



Modellbildung, Simulation und Regelungskonzepte für eine hydraulische Versorgungseinheit zur Druck-Förderstrom-Regelung

Bearbeiter: Josef Schnabler

Zusammenfassung der Diplomarbeit von Josef Schnabler (März 1998)

Kurzfassung

Bei vielen Anwendungen sollen hydraulische Netzwerke entweder konstanten Druck oder auch konstanten Förderstrom am Verbraucher haben. Dies ist eine mittels konventioneller hydraulischer Methoden schwer zu erfüllende Anforderung. Ziel dieser Arbeit ist es, unter Ausnutzung digitaler Prozessrechner eine Regelung für eine bestehende Labor-Versorgungseinheit so zu entwerfen, dass einerseits der Druckabfall über einen Verbraucher, beziehungsweise der Durchfluss durch denselbigen innerhalb definierter Toleranzen zu liegen kommt. Für die Druckregelung gelingt es, bei Rampenbetrieb von 0 bis 30 l/min mit 30 s Rampenanstiegszeit den Verbraucherdruck besser als ± 0.45 bar einzuhalten (bei 2 s Rampenanstiegszeit ± 1.0 bar). Der Förderstrom, wengleich schlechter in den Griff zu bekommen, kann bei rampenförmiger Störung (Anstiegszeit 30 s) durch einen Verbraucher auf ± 0.45 l/min geregelt werden. Diese Ergebnisse sind für Anwendungen, wie etwa das Ausmessen von Ventilen, ausreichend.

1. Einleitung

Ohne sich auf spezielle Anwendungen zu fixieren, kann eine Forderung an ein hydraulisches Netzwerk die Einhaltung von entweder konstantem Druck oder konstantem Förderstrom sein. Als Beispiele seien das Ausmessen von Ventilen, Konstantkraft-Pressen oder Konstantgeschwindigkeit mittels Hydraulikzylindern angeführt.

Ein solcher Druck-Förderstromregler soll nun für die Versorgungseinheit der Hydraulik-Laboranlage an der Abteilung für Grundlagen der Maschinenlehre entworfen und untersucht werden. Der schematische Aufbau ist

in Bild 1 dargestellt. Im Wesentlichen besteht diese Anlage aus drei Subsystemen: dem Druckbegrenzungsventil (DBV), dem Proportionalventil (PV) und der hydraulischen Druckregleinheit (DRE). Letztere beinhaltet die Schrägscheiben-Axialkolbenpumpe. DBV, PV und DRE werden zusammen als Versorgungseinheit definiert.

Der die Versorgungseinheit verlassende Förderstrom fließt nun noch durch das Filter und Rohrleitungssystem bis er schließlich am Verbraucher genutzt wird.

Der nachfolgende Abschnitt zeigt vereinfacht das Problem der rein hydraulischen Druck- bzw. Förderstrom-Regelung. Eine wesentlich ausführlichere Diskussion kann [1] entnommen werden.

