

Einfluß des Aufbaus hydraulischer Anlagen auf die Entstehung und Ausbreitung von Druckstößen*

U. Heisel und M. Mayer, Stuttgart

Inhalt. Die Entstehung und Ausbreitung von Druckstößen in hydraulischen Systemen kann durch den Aufbau des Systems und die Anordnung einzelner Elemente beeinflusst werden. Es wird beschrieben, wie Druckstöße entstehen, wie sie sich in Rohrleitungen ausbreiten, und welchen Einfluß die Einbaustellen von Druckregel-elementen und Speichern auf die Ausbildung von Druckwellen ausüben.

1 Einleitung

Druckstöße und von ihnen hervorgerufene Druckschwingungen in hydraulischen Anlagen entstehen durch Schaltvorgänge oder Lastwechsel, bei denen Bewegungsenergie in Druckenergie umgewandelt wird oder umgekehrt.

Das ständige Verkürzen der Taktzeiten in der Fertigungstechnik erfordert oft eine Reduzierung der Schaltzeiten. Dies ist auch bei solchen Schaltvorgängen der Fall, die mittels Proportionalventilen oder Verstellpumpen gesteuert werden. Aufgrund der Steigerung der Dynamik von Steuer-ventilen und Regelpumpen lassen sich mit diesen Elementen Schaltvorgänge erzeugen, wie sie bisher nur mit schnell-schaltenden Wegeventilen zu erreichen waren.

Zum Verkürzen der Taktzeit werden die Verfahrensgeschwindigkeiten, also auch die im System gespeicherte kinetische Energie erhöht. Als Folge davon vergrößern sich die bei Schaltvorgängen auftretenden Druckstöße, was sowohl die Betriebssicherheit einer Anlage gefährdet als auch zu einer beträchtlichen Erhöhung der Lärmemission führt [1].

Im folgenden wird gezeigt, wie die Anordnung verschiedener Elemente im Hydrauliksystem die Höhe und den Verlauf von Druckstößen beeinflussen kann.

2 Ursachen der Druckstöße

Ursachen der Druckstöße sind vor allem Schaltvorgänge von Ventilen oder plötzliche Lastwechsel an Verbrauchern.

Bei Schaltvorgängen werden entweder zwei Teilsysteme, in denen unterschiedliche Drücke herrschen, verbunden, oder eine strömende Flüssigkeitssäule wird, bei der Trennung zweier Teilsysteme, plötzlich verzögert. Bei der Verbindung zweier Systeme durchlaufen, vom öffnenden Ventil ausgehend, Druckwellen die Teilsysteme: Im System mit dem höheren Druck läuft eine Unterdruckwelle, im Niederdrucksystem eine Überdruckwelle (Bild 1a).

Bei der Verzögerung strömender Flüssigkeit entsteht vor dem Absperrorgan ein Überdruck, dahinter ein Unterdruck. Diese Druckänderungen breiten sich ebenfalls in den jeweiligen Teilsystemen aus (Bild 1b).

Die sprunghaften Laständerungen an den Verbrauchern bewirken unregelmäßige Bewegungsabläufe. Diese Geschwindigkeitsschwankungen verursachen im Medium Druckschwankungen, die sich im System fortpflanzen (Bild 1c).

3 Ausbreitung von Druckwellen in Rohrleitungen

Bereits zu Beginn dieses Jahrhunderts stellten *Joukowski* [2] und *Allievi* [3] die partiellen Differentialgleichungen zur Beschreibung der Ausbreitung von Druckwellen in Rohrleitungen auf. Diese Gleichungen folgen aus der Kontinuitätsgleichung (unter Berücksichtigung der Elastizität der Flüssigkeit) sowie aus der Bewegungsgleichung einer reibungsfreien Strömung. Sie beschreiben sowohl den örtlichen als auch den zeitlichen Zusammenhang zwischen der Bewegungsgeschwindigkeit und dem Druck in einer Flüssigkeit. Eine analytische Lösung dieser Differentialgleichungen ist allerdings nur unter bestimmten, sehr einfachen Randbe-

