

Geräuschverhalten schaltender Wegeventile und Maßnahmen zur Lärminderung

Von U. Heisel und M. Mayer¹⁾

Neben Pumpen, Strom- und Druckventilen stellen schaltende Wegeventile wesentliche Schallquellen an hydraulischen Anlagen dar. Der Beitrag beschreibt die Ursachen und Mechanismen, die zur Entstehung der Schaltgeräusche führen, und stellt den Einfluß verschiedener Größen auf das Geräusch dar. Aus den Einflüssen werden Maßnahmen abgeleitet, die geeignet sind, Schaltgeräusche von Wegeventilen zu reduzieren.

Einleitung

In Hydraulikaggregaten und Werkzeugmaschinen in der Fertigungstechnik werden zur Steuerung der hydraulischen Energie oft schaltende Schieber-Wegeventile eingesetzt (Bild 1). Die beim Schalten dieser Ventile auftretenden Geräusche können neben den Pumpengeräuschen für die Geräuschemission eines Hydroaggregats oder einer Maschine maßgebend sein. Immer kürzer werdende Taktzeiten führen zu einer Erhöhung der Schaltspiele und dadurch zur Erhöhung des Beurteilungspegels in der Umgebung der Maschine.

Wirkungsvolle Maßnahmen zur Reduzierung der auftretenden Geräusche setzen voraus, daß die Mechanismen, die an der Entstehung der Schaltgeräusche mitwirken, bekannt sind und daß der Einfluß verschiedener Größen auf das Schaltgeräusch abgeschätzt werden kann.

Ursachen und Mechanismen der Schallentstehung

An der Entstehung des Schaltgeräusches wirken zwei prinzipiell verschiedene Mechanismen: Mechanische Stöße, die vor allem durch die Betätigungselemente verursacht werden, und hydraulische Druckstöße, die beim Öffnen oder Schließen des Ventils entstehen. Bild 2 zeigt die Möglichkeiten der Luftschallentstehung beim Schalten eines Wegeventils. Körperschall entsteht hauptsächlich durch Stöße zwischen bewegten Bauteilen, er kann aber auch von anderen Bauteilen auf das Ventil übertragen werden. Ebenso wird Körperschall vom Ventil auf andere Bauteile, wie z. B. Rohrleitungen oder Montagewände übertragen. Hydraulische Druckstöße stellen Flüssigkeitsschall dar, der sich in Form von Druckwellen im Medium fortpflanzt. An den Wandungen kommt es zwischen der Flüssigkeit und den umgebenden Körpern zu Wechselwirkungen, wobei Flüssigkeitsschall in Körperschall umgewandelt wird und umgekehrt. An der Oberfläche des Ventilgehäuses und der Betätigungselemente wird der Körperschall als Luftschall in die Umgebung abgestrahlt. Falls freie Flüssigkeitsoberflächen vorhanden sind, findet auch hier Schallabstrahlung statt.

Mechanische Stöße

Mechanische Stöße entstehen durch das Aufeinandertreffen von Körpern mit ungleicher Geschwindigkeit oder Bewegungsrichtung. Beim Schalten von Wegeventilen treten Stöße auf, wenn die Bewegungen des Ventilkolbens bzw. des Betätigungselementes gestoppt werden. Beim Rückstellen werden die Bewegungen durch Feder-elemente und Reibung abgebremst, so daß die hierbei auftretenden Stöße relativ klein sind.

¹⁾ Prof. Dr.-Ing. U. Heisel, Dipl.-Ing. M. Mayer, Institut für Werkzeugmaschinen, Universität Stuttgart.

