Tankdruck,
- Zwischendruck - Zwischendruck.

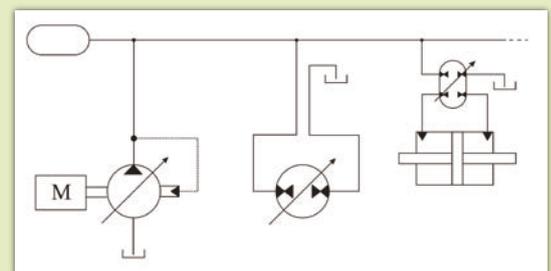
Drucksensoren, die an die Kolben- und Ringseite des Zylinders angeschlossen sind, erfassen den auf den Zylinder wirkenden Lastdruck. Zusätzlich muss auch der Druck in der ZD-Leitung überwacht werden, damit die Steuerung die für den Lastfall optimale Druckstufe erkennen und über die 3/2-Wegeventile einstellen kann. Im Falle von ziehenden Lasten sind alle Druckstufen auch in „umgekehrter“ Richtung schaltbar, so dass beispielsweise bei der Druckstufe ZD-TD aus der TD-Leitung Öl entnommen und in die ZD-Leitung gedrückt werden kann.

Einen Sonderfall stellt die Druckstufe ZD-ZD dar: diese funktioniert ähnlich dem Prinzip der Eilgangschaltung [10], indem Stangen- und Kolbenseite über die ZD-Leitung kurzgeschlossen werden. In Abhängigkeit von der Zylindergeometrie und des Druckes in der ZD-Leitung können dabei unterschiedlich hohe Kräfte entstehen.

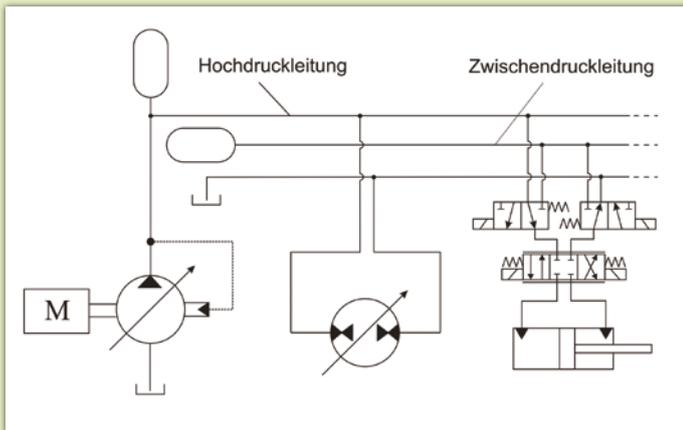
Eine Druckstufe kann grundsätzlich nur dann gewählt werden, wenn die damit er-



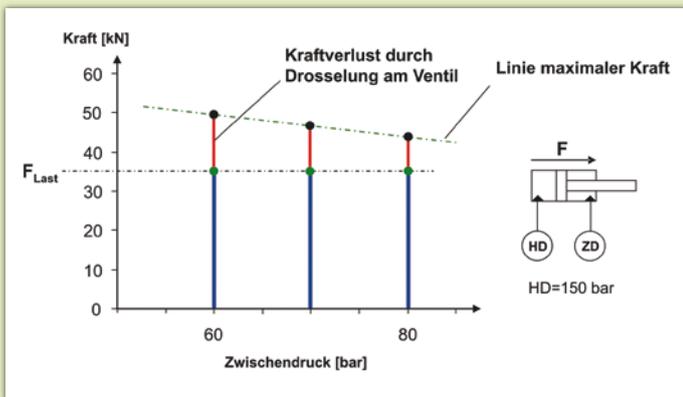
1: Heute eingesetzte Energieversorgungssysteme und deren Charakteristik