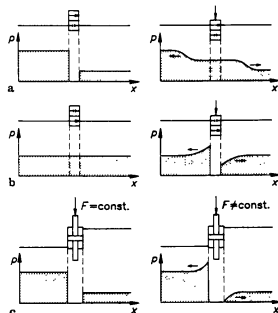


Bild 1 a–c. Ursachen für Druckstöße. **a** Öffnen eines Ventils; **b** Schließen eines Ventils; **c** Lastschwankungen an Verbrauchern

* Die diesem Beitrag zugrunde liegenden Arbeiten werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert

dingungen möglich [4], weshalb heute zur Berechnung vorwiegend numerische Verfahren angewendet werden.

Eine lokale Druckänderung in einer Flüssigkeit verursacht eine Bewegung der Flüssigkeit mit der Bewegungsgeschwindigkeit v in Richtung des geringeren Druckes. Aufgrund dieser Bewegung breitet sich die Druckänderung – von der Quelle ausgehend – allseitig aus, wobei sich wegen der Bewegung die Druckänderung an der Quelle reduziert. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Druckwellen ausbreiten, entspricht bei ruhenden Flüssigkeiten der Schallgeschwindigkeit a_{fl} im unbegrenzten Medium. Sie ist normalerweise wesentlich größer als die Bewegungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit v .

Bei Rohrleitungssystemen genügt im allgemeinen die eindimensionale Betrachtung der Druck- und Bewegungswellen in Rohrlängsrichtung. Hier berechnet sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Elastizität der Leitung zu

$$a = \frac{a_{fl}}{\sqrt{1 + \frac{E_{fl} \cdot D}{E_{St} \cdot s}}} \quad (3)$$

mit dem E-Modul der Flüssigkeit E_{fl} , dem E-Modul des Leitungsmaterials E_{St} , dem Durchmesser D und der Wandstärke s des Rohres. Bei strömenden Flüssigkeiten addiert bzw. subtrahiert sich die Strömungsgeschwindigkeit zur Schallgeschwindigkeit.

In einer Rohrleitung erreicht eine von einem Punkt A mit der Geschwindigkeit a fortschreitende Druckwelle nach einer Zeit Δt die beiden $l = a \cdot \Delta t$ entfernten Punkte $B1$ und $B2$ (Bild 2a). In diesen Punkten überlagert sich zu diesem Zeitpunkt die Drücke, die bei $t = 0$ in den Punkten $C1$ und A bzw. A und $C2$ herrschen:

$$p_{B1}(t = \Delta t) = \frac{1}{2} \cdot (p_{C1}(t = 0) + p_A(t = 0)), \quad (4)$$

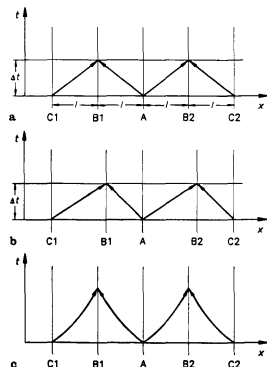


Bild 2a–c. Ausbreitung von Druckwellen in einer Rohrleitung. a ohne Strömung; b mit Strömung; c mit Dämpfung

$$p_{B2}(t = \Delta t) = \frac{1}{2} \cdot (p_A(t = 0) + p_{C2}(t = 0)). \quad (5)$$

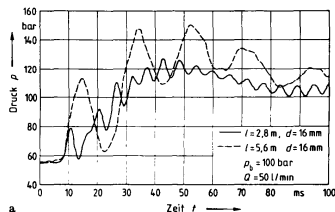
Beim Betrachten der Rohrleitung eines Hydrauliksystems mit einer bestimmten Druckverteilung $p = f(x)$ bei $t = 0$ ist festzustellen, daß sich alle Drücke $p(x; t = 0)$ in der Zeit Δt zu den $l = a \cdot \Delta t$ entfernten Punkten fortplanzen und sich dort mit den Druckwellen aus den $2 \cdot l$ entfernten Punkten überlagern. Die x - t -Linien, entlang denen sich die Druckwellen ausbreiten, werden als Charakteristiken bezeichnet. Durch eine Strömung wird die Ausbreitung asymmetrisch (Bild 2b), aufgrund einer Dämpfung nimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit der Entfernung ab (Bild 2c).