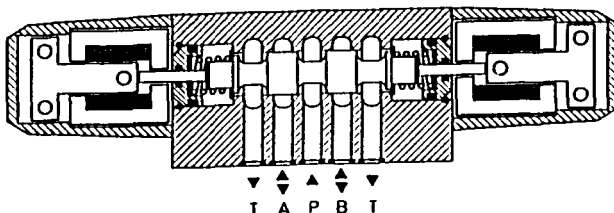


Bild 1 5/3-Schieber-Wegeventil. Prinzipdarstellung mit in Luft schaltenden Wechselstrom-Magneten (Magnete um 90° gedreht dargestellt)

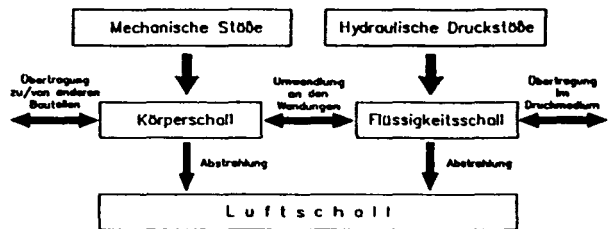


Bild 2: Luftschallentstehung beim Schalten eines Wegeventils

Die für die Körperschallanregung maßgeblichen Wechselkräfte sind proportional dem beim Stoß übertragenden Impuls [1].

Hydraulische Druckstöße

Für die Schallanregung durch hydraulische Druckstöße sind die am Ventil wirkenden Druckveränderungen maßgebend. Dies sind sowohl Druckveränderungen in den einzelnen Anschlußleitungen als auch Veränderungen der Druckdifferenzen zwischen den Leitungen.

Hydraulische Druckstöße können entsprechend ihrer Ursachen in 2 Gruppen eingeteilt werden. Beim Öffnen eines Ventils entstehen Druckstöße durch die Verbindung zweier Teilsysteme, in denen unterschiedliche Drücke herrschen, und beim Schließen des Ventils durch die Verzögerung der strömenden Flüssigkeitssäule. In diesem Fall entsteht vor dem Ventil eine Druckerhöhung und hinter dem Ventil eine Druckabsenkung.

Die Wellenlaufgeschwindigkeit a , mit der sich die Druckänderungen in den Rohrleitungen fortpflanzen, ergibt sich unter Berücksichtigung der Rohraufweitung zu:

$$a = \frac{a_F}{\sqrt{1 + \frac{E_F \cdot D}{E_{St} \cdot e}}}$$

mit dem Elastizitätsmodul von Stahl E_{St} , dem Elastizitätsmodul der Flüssigkeit E_F , der Schallgeschwindigkeit in der unbegrenzten Flüssigkeit a_F , dem Rohraußendurchmesser D und der Wandstärke des Rohres e . Durch Schläuche kann diese Laufgeschwindigkeit sehr stark gemindert werden [2].

Öffnen des Ventils

Bei der Verbindung zweier Leitungssysteme, in denen unterschiedliche Drücke herrschen, finden Druckausgleichsvorgänge statt, die sich, von der Verbindungsstelle ausgehend, wellenartig in den Leitungen ausbreiten. Dabei strömt das Druckmedium von der Seite mit dem höheren Druck zur Niederdruckseite. Die Leitung mit dem geringeren Druck wird von einer Druckwelle mit positiver Flanke durchlaufen. Auf der Hochdruckseite wird Druckenergie abgebaut und in kinetische Energie umgewandelt. Diese Umsetzung pflanzt sich ebenfalls wellenartig durch die Hochdruckleitung fort, d. h. die Hochdruckleitung wird von einer Druckwelle mit einer negativen Flanke durchlaufen. In welcher Weise diese Druckwellen in den einzelnen Leitungssystemen reflektiert werden hängt vom Aufbau der Systeme und deren Elemente ab.

Die Höhe der Druckwellen wird durch die Druckdifferenz zwischen den beiden Systemen bestimmt. Die Druckdifferenz ist auch die maximale Druckänderung, die bei diesem Vorgang am Ventil auftreten kann. Die Flankensteilheit der Druckwellen wird durch die Öffnungsgeschwindigkeit und die Öffnungscharakteristik des Ventils bestimmt.

Schließen des Ventils

Beim Schließen eines Ventils wird die strömende Flüssigkeitssäule plötzlich verzögert. Dadurch wird die kinetische Energie der Flüssigkeit in Druckenergie umgewandelt. Eine Druckwelle läuft, vom Absperrorgan ausgehend, in der Druckleitung zurück. Am anderen Ende der Druckleitung wird die Druckwelle reflektiert und erreicht nach der Reflexionszeit $T_r = 2L/a$ wieder das Absperrorgan. Erfolgt das vollständige Schließen des Ventils innerhalb dieser Reflexionszeit, ergibt sich als Druckänderung am Absperrorgan der sogenannte Joukowsky-Stoß

$$\Delta p_{\text{Jou}} = \rho \cdot a \cdot v \quad [3].$$

Dies ist die maximale Druckänderung, die beim Schließen eines Ventils auf der Druckseite möglich ist.