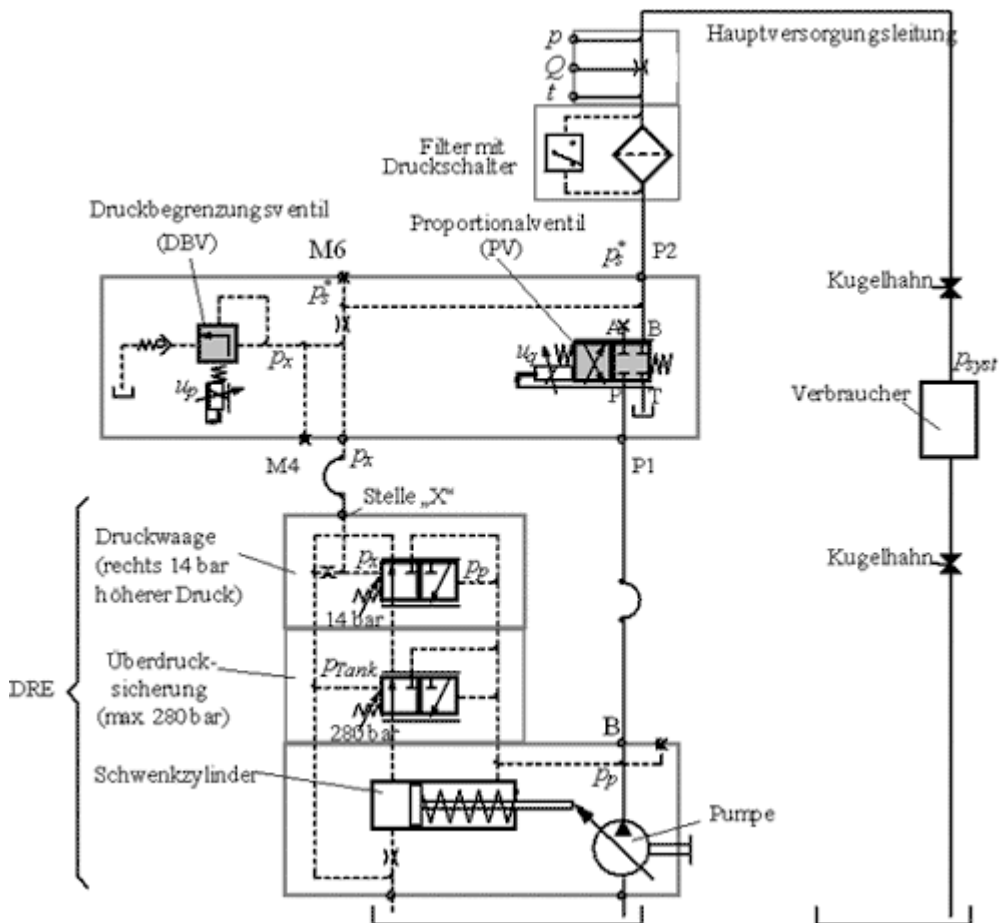


Bild 1: Hydraulischer Schaltplan der Versorgungseinheit

1. Die Problemstellung

Wunsch ist es, den Druck am Verbraucher, p_{sys} , zu regeln. Die DRE zieht aber den Druck an der Stelle "X" (p_x) als Referenz heran, welcher durch das DBV über ein manuelles Potentiometer eingestellt wird. Die DRE realisiert den Pumpendruck $p_p (= p_x + 14 \text{ bar})$.

Nun hängt aber der DBV-Einstelldruck vom Volumenstrom durch das DBV ab, womit der Referenzdruck p_x bei Belastungsänderungen (durch den Verbraucher) variiert. Dies bewirkt eine Veränderung des Pumpendruckes und somit auch eine des Druckes p_{sys} am Verbraucher. Als Grund für die Druckungenauigkeiten am Verbraucher können daher zwei Ursachen genannt werden:

- nicht ideale Eigenschaften des Druckbegrenzungsventiles (volumenstromabhängig);
- fehlende Rückführung des Verbraucherdruckes.

Einfache Versuche zeigen Druckfehler bis zu 10 bar und darüber für 30 l/min Förderstrom-änderung vom stationären Wert.

Förderstromkonstanz kann mit dem in Bild 1 dargestellten System nicht effizient erreicht werden, da kein direkter Zugriff auf den Schwenkzylinder vorhanden ist. Daher muss für eine Volumenstromregelung der Umweg über die Druckregelung beschritten werden.

2. Ein mechatronischer Lösungsversuch

Zunächst muss die Dynamik des gegenwärtigen Systems gründlich mittels Modellbildung und Simulation verstanden werden. Dies bildet die Grundlage für Regelungskonzepte, welche Informationen über durchzuführende Messungen zur Identifikation des Prozesses liefern. Nachdem Regelgesetze erarbeitet sind können diese mittels eines Signalprozessors implementiert werden. Integration von Regler und System (durch Messen von Drücken bzw. Förderströmen und Ansteuern von DBV bzw. PV) führt somit zu einem modular erweiterten Gesamtsystem mit wesentlich besseren Systemeigenschaften.

2. Modellbildung

Bild 2 zeigt ein Blockmodell des Gesamtsystems:

