

Einfluß der Betriebsgrößen auf die Stromüberhöhung von 2-Wege-Stromregelventilen

R. M. Trudzinski

1. Einleitung

Stromregelventile dienen zur lastunabhängigen, stufenlosen Einstellung von Drehzahlen oder Geschwindigkeiten hydraulischer Verbraucher. Den prinzipiellen Aufbau eines 2-Wege-Stromregelventils zeigt Bild 1. Das Ventil besteht aus einem federbelasteten Kolben und zwei in Reihe geschalteten hydraulischen Widerständen. Der dem Verbraucher zugeleitete Volumenstrom Q bewirkt an der Meßblende eine Druckdifferenz $\Delta p = p_1 - p_2$. Diese Druckdifferenz wird durch den Druckdifferenzregelkreis, der aus dem federbelasteten Kolben und dem Stellglied gebildet wird, weitgehend konstant gehalten. Hierdurch ergibt sich ein nahezu konstanter, von der Druckdifferenz am Stromregelventil unabhängiger, Volumenstrom zum Verbraucher.

Bild 2 zeigt die konstruktive Ausführung von handelsüblichen 2-Wege-Stromregelventilen der Nenngröße 16, wie sie für die vorliegende Untersuchung verwendet wurden. Allerdings sind die hier vorgestellten Ergebnisse nicht auf diese Bauformen beschränkt, sondern lassen sich auf alle 2-Wege-Stromregelventile, deren Wirkungsweise auf der Druckdifferenzregelung an einer Meßblende basiert, anwenden.

Während das statische Verhalten, das durch die Abhängigkeit des Volumenstroms Q von der Druckdifferenz $p_0 - p_2$ zwischen Ventilein- und -ausgang und dem Einstellwert E bzw. der Eingangsspannung U_e gekennzeichnet ist, allein von der konstruktiven Gestaltung des Ventils abhängt, wird das dynamische Verhalten neben den Konstruktionsdaten von weiteren Faktoren beeinflusst, die zusammenfassend als anlage- und betriebsspezifische Faktoren bezeichnet werden können.

Die anlagenspezifischen Faktoren bezeichnen die Gegebenheiten der jeweiligen Anlage, in der das Stromregelventil eingesetzt ist. Für das dynamische Verhalten sind hierbei der Pumpenförderstrom, die Volumina zwischen Pumpe, Stromregelventil und Verbraucher, die Bauform des Verbrauchers sowie eventuell installierte Speicher von Bedeutung.

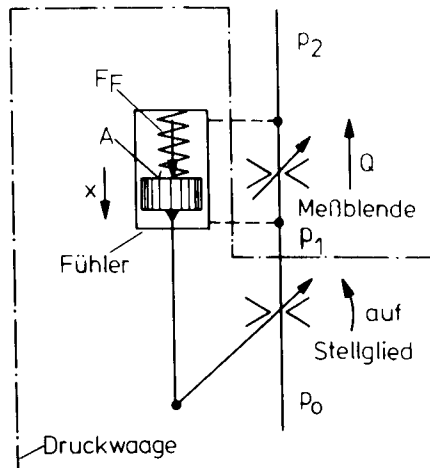
Als betriebsspezifische Faktoren werden die Einflußgrößen bezeichnet, die durch die Betriebsaufgaben und Betriebszustände einer Anlage oder Maschine vorgegeben werden.

Im einzelnen sind dies:

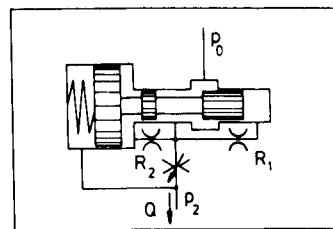
- die Volumenstromvorgabe Q_{soll} ,
- der Versorgungsdruck p_0 und
- der Lastdruck p_2 .