Erfolgt das Schließen während einer längeren Zeit als T_r , ist die entstehende Druckerhöhung geringer. Die reflektierte Welle überlagert sich dann mit der vom Schließorgan ausgehenden Druckwelle. Die daraus resultierende Druckveränderung ist wesentlich von der Schließcharakteristik des Absperrorgans abhängig. Zusätzliche Druckerhöhungen, die durch die Massenträgheit von Pumpe und Motor verursacht werden, erfolgen in der Regel langsam gegenüber diesen Vorgängen und wirken sich deshalb nicht auf die Geräuschenstehung aus.

Durch das Schließen des durchströmten Ventils entsteht hinter dem Absperrorgan ein Unterdruck. Diese Druckabsenkung kann bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten oder geringem Druckniveau so groß werden, daß der Dampfdruck der Flüssigkeit erreicht wird und die Flüssigkeitssäule abreißt. Die Flüssigkeit hinter dem Ventil wird verzögert, wechselt ihre Bewegungsrichtung und stößt auf das jetzt geschlossene Absperrorgan. Bei zuvor erfolgtem Strömungsabriß wird die Bewegungsenergie dabei schlagartig in Druckenergie umgewandelt. Die entstehenden senkrechten Druckflanken führen zu einem regelrechten Knallen in den Rohrleitungen. Auch ein unvollständiger Abriß oder die Bildung einzelner Blasen führt zu einer deutlichen Erhöhung des Geräusches.

Einflußgrößen

Beim Schalten eines Ventils wirken eine Vielzahl von Parametern und Größen auf das Geräusch. Dabei beeinflussen sich einzelne Größen in ihrer Wirkung gegenseitig. Die Einflußgrößen lassen sich in 3 Gruppen einteilen:

1. Größen, die durch den Betriebszustand der Hydraulikanlage festgelegt oder verändert werden; dies sind vor allem die am Ventil anliegenden Drücke und der durch das Ventil fließende Volumenstrom.
2. Größen, die durch die konstruktive Gestaltung des Ventils bestimmt werden. Hierzu gehören die Schaltfunktionen des Ventils und ihre gegenseitige zeitliche Zuordnung, die durch die Geometrie des Kolbenschiebers und des Ventilgehäuses festgelegt wird. Die Geschwindigkeit des Schaltvorgangs wird in erster Linie durch das Betätigungselement bestimmt. Durch die Montageweise wird die Art der Schallabstrahlung beeinflusst.
3. Der Aufbau der am Ventil angeschlossenen hydraulischen Teilsysteme und die eingebauten Hydraulikelemente bestimmen, wie das Hydrauliksystem auf die Druckveränderungen reagiert, die durch den Schaltvorgang verursacht werden. Aus der Überlagerung dieser Druckveränderungen mit den in den jeweiligen Teilsystemen reflektierten Druckwellen ergibt sich der endgültige Druckverlauf am Wegeventil.

Bei der Darstellung des Einflusses verschiedener Größen wird weitgehend auf die Angabe von Schallpegeln verzichtet, da diese von vielen Faktoren abhängig und deshalb nicht immer miteinander vergleichbar sind.

Der zum Teil verwendete Schnellepegel L_s kennzeichnet die mittlere Schnelle (= flächennormale Schwingungsgeschwindigkeit) auf der Oberfläche des Ventils. Die Schnelle ist ein Maß für den Körperschall im Ventilgehäuse und ist über das Abstrahlmaß σ mit dem Luftschall verknüpft.