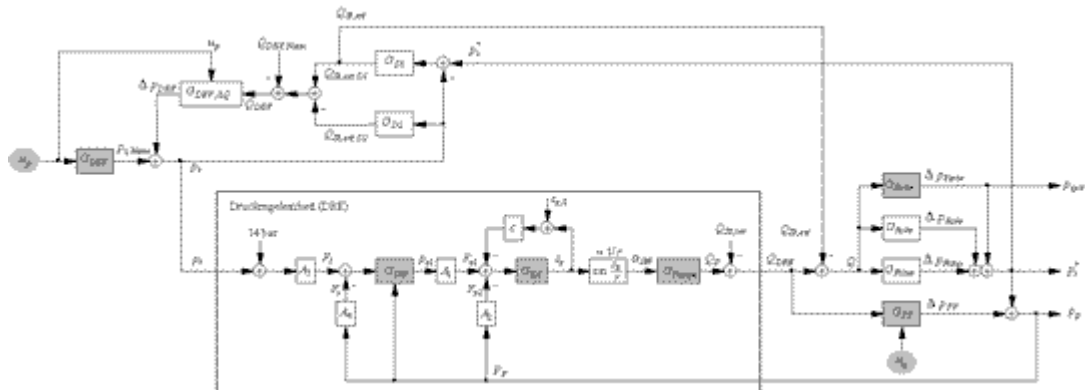


Bild 2: Gesamtmodell des hydraulischen Prozesses

Ein Regelungskonzept geht von einer schnellen DRE und von einem langsamen PV aus. Somit kann der Pumpendruck p_p durch p_x , also mittels Druckbegrenzungsventiles (DBV) eingestellt werden. Da das Proportionalventil langsam ist, trägt es nichts zur Regelung bei und wird ständig offen gehalten. Somit kann der Systemdruck p_{sys} ausschließlich durch das DBV geregelt werden. [1] diskutiert auch andere Reglerkonzepte.

Daraus ergeben sich folgende Messaufgaben: Gerechtfertigung der Annahme einer schnellen DRE und eines langsamen PV, statisches sowie dynamisches Übertragungsverhalten des DBV, und stationärer Zusammenhang von Schwenkzylinderkolbenweg und Förderstrom.

3. Prozessidentifikation

Mit der stationären Kennlinie vom DBV kann Auskunft über Gültigkeitsbereiche von Linearisierungen gegeben werden: hier kann für $p_x > 50$ bar Linearität angenommen werden. Mittels dynamischer Identifikation (z.B. FFT, kleinste Fehlerquadrate) ist es möglich, das dynamische Verhalten des DBV (bei einer Abtastzeit von 1 ms) folgendermaßen anzugeben:

$$G_{DBV}(z) = \frac{\hat{p}_x}{\hat{u}_p} = \frac{0.0017734}{z^3 - 1.4142z^2 - 0.13005801z + 0.5452382} \quad \left[\frac{\text{bar}}{\%} \right]$$

mit dem Kleinsignal \hat{p}_x um den stat. Wert von p_x , und dem Kleinsignal \hat{u}_p um den stationären Wert des DBV-Eingangssignales.

Weitere Messungen untermauern die Annahme nach einer schnellen Druckregleinheit (DRE, $f_{g,DRE}=4.8 \dots 6.4$ Hz) in bezug auf das Proportionalventil (PV, $f_{g,DRE}=3.5$ Hz). Jedoch weist auch das Druckbegrenzungsventil eine langsamere Grenzfrequenz auf ($f_{g,DBV}=2.7$ Hz). Somit wird das oben vorgeschlagene Regelungskonzept, grob gesagt, nicht in der Lage sein, Störanteile im Frequenzbereich zwischen $f_{g,DBV}$ und $f_{g,DRE}$ auszugleichen. Daher ist die Regelungsqualität primär durch die Schnelligkeit der Bauteile eingeschränkt.

4. Regelungskonzepte

Nach Beendigung der Prozessidentifikationsaufgaben kann mittels dem Modell aus Kapitel 2 und der ausgewerteten Messergebnisse ein Druckregler entworfen werden, der den DBV-Druck p_x mittels u_p so einstellt, dass der Druck am Verbraucher p_{sys} den Sollwert erreicht. Das resultierende (PI-) Reglergesetz lautet somit

$$R(z) = \frac{0.0536948 z - 0.052138}{z - 1} \Big|_{T_s = 0.001s} \cong 1.557 \frac{1 + \frac{s}{29.5}}{s}$$