Als Testfunktion, um den Einfluß dieser drei Variablen auf das dynamische Verhalten

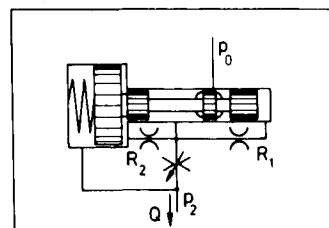
Dr.-Ing. R. M. Trudzinski war bei Abfassung dieses Beitrags wissenschaftlicher Assistent am Institut für hydraulische und pneumatische Antriebe und Steuerungen der RWTH Aachen. Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Backé



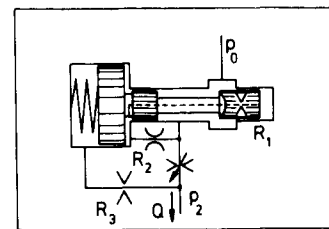
1: Prinzipieller Aufbau eines 2-Wege-Stromregelventils



Modell A



Modell B



Modell C

2: Konstruktive Gestaltung von handelsüblichen 2-Wege-Stromregelventilen

von 2-Wege-Stromregelventilen zu bestimmen, wurden sprungförmige Lastdruckänderungen gewählt. Die im Versuchsfeld gemessenen Sprungantworten des Volumenstroms $Q(t)$ wurden anschließend hinsichtlich des Spitzenwertes des Fehlersignals $\bar{Q}_0 = \bar{Q}_{\text{max}} - Q_{\text{soll}}$, der sich als Differenz des Spitzenwertes des Volumenstroms $Q(t)$ und der Volumenstromvorgabe Q_{soll} ergibt, ausgewertet (Bild 3).

Den Auswertungen werden Ergebnisse gegenübergestellt, die mit Hilfe eines im folgenden vorgestellten Rechenverfahrens, das eine einfache Abschätzung der Stromüberhöhung \bar{Q}_0 gestattet, bestimmt wurden. Die Berechnung geht von einer sprungförmigen

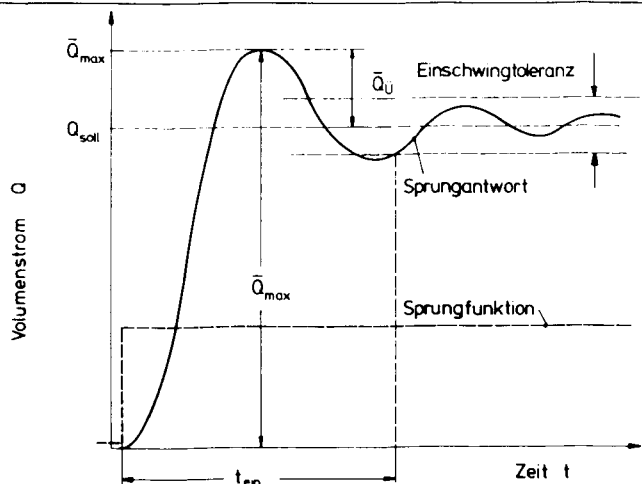
Lastdruckänderung aus, so daß die Ergebnisse dieser Abschätzung die Grenzen kennzeichnen, die das Fehlersignal \bar{Q}_0 maximal erreichen kann. Für eine Anlage, die nur geringe Druckänderungsgeschwindigkeiten aufweist, stellen sich dagegen geringere Stromüberhöhungen \bar{Q}_0 ein, als in den Diagrammen angegeben sind. Der qualitative Verlauf, der die Abhängigkeit des Fehlersignals \bar{Q}_0 von den Betriebsgrößen Volumenstromvorgabe Q_{soll} , Versorgungsdruck p_0 und Lastdruck p_2 kennzeichnet, gilt allerdings auch für diese Anlage.

Für die hier vorgestellten Abschätzungsverfahren ist es notwendig, den Volumenstrom $A \cdot x$, der sich aus der Kolbenbewegung der Druckwaage ergibt, zu vernachlässigen. Diese Vereinfachung ist – abgesehen von sehr kleinen Einstellwerten des Volumenstroms $Q_{\text{soll}} = f(E)$ – vertretbar, da dieser Volumenstromanteil nur geringfügig zur Stromüberhöhung beiträgt. So ergibt sich beispielsweise bei einer Einregelzeit von 100 ms und einem Arbeitshub der Druckwaage von 5 mm ein Volumenstrom durch das Einfahren der Druckwaage von $Q = A \cdot x = 12 \text{ cm}^2 \cdot 5 \text{ mm} \cdot 0,1 \text{ s} = 3,6 \text{ l/min}$. Als weitere Variable, die in der Abschätzung vernachlässigt wird, ist der Kompressionsölstrom $Q_{\text{K2}}(t)$ zu nennen, der sich bei Laständerungen im Volumen V_2 zwischen Stromregelventil und Belastung ergibt. Zulässig ist dies, da sich bei kleinen Volumina V_2 nur ein geringer Kompressionsölstrom ergibt, während sich bei großen Volumina V_2 trotz eines großen Kompressionsölstroms meist relativ geringe Druckänderungsgeschwindigkeiten dp_2/dt ergeben, wodurch die Druckdifferenz am Stromregelventil geringer ausfällt als bei sprungförmiger Laständerung.