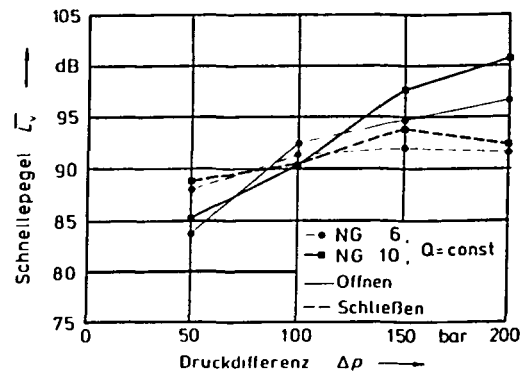


Bild 3: Einfluß der Druckdifferenz auf die Schnelle

Durch den Betriebszustand bestimmte Einflußgrößen

Druck

Beim Öffnen eines Ventils bestimmt die am geschlossenen Ventil anliegende Druckdifferenz Δp wie groß die Druckveränderungen in den Leitungen sind. Je größer diese Druckdifferenz ist, um so höher ist auch das Schaltgeräusch beim Öffnen des Ventils (Bild 3).

Auf das Geräusch beim Schließen des Ventils hat die Druckdifferenz geringen Einfluß, da sie am geöffneten Ventil klein ist und die Geschwindigkeit des Druckanstiegs vom Druck selbst unabhängig ist.

Bei bestimmten Betriebszuständen hat das Druckniveau bei geöffnetem Ventil allerdings wesentlichen Einfluß auf das Schließgeräusch. Bei zu niedrigem Druck kann beim Schließen hinter dem Ventil die Strömung abreißen, was zu sehr hohen Geräuschpegeln führt. Durch Anheben des Druckes kann das Abreißen oft verhindert werden (Bild 4).

Volumenstrom

Durch den Volumenstrom wird die Strömungsgeschwindigkeit durch das Ventil festgelegt. Wie unter „Schließen des Ventils“ beschrieben, übt die Strömungsgeschwindigkeit wesentlichen Einfluß auf die zeitlichen Druckverläufe am Ventil und damit auf das Schaltgeräusch aus.

Das Geräusch beim Öffnen des Ventils wird durch den Volumenstrom nur unwesentlich beeinflusst. Der Grund dafür ist, daß der Maximalwert des Volumenstroms erst nach einer bestimmten Zeit erreicht wird. Der Anstieg des Volumenstroms verläuft in der Regel so langsam, daß nur geringe Auswirkungen auf das Schaltgeräusch auftreten (Bild 5).

Vor dem Schließen wird das Ventil vom maximalen Volumenstrom durchflossen. Je größer dieser Volumenstrom und damit die Strömungsgeschwindigkeit ist, um so höher ist die Druckerhöhung vor und die Druckabsenkung nach dem Ventil und somit das beim Schließen des Ventils auftretende Geräusch.

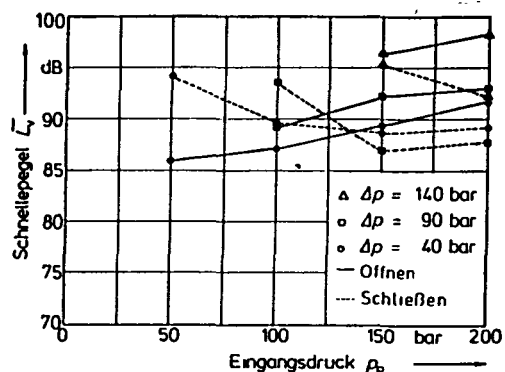


Bild 4: Einfluß des Eingangsdruckes auf das Schaltgeräusch bei konstanter Druckdifferenz

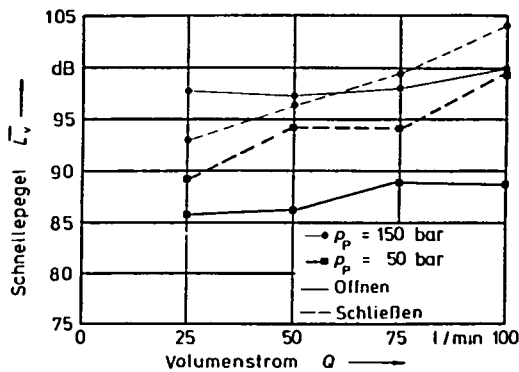


Bild 5: Einfluß des Volumenstroms auf das Schaltgeräusch

Von der Ventilkonstruktion abhängige Einflußgrößen

Schaltgeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit, mit welcher der Schaltvorgang abläuft, übt großen Einfluß auf das Schaltgeräusch aus, da sie sowohl die Stärke der mechanischen Stöße als auch Höhe der hydraulischen Druckstöße bestimmt (Bild 6). Die Schaltgeschwindigkeit selbst hängt vom verwendeten Betätigungselement ab.