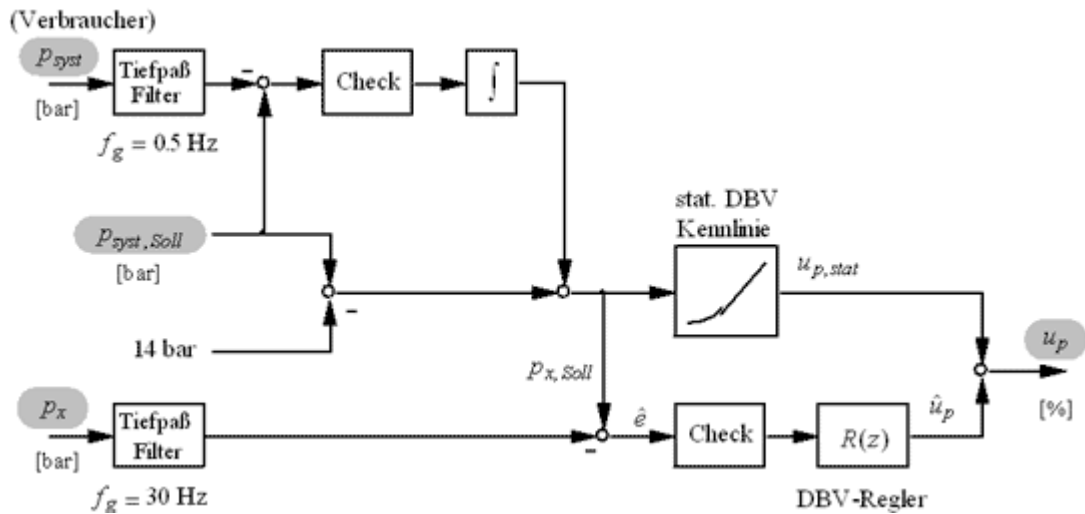


Bild 3: Das Druckregelungskonzept mit dem DBV als Eingriffsstelle

Als Förderstromregler kommt ein 3-schleifiger Kreis mit Druckregler im Inneren zum Einsatz:

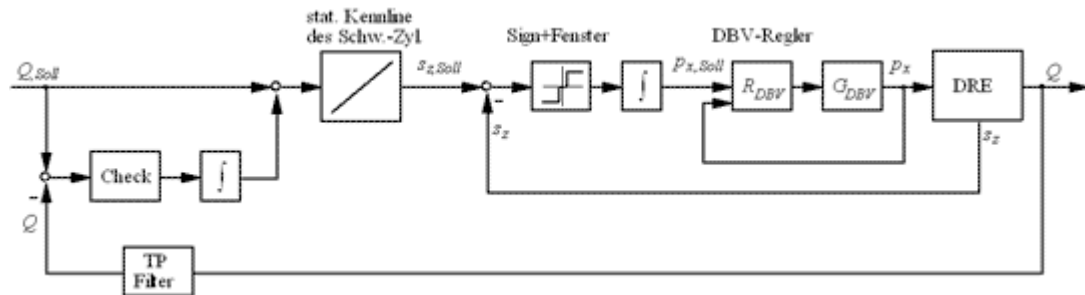


Bild 4: Das Förderstrom-Regelungskonzept

5. Diskussion

Um die Wirksamkeit der Druckregelung zu demonstrieren, zeigt Bild 5 zwei Versuche: links ohne Druckregler und rechts die Messwerte mit Druckregler. Als Solldruck am Verbraucher sind 120 bar eingestellt.