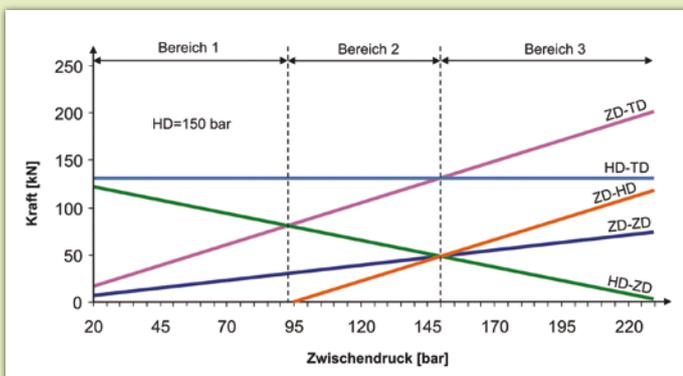
2: Konstantdrucksystem mit sekundärgeregeltem Motor und Hydrotransformator



3: Konstantdrucksystem mit Zwischendruckleitung



4: Maximalkräfte und Verluste bei der Stufe HD-ZD



5: Maximalkräfte der Druckstufen in Abhängigkeit des Zwischendrucks

reichbare Kraft ausreicht, um die am Zylinder wirkende Last zu bewegen. Um eine kontinuierliche Bewegung zu gewährleisten, muss diese Kraft also über der aktuell anliegenden Last liegen. Die Differenz zwischen der aus der zugeschalteten Druckstufe verfügbaren Kraft und der am Zylinder benötigten Kraft wird am Proportionalventil in Form von Drosselverlusten vernichtet. **Bild 4** zeigt am Beispiel der Druckstufe HD-ZD an einem Differentialzylinder den Zusammenhang zwischen der Höhe der Verluste und dem Zwischendruck bei konstanter Geschwindigkeit und Last (stationärer Zustand). Mit steigendem Druck in der ZD-Leitung sinkt die Druckdifferenz zwischen HD-Leitung und ZD-Leitung und damit die verfügbare Kraft, um den Zylinder zu bewegen. Um die Geschwindigkeit aufrechterhalten

zu können, muss also das Proportionalventil weiter geöffnet werden, was zu einer Verringerung der Drosselverluste führt.

Die sich bei einer Druckstufe für jeden Zwischendruck ergebenden Maximalkräfte bilden eine Linie, die über dem Zwischendruck aufgetragen werden kann. Die Druckstufe und der Zwischendruck müssen also bei gegebenem Lastfall so gewählt werden, dass die Verluste minimal werden.

Analog zur Stufe HD-ZD können nun auch für die übrigen Druckstufen die Linien maximaler Kraft über den Zwischendruck aufgetragen werden (**Bild 5**). Es zeigt sich, dass sich je nach Höhe des Zwischendrucks die Reihenfolge der Druckstufen verändert. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Bereiche, die durch Punkte getrennt sind, in denen die gleiche Kraft mit zwei un-

terschiedlichen Schaltstellungen erreicht werden kann.

Für die Wahl der Speichergröße und des Vorspanndruckes ist es also wichtig zu wissen, welche Kräfte auftreten und in welchem Druckbereich die Schaltung betrieben werden soll. Dabei ist je nach Speichergröße sowohl ein statischer Betrieb mit einem quasi konstanten Druck als auch ein stetiger Wechsel zwischen den Bereichen durch Laden und Entladen des Speichers möglich. Durch Ausnutzung der potenziellen Energie ist darüber hinaus auch ein Wechsel in einen Bereich vorstellbar, in dem der Druck in der ZD-Leitung höher ist als in der HD-Leitung (in Bild 5 durch Bereich 3 dargestellt).

Bisherige Arbeiten und Ausblick

Das vorgestellte System basiert auf einer Konstantdruckleitung in Verbindung mit einer Zwischendruckleitung. Für jeden Zylinder kann über 3/2-Wegeventile eine Druckstufe erzeugt werden, die auf seine Kraftanforderung abgestimmt ist. Dadurch können Druckverluste, wie sie bei Konstantdrucksystemen auftreten, reduziert werden. Eine Steuerung ermittelt die erforderliche Kraft zum Bewegen des Zylinders und erzeugt durch das Schalten von 3/2-Wegeventilen die passende Druckstufe. Eine übergeordnete Steuerung überwacht Speicherdruck und Speicherfüllgrad und kontrolliert den Wechsel zwischen den Druckbereichen.