Besonders kurze Schaltzeiten und damit hohe Schaltgeräusche ergeben sich bei Verwendung von 220 V-Wechselstrom-Magneten. Bei Verwendung von 24 V-Gleichstrom-Magneten ist die Schaltgeschwindigkeit geringer. Mit diesen Magneten kann die Schaltgeschwindigkeit durch Ventile mit Schaltzeitverlängerung weiter reduziert werden.

Bei hydraulisch betätigten Ventilen kann die Schaltgeschwindigkeit durch den Steuerdruck beeinflusst werden.

Die Rückstellgeschwindigkeit wird hauptsächlich durch die eingebaute Rückstellfeder festgelegt. Die Federrate dieser Feder ist allerdings nicht frei wählbar, sondern vom eingesetzten Betätigungselement abhängig.

Beliebige Weg-Zeit-Verläufe beim Öffnen und Schließen lassen sich durch Verwendung von Proportional-Wegeventilen erzeugen. Dadurch können die Öffnungs- und der Schließablauf den Betriebsbedingungen und dem Hydrauliksystem angepaßt und hydraulische Druckstöße weitgehend vermieden werden.

Schaltfunktion

Durch die Schaltfunktion wird festgelegt, welche Anschlüsse in welchen Stellungen miteinander verbunden bzw. voneinander getrennt sind. Daraus ergeben sich beim Betätigen oder Rückstellen des

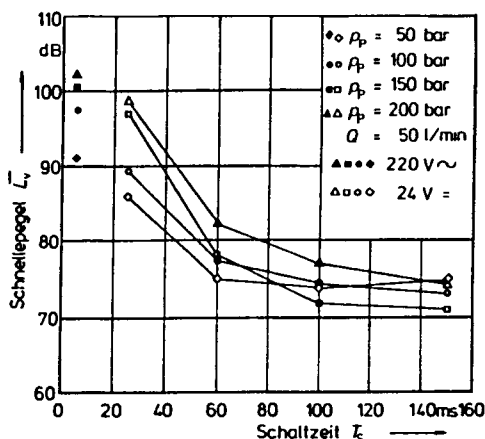


Bild 6: Einfluß der Schaltzeit auf das Schaltgeräusch beim Schalten/Öffnen eines Ventils; Betätigung durch Elektromagnete

Ventils entsprechende Öffnungs- oder Schließvorgänge und daraus resultierend eine Kombination von mechanischen und hydraulischen Stößen.

Überdeckungen

Durch die Steuerkantenüberdeckungen ist die Steuerung des zeitlichen Ablaufs der einzelnen Ventilfunktionen möglich. Dadurch kann z. B., je nach Länge der Leitungen zum Verbraucher und Druck in diesen Leitungen, die Zuleitung oder die Rückleitung zuerst geöffnet werden, so daß sich ein möglichst weicher Schaltvorgang mit geringer Geräusentwicklung ergibt. Bei 3/2-Wegeventilen können zum Abbau von Druckspitzen alle Anschlußleitungen kurzzeitig miteinander verbunden werden.

Montageart

Die Art der Ventilbefestigung bestimmt, wie der Körperschall vom Ventil abgestrahlt wird. Bei der Montage an einem Steuerblock wird die Schallabstrahlung durch die steife Befestigung verringert. Eine Montagewand erlaubt größere Schwingungen des Ventils, zusätzlich wird die Wand durch das Ventil zur Schallabstrahlung angeregt.

Einflüsse des Hydrauliksystems

Wesentlichen Einfluß auf die Druckverläufe am Ventil übt das hydraulische System aus, das dem Ventil vor- bzw. nachgeschaltet ist. Bemessung der Leitungen und die Anordnung der verschiedenen Elemente im System bestimmen, wie das System auf die Schaltvorgänge antwortet.