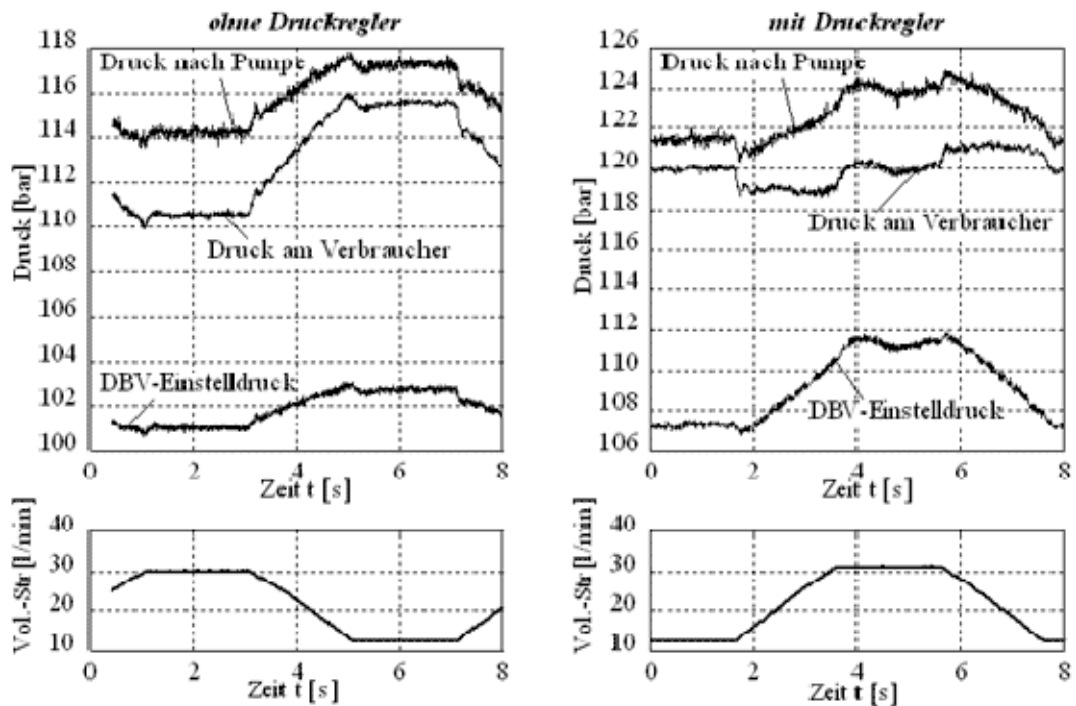


Bild 5: Gegenüberstellung mit/ohne Druckregler bei Störungen am Verbraucher (12...30 l/min)

Deutlich ist im unregulierten Fall neben dem förderstromabhängigen Fehler auch eine stationäre Druckabweichungen erkennbar. Im Gegensatz dazu bewirkt die Regelung stationäre Genauigkeit für konstante Störungen ($Q = \text{const}$), bzw. konstante Druckfehler für rampenförmige Störungen.

Somit hängt im unregulierten Fall der Regelfehler vom Momentanwert der Störung ab, hingegen im geregelten System wird der Regelfehler von der ersten zeitlichen Ableitung der Störung bestimmt. Daher lässt sich bei langsamen Störungen genauer regeln!

Ähnliches gilt für die Förderstromregelung.

Untersucht man nun sehr langsam veränderliche Verbraucher, wie es etwa der Fall bei Ventil-Vermessungen ist, so erhält man folgende Aussagen:

	Druckregler	Förderstromregler
Störung:	Förderstrom	Kolbenhub am Ventil (%)
Störungsbereich:	0 ... 30 l/min	so, daß Druck zwischen 35 und 170 bar liegt
Zeitspanne d. Störung:	30 s	30 s

Regelgröße:	Druck	Förderstrom
Standardabweichung:	$< \pm 0.15 \text{ bar}$	$< \pm 0.16 \text{ l/min}$
max. Regelfehler:	$< \pm 0.45 \text{ bar}$	$< \pm 0.45 \text{ l/min}$

Tabelle 1: Regelgenauigkeit der Druck-Förderstromregelung bei langsamer Störung

Diese Werte bewegen sich sehr nahe an den Messgenauigkeiten der verwendeten Sensoren.

6. Schlussbemerkungen

Diese Zusammenfassung der Diplomarbeit [1] diskutiert einen mechatronischen Weg, um die Regelungsgenauigkeit einer bestehenden hydraulischen Versorgungseinheit zu verbessern. Nach gründlicher Modellbildung und Simulation konnte gezeigt werden, dass das bestehende System nur relativ eingeschränkt Druck- bzw. Förderstromregelungsaufgaben erfüllen kann. Zwei Gründe sind im Wesentlichen dafür verantwortlich: nicht-ideale Verhaltensweise hydraulischer Komponenten und eine fehlende Rückführung des Verbraucherdruckes.

Als Lösung wird ein digitaler Regler vorgeschlagen, der in einem Signalprozessor implementiert und in das hydraulische System integriert wird. Messstellen für Druck bzw. Förderstrom können nun leicht vor dem Verbraucher angebracht werden, wodurch der Regler imstande ist, den Zustand der hydraulischen Versorgungseinheit so verstellt, dass gewünschte Drücke bzw. Förderströme am Verbraucher erzielt werden.

Messungen mit Druckregelung zeigten, dass bei Störungen von 12 bis 30 l/min innerhalb von 2 s eine Druckgenauigkeit am Verbraucher von $\pm 1 \text{ bar}$ erreicht wurde, langsamere Störungen senken diesen Druckfehler weiter. Zudem sei anzumerken, dass bei konstanten Störungen stationäre Genauigkeit vorliegt!

Ein abschließendes Anwendungsbeispiel zeigte das Verhalten bei Störungen, wie sie üblicherweise während Ventil-Vermessungen auftreten. Maximale Druckfehler unterhalb $\pm 0.45 \text{ bar}$, sowie Förderstromfehler kleiner $\pm 0.45 \text{ l/min}$ wurden nachgewiesen.

Dieser mechatronische Lösungsweg führt zu einer bedeutend besseren Regelgenauigkeit und somit zum effizienteren Einsatz der hydraulischen Versorgungseinheit.