An den Enden der Rohrleitungen werden die Druck- bzw. Bewegungswellen entsprechend den dort herrschenden Randbedingungen reflektiert. Beispiele solcher Randbedingungen sind $v = 0$ (geschlossenes Leitungsende, Zylinder auf Anschlag), $p = \text{const.}$ (sehr großer Tank, idealer Speicher) oder $v = f(t)$ (Förderkolben).

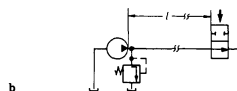
Da sich eine Druckwelle in einer Rohrleitung relativ ungestört ausbreiten kann und erst an einer Unstetigkeitsstelle verändert bzw. reflektiert wird, ist der Weg wesentlich, den die Welle bis zu einer Reflexionsstelle zurücklegen muß. Erst die hier reflektierte Welle kann den Druckverlauf an der Quelle (und damit die Größe der Druckveränderung) beeinflussen. Dazu ist es erforderlich, daß die reflektierte Welle am Entstehungsort der Druckwelle eintrifft, solange der Schaltvorgang oder eine Lastveränderung noch nicht beendet ist. Nach Beendigung dieser Vorgänge ist die maximale Druckveränderung am Entstehungsort schon erreicht und kann nicht mehr beeinflussen. Für die Reaktionszeit

4 Druckregелеlemente

Druckregелеlemente in Hydraulikanlagen haben die Aufgabe, Drücke konstant oder innerhalb bestimmter Grenzen zu halten, indem sie einen Volumenstrom in ein System oder aus einem System beeinflussen. Für die Reaktionszeit



a



b

Bild 3a und b. Druckverlauf an einem schließenden Wegeventil bei unterschiedlicher Länge der Zuleitung. a Druckverlauf; b Prinzip des Aufbaus

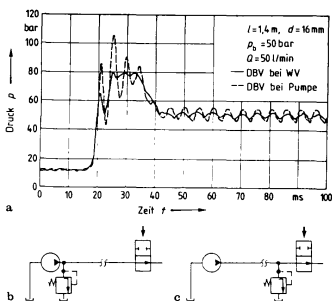


Bild 4 a–c. Druckverlauf an einem schließenden Wegeventil bei verschiedenen Einbaustellen des Druckbegrenzungsventils. **a** Druckverlauf. Prinzipieller Aufbau des Systems mit **b** Druckbegrenzungsventil (DBV) nahe der Pumpe und **c** nahe dem Wegeventil (WBV) eingebaut

eines Regelelements auf Druckveränderungen ist die Entfernung vom Entstehungsort der Druckwelle besonders wichtig. Je kürzer die Laufzeit der Druckwelle vom Entstehungsort zum Regelelement ist, um so früher können das Druckbegrenzungsventil oder die Regelpumpe auf eine Druckveränderung reagieren und ihr entgegenwirken [5].

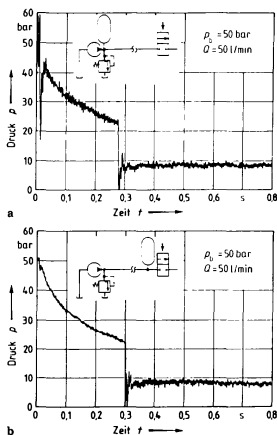


Bild 5 a und b. Druckverlauf an einem öffnenden Wegeventil bei unterschiedlichen Einbaustellen eines Speichers. **a** Speicher nahe der Pumpe; **b** Speicher nahe dem Wegeventil

In Bild 3 ist der zeitliche Druckverlauf an einem schließenden Wegeventil bei verschiedenen Leitungslängen dargestellt. Bei der längeren Leitung verlängert die größere Laufzeit der Druckwellen die Phase des Druckanstiegs. Das sich weit öffnende Druckbegrenzungsventil verursacht einen großen Druckabfall im System, so daß Druckschwingungen mit großen Amplituden entstehen. Das Überschwingen des Druckes über den eingestellten Maximalwert ist ebenfalls größer. Insgesamt ergibt sich bei einer langen Zuleitung ein deutlich schlechteres Regelverhalten bezüglich des Druckes am Wegeventil.