Durch Unterteilen des Gesamtsystems in Teilsysteme läßt sich der Einfluß einzelner Systemteile besser beschreiben. Teilsysteme sind: das Zuleitungssystem, das die Komponenten von der Volumenstromerzeugung bis zum Ventil umfaßt, das Verbrauchersystem mit den Elementen vom Ventil zum Verbraucher und zurück und das Rückleitungssystem von Ventil zum Tank.

Zuleitungssystem

Die Entfernung einzelner Hydraulik Elemente vom Wegeventil hat großen Einfluß auf die Druckverläufe am Ventil. Durch die Distanz wird die Laufzeit der Druckwellen zum Druckbegrenzungsventil oder zum pumpenseitigen Leitungsende und zurück bestimmt. Dadurch ist auch die Reaktionszeit auf Druckveränderungen, die vom Wegeventil ausgehen, festgelegt. Je früher die Pumpe bzw. das Druckbegrenzungsventil auf die Druckveränderungen reagieren, um so geringer bleiben diese Druckveränderungen (Bild 7).

Verbrauchersystem

Auch beim Verbrauchersystem beeinflusst die Leitungslänge die beim Schalten entstehenden Druckschwingungen. Lange Leitungen bedeuten weichere Ölsäulen und größere Ölmassen, was zu größeren Schwingungsamplituden führt. Außerdem sorgen lange Leitungen durch die größere Oberfläche für zusätzliche Schallabstrahlung.

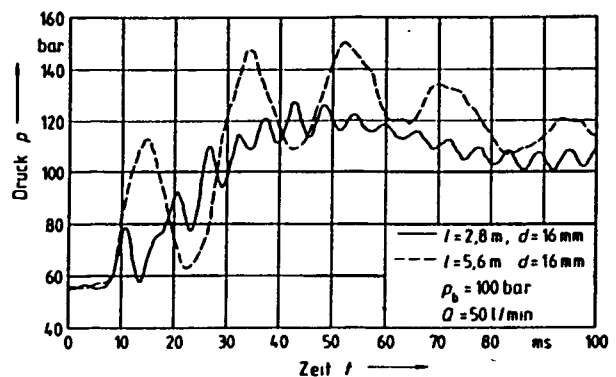


Bild 7: Druckverlauf am Wegeventil bei unterschiedlicher Länge der Zuleitung (Schließen des Ventils)

Rückleitungssystem

Beim Rückleitungssystem tritt durch das geringe Druckniveau oft Strömungsabriss beim Schließen des Wegeventils auf. Ein Gegen-druckventil oder ein Rückschlagventil kann den Druck in der Rückleitung anheben, verschlechtert allerdings den Wirkungsgrad der Anlage.

Maßnahmen zur Lärminderung

Eine Minderung des Schaltgeräusches kann durch Reduzierung der mechanischen Stöße, der hydraulischen Druckstöße oder durch Reduzierung der Schallübertragung und -abstrahlung erreicht werden. Welche speziellen Maßnahmen zu einer wesentlichen Geräuschminderung führen ist davon abhängig, welcher Anregungsmechanismus bei der Geräuschentstehung dominiert.

Reduzierung der mechanischen Stöße

Um mechanische Stöße zu reduzieren kann die Schaltgeschwindigkeit verringert werden. Durch die Verwendung von Gleichstrommagneten und Ventilen mit eingebauten Drosseln zur Schaltzeitverlängerung läßt sich die Schaltgeschwindigkeit soweit reduzieren, daß die mechanischen Stöße nicht mehr hörbar sind. Auch beim Einsatz von Proportional-Wegeventilen treten keine mechanischen Stöße auf.

Ist eine hohe Schaltgeschwindigkeit für die Funktion der Anlage erforderlich, so lassen sich die Stöße durch Verkleinern der Massen von Kolbenschieber und Magnetanker verringern.

Elastische Zwischenlagen zur Stoßdämpfung können bei schnell-schaltenden Wechselstrommagneten nicht verwendet werden, da sie die sichere Funktion des Magneten gefährden. Eine geringe Stoßdämpfung erreicht man durch Magneten, die in Öl schalten. Diese Magneten bieten auch bezüglich der Schallabstrahlung Vorteile (s. u.).