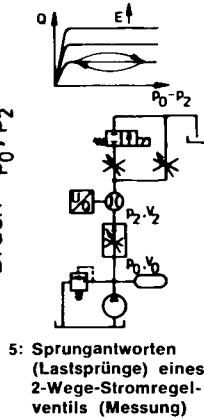
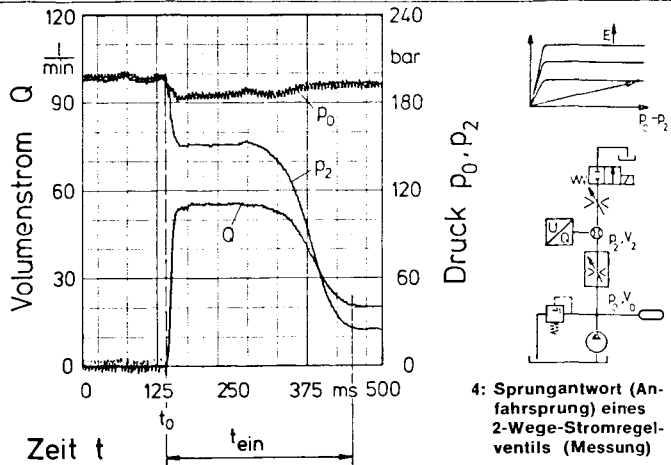
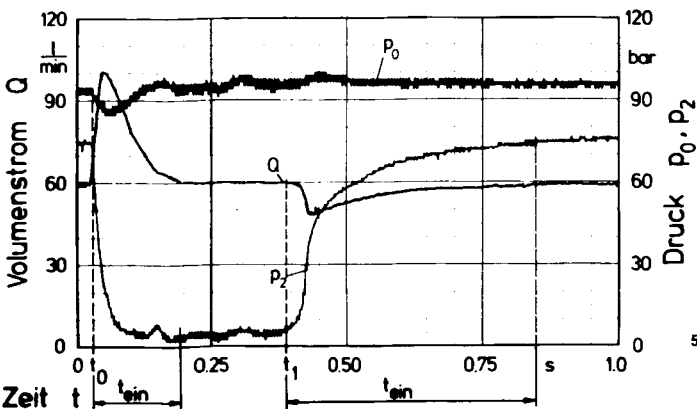
2. Anfahrspaltung und Lastspaltung

Den Anfangsbedingungen entsprechend ist es zweckmäßig, das dynamische Verhalten von Stromregelventilen in „Anfahrspaltung“ und „Lastspaltung“ zu gliedern. Als Anfahrspaltung werden sprungförmige Lastdruckänderungen bezeichnet, die von Arbeitspunkten des unregelmäßigen Bereichs des Stromregelventils ausgehen, bei denen die Druckdifferenz am Ventil $p_0 - p_2$ nicht ausreicht, um die Mindestdruckdifferenz zu übersteigen.

Bild 4 zeigt einen Versuchsaufbau, bei dem die Anfangsbedingungen für einen Anfahrspaltung gegeben sind. Das Wegeventil ist für $t < t_0$ geschlossen, der Druck vor und hinter dem Stromregelventil entspricht dem am Druckbegrenzventil eingestellten Druck p_0 . Durch die Feder, die auf die Druckwaage wirkt, wird der Kolben der Druckwaage am Anschlag gehalten. Der Steuerquerschnitt der Druckwaage ist vollständig geöffnet. Zum Zeitpunkt $t = t_0$ wird das Wegeventil geschaltet. In wenigen Millisekunden fällt der Lastdruck auf $p_2(t) = 150 \text{ bar}$. Der Volumenstrom $Q(t)$ wächst gleichzeitig von $Q = 0,1 \text{ l/min}$ bis $Q = 55 \text{ l/min}$. Der gegenüber dem Sollwert $Q_{\text{soll}} = 20 \text{ l/min}$ erhöhte Volumenstrom bewirkt an der Meßblende eine Druckdifferenz, die zum Einfahren der Druckwaage in die Regelposition führt. Nach etwa 150