Ist eine Verkürzung der Zuleitung nicht möglich, so kann die Einbauposition des Druckbegrenzungsventils Druckstöße und -schwingungen beeinflussen. In Bild 4 sind Druckverläufe an einem Wegeventil dargestellt, wobei das Druckbegrenzungsventil in einen Fall direkt neben der Pumpe, im anderen Fall beim Wegeventil eingebaut ist. Auch hier sind die Druckschwingungen wesentlich größer, wenn das Druckbegrenzungsventil vom Wegeventil weit entfernt ist. Dieses Beispiel zeigt auch, daß schon Laufzeitunterschiede von wenigen Millisekunden bzw. Wege von wenigen Metern ausreichen, um Druckschwingungen erheblich zu erhöhen oder zu reduzieren.

Wenn in der Rückleitung eines Verbrauchers ein Gegen-druckventil eingebaut ist, so sollte sich dieses möglichst nahe dem Verbraucher befinden. Nur dann kann dieses Ventil sehr rasch auf Druckstöße, die der Verbraucher verursacht, reagieren und auftretende Druckveränderungen begrenzen.

5 Speicher

Speicher in einem Hydrauliksystem sind große Elastizitäten, d. h., sie vermögen bei geringem Druckunterschied relativ große Mengen an Druckflüssigkeit aufzunehmen bzw. abzugeben. Besonders Gasblasenspeicher können aus diesem Grund zur Minderung der Druckschwingungen eingesetzt werden. Bei einem Druckanstieg nimmt der Speicher Druckflüssigkeit aus dem Hydrosystem auf, bei einem Druckabfall speist er Druckflüssigkeit in das System zurück und wirkt so Druckveränderungen entgegen.

Auch beim Einsatz eines Speichers ist es günstig, wenn dieser in der Nähe des Ausgangspunkts von Druckstößen angeordnet ist, damit er so früh wie möglich auf Druckänderungen reagieren kann. In Bild 5 ist dies am Beispiel eines öffnenden Wegeventils gezeigt. Bei geschlossenem Wegeventil fließt der gesamte Förderstrom der Pumpe über das Druckbegrenzungsventil ab. Öffnet das Wegeventil, so entsteht wegen der abfließenden Druckflüssigkeit am Wegeventil ein Unterdruck, der sich in Richtung Pumpe ausbreitet. Erst wenn diese Druckwelle das Druckbegrenzungsventil erreicht, schließt dieses, und der Pumpenförderstrom fließt jetzt auch Flüssigkeit aus dem Speicher in die Zuleitung. Dieser zusätzliche Förderstrom erzeugt im System einen Druckanstieg (Bild 5a). Anschließend nimmt der Druck in dem Maße ab, wie das Speisevermögen des Speichers abnimmt. Wenn der Speicher entleert ist, fällt der Druck auf den Wert, der beim Durchfluß des Pumpenförderstroms entsteht.

Kurz nach der Öffnung des Ventils tritt also am Wegeventil ein Druckabfall auf, der mindestens solange andauert, wie die Druckwelle für den Weg zum Speicher und zurück benötigt.