Reduzierung der Druckstöße

Hydraulische Druckstöße können ebenfalls durch Verringerung der Schaltgeschwindigkeit des Ventils reduziert werden. Dabei wird zum einen der zeitliche Druckgradient verkleinert, zum andern verbleibt Elementen zur Druckregelung mehr Zeit um auf Druckveränderungen zu reagieren und unerwünschten Druckveränderungen entgegenzuwirken. Auf diese Weise ist es oft möglich, die Amplitude der Druckstöße zu vermindern. Die Wirksamkeit einer Schaltgeschwindigkeitsverminderung ist allerdings auch in hohem Maße vom Aufbau des Hydrauliksystems abhängig.

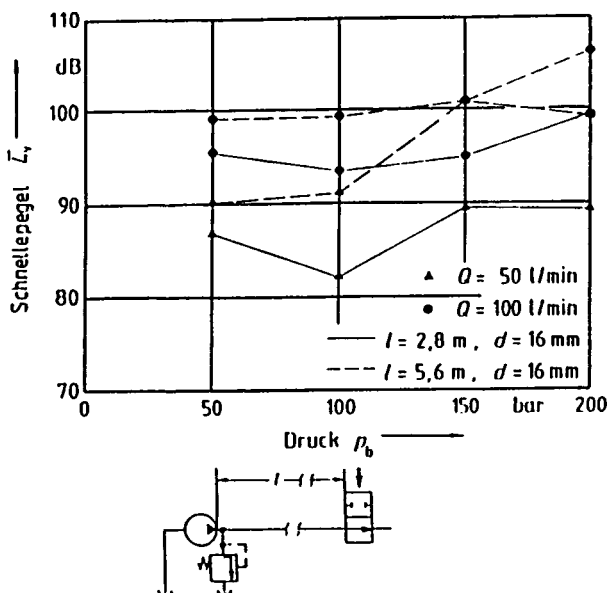


Bild 8: Schnelle auf der Ventiloberfläche bei unterschiedlicher Länge der Zuleitung (Schließen des Ventils)

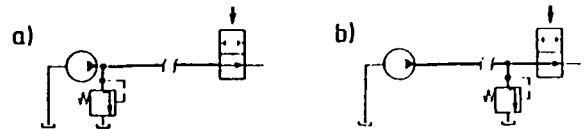
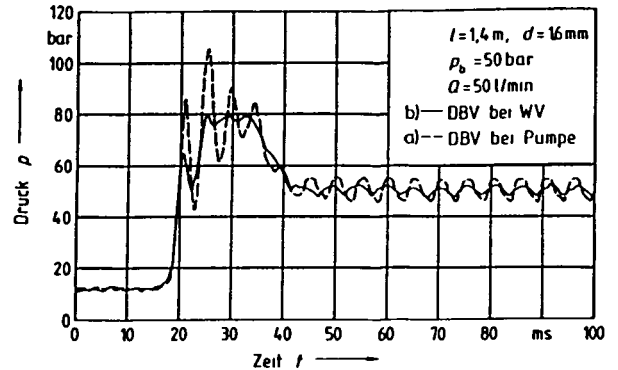


Bild 9: Druckverlauf am Wegeventil bei unterschiedlicher Position des Druckbegrenzungsventils (Schließen des Wegeventils)

Systeme mit kurzen Leitungen bieten in mehrfacher Hinsicht Vorteile. Durch kurze Laufzeiten der Druckwellen und geringe bewegte Flüssigkeitsmassen treten sowohl beim Öffnen als auch beim Schließen des Ventils kleinere Druckschwankungen und damit geringere Schaltgeräusche auf (Bilder 7, 8).

Große Leitungsquerschnitte verringern die Strömungsgeschwindigkeit und verkleinern dadurch Druckstöße beim Schließen eines Wegeventils, gleichzeitig wird aber das hydraulische System aufgrund des größeren Leitungsvolumens weicher. Schlauchleitungen verringern Druckstöße durch größere Dämpfung und niedrigere Schallgeschwindigkeit.