Für die Erfassung des Ist-Zustandes wurde ein Radlader mit Messtechnik ausgestattet und es wurden Fahrversuche durchgeführt. Dabei wurden die auftretenden Be-



6: Ventilblock mit zwei Schaltventilen und einem Proportionalventil

lastungen und Verfahrgeschwindigkeiten bei typischen Arbeitseinsätzen eines Radladers wie z. B. das Graben oder das Verladen von Paletten aufgezeichnet.

Für den Aufbau des KonZwi-Systems wurde anschließend für jeden Zylinder ein Ventilblock gefertigt, der aus zwei Schaltventilen und einem Proportionalventil besteht (**Bild 6**). In einem nächsten Schritt ist es vorgesehen einen Prüfstand aufzubauen, um die KonZwi-Schaltung zu testen und die Steuerung hinsichtlich des Schalt- und Regelverhaltens der Ventile zu optimieren.

Zusätzlich wird das System im Simulationsprogramm DSHplus [11] modelliert und die Steuerung unter Verwendung der aus den Fahr- und Prüfstandsversuchen erhaltenen Messergebnisse weiter optimiert, um die Energieeffizienz des Systems weiter zu erhöhen. In einem letzten Schritt soll das KonZwi-System in den Radlader eingebaut und die Effizienzsteigerung nachgewiesen werden.

Danksagung

Das KonZwi-Projekt wird in Zusammenarbeit mit den Firmen ARGO-HYTOS GmbH, FLUIDON GmbH und Hermann Paus Maschinenfabrik GmbH am Mobima bearbeitet. Dieses Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betreut. Die Autoren danken dem BMBF und dem DLR für die Förderung und Betreuung dieses Projektes.

Quellenangaben

- [1] Langen, A.: *Experimentelle und analytische Untersuchungen an vorgesteuerten hydraulisch-mechanischen und elektro-hydraulischen Pumpenregelungen*, Dissertation, RWTH Aachen, 1986.
 [2] Zähe, B.: *Energiesparende Schaltungen hydraulischer Antriebe mit veränderlichem Versorgungsdruck und ihre Regelung*, Dissertation, RWTH Aachen, 1993.
 [3] Haas, H.-J.: *Sekundärregelte hydrostatische Antriebe im Drehzahl- und Drehwinkelregelkreis*, Dissertation, RWTH Aachen, 1989.

- [4] N.N.: *Sekundärregelung mit A4VSO/G-Axialkolbenheiten*, Bosch Rexroth Datenblatt RD92056/10.04, http://www.boschrexroth.com/borexmvz2/DetailView.jsp?jsessionid=068E4B8C1BF49564587B6DBD813FE3A3?language=en-GB&publication=NET&ccat_id=20000&edition_id=1103678&document_id=1075354; Stand: 3.11.2010
 [5] Fischer, H.; Steigerwald, T.; Godzik, M.: *Hydraulic Systems for Deep-Sea Applications*, 7th International Fluid Power Conference, Aachen, 2010.
 [6] Rothhäuser, S.; Achten, P.: *Ein neuer alter Bekannter – Der Hydrotransformator*, O+P Ölhydraulik und Pneumatik Heft 6, 1998.
 [7] Linjama et al.: *Secondary Controlled Multi Chamber Cylinder*, 11th Scandinavian International Conference on Fluid Power, Juni 2009, Linköping, Schweden.
 [8] Bishop, E. D.: *Digital Hydraulic Transformer – Approaching theoretical Perfection in Hydraulic Drive Efficiency*, 11th Scandinavian International Conference on Fluid Power, Juni 2009, Linköping, Schweden.
 [9] Theissen, H.: *Energie sparen mit der Matrixschaltung*, O+P Ölhydraulik und Pneumatik Heft 8, S. 340-343, 2009.
 [10] Geimer, M.: *Fluidtechnik, Umdruck zur Vorlesung*, Karlsruhe, 2010.
 [11] N.N.: *DSHplus Benutzerhandbuch*, FLUIDON GmbH, Aachen 2001