Wenn der Speicher allerdings nahe beim Wegeventil angebaut ist, steht sofort Flüssigkeit aus dem Speicher zur

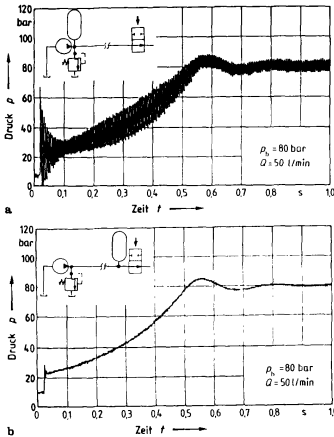


Bild 6 a und b. Druckverlauf an einem schließenden Wegeventil bei unterschiedlichen Einbaustellen eines Speichers. **a** Speicher nahe der Pumpe; **b** Speicher nahe dem Wegeventil

Verfügung, und der Druckeinbruch wird vermindert oder ganz vermieden (Bild 5 b). Hierbei ist allerdings sicherzustellen, daß der hohe Ölstrom, der nun auch bei geringer Öffnung fließt, das Wegeventil nicht beschädigt.

In Bild 6 ist die Situation beim Schließen des Wegeventils dargestellt. Der Druck im System steigt relativ langsam an, da der Speicher gefüllt werden muß. Ist der Speicher in größerer Entfernung vom Wegeventil positioniert, so können in der Leitung zwischen Wegeventil und Speicher Schwingungen entstehen, die nur langsam abklingen (Bild 6 a). Der Speicher wirkt hierbei als Feder und die Flüssigkeit in der Leitung als Masse. Die Schwingungen sind besonders groß, wenn die Periodendauer der Eigenfrequenz des Speichers mit der Reflexionszeit der Druckwellen in der Leitung übereinstimmen.

Wenn sich der Speicher direkt beim Wegeventil befindet, treten diese Schwingungen nicht auf (Bild 6 b). Die Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit in der Leitung wird in diesem Fall kontinuierlich verringert, da auch nach dem Schließen des Ventils noch Druckflüssigkeit zum Speicher fließt. In der Leitung von der Pumpe zum Speicher entstehen keine Schwingungen, da pumpenseitig andere Reflexionsbedingungen herrschen als am Ventil.

6 Zusammenfassung

Druckstöße und Druckschwingungen, die von Regelementen oder Lastwechseln verursacht werden, können die Sicherheit einer Hydraulikanlage gefährden und führen oft zu unerwünschter Lärmentwicklung. Der Aufbau eines hydraulischen Systems und die Anordnung einzelner Elemente ermöglichen es, die Entstehung und Ausbreitung dieser Druckwellen zu beeinflussen.

Grundsätzlich sollten die Leitungen so kurz wie notwendig sein. Das reduziert zum einen die in der Druckflüssigkeit gespeicherte kinetische Energie, zum anderen werden die Reflexionsfrequenzen der Druckwellen so hoch, daß sie über den Eigenfrequenzen der hydraulischen Elemente liegen.

Eine weitere Maßnahme ist, Regelemente so zu platzieren, daß sich kürzeste Laufzeiten für die Druckwellen vom Entstehungsort zum Regelement ergeben. Das erlaubt ein schnelles Ausregeln der Druckveränderungen.

Beim Einbau von Speichern sollten diese in der Nähe des Entstehungsortes von Druckschwingungen angeordnet werden, wobei die Frequenzen der Reflexionsschwingungen in den Leitungen nicht mit der Eigenfrequenz des Speichers zusammenfallen dürfen.

Literatur

- 1 Rebel, J.; Schmid, G.: Impulsartige Geräusche an einer Bearbeitungsstation mit hydrostatischem Antrieb. *Oelhydraulik und Pneumatik* 21 (1977) H. 5, S. 335–338
- 2 Joukowski, W.: Über den hydraulischen Stoß in Wasserleitungsrohren. Petersburg: 1898
- 3 Allievi, R. u. a.: Allgemeine Theorie über die veränderliche Bewegung des Wassers in Leitungen. Berlin: Springer 1909
- 4 Brill, K. F.: Berechnungen von Druckstoßschwingungen in hydraulischen Prefanlagen. *Konstruktion* 12 (1960). T. 1; H. 2, S. 60–69; T. 2; H. 3, S. 120–130
- 5 Heisel, U.; Mayer, M.: Geräuschverhalten schaltender Wegeventile und Maßnahmen zur Lärminderung. *Handbuch Fluidtechnik*. Essen: Vulkan 1989