Ähnlich wie die Leitungslänge beeinflusst auch die Position des Druckbegrenzungsventils in der Zuleitung die Geräuschemission. Druckschwankungen werden um so geringer, je näher das DBV am Wegeventil angeordnet ist. Besonders das Überspringen über den eingestellten Maximaldruck beim Schließen des Wegeventils kann so wesentlich reduziert werden (Bild 9). Ein notwendiger Speicher sollte zur Verringerung der Schwingungen ebenfalls nahe dem Schaltventil eingebaut werden, da sich dann ein sehr stetiger zeitlicher Druckverlauf ergibt. Allerdings kann der erhöhte Ölstrom aus dem Speicher die Lebensdauer des Ventils beträchtlich verkürzen, da an den Steuerkanten bei kleinen Öffnungen sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten auftreten, die zu großem Verschleiß der Steuerkanten führen.

Verringerung der Schallübertragung und -abstrahlung

Um die Schallübertragung zu verringern sollten alle Körperschallbrücken innerhalb und außerhalb des Ventils unterbrochen werden. Besonders in Luft schaltende Magnete müssen durch elastische Zwischenlagen gut Körperschallisoliert werden, da die dünnwandigen Magnetgehäuse Schall gut abstrahlen. In Öl schaltende Magnete strahlen durch stärkere Wandungen weniger Schall ab.

Durch kleine schallabstrahlende Oberflächen kann die Schallabstrahlung ebenfalls reduziert werden, d. h. Verwendung möglichst kleiner Bauteile und kurze Leitungsführung.

Die Ventilbefestigung an einem Montageblock ist gegenüber der Wandmontage vorzuziehen, da die Ventile direkt aufeinander bzw. an den Block gesetzt werden und ein Teil der Verrohrung entfällt. Die steifere Befestigung des Ventils am Block reduziert die Schwingungsamplituden auf dem Ventil, während eine Montagewand vom Ventil oft zu starken Schwingungen angeregt wird [4].

Zusammenfassung

Schaltgeräusche von hydraulischen Wegeventilen lassen sich verringern, wenn Ursachen und die Art des Einflusses verschiedener Größen auf das Geräusch bekannt sind. Ursachen für das Schaltgeräusch sind mechanische Stöße, die hauptsächlich durch das Betätigungselement erzeugt werden, und hydraulische Druckstöße, die durch Druckausgleichsvorgänge oder Bewegungsänderungen des Fluids hervorgerufen werden. Neben den Betriebsparametern Druck und Volumenstrom wirkt sich vor allem die Schaltgeschwindigkeit auf das Geräusch aus. Weitere Einflußfaktoren sind die Bemessung und der Aufbau des Hydrauliksystems. Besonders die Länge der Leitungen und die Anordnung von Druckbegrenzungsventil und Speichern beeinflussen wesentlich die zeitlichen Druckverläufe. Für die Schallabstrahlung ist die Größe und die Befestigungsart des Ventils von Bedeutung.

Da sich einzelne Größen in ihrer Wirkung auf das Geräusch gegenseitig beeinflussen, ist eine quantitative Angabe der Wirksamkeit von Lärminderungsmaßnahmen nicht möglich. Aus den beschriebenen Einflüssen können jedoch für jeden Einzelfall Maßnahmen abgeleitet werden, die eine Reduzierung der Schaltgeräusche ermöglichen.

Schrifttum

- [1] Föller, D.: Untersuchung der Anregung von Körperschall in Maschinen und der Möglichkeiten für eine primäre Lärmbekämpfung. Darmstadt, Technische Hochschule, Diss., 1972
- [2] Wacker, K.: Flüssigkeitsschall in ölhydraulischen Anlagen. Bd. 37: Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart. Stuttgart: Grossmann, 1986. Stuttgart, Universität, Diss., 1986
- [3] Böss, P.: Untersuchungen über den Druckstoß in den Zuleitungen von hydraulischen Preßanlagen. VDI-Z 104(1962)20, S. 903-909.
- [4] Norm VDI 3720, B1.5, Lärmam konstruieren - Hydrokomponenten und -systeme, März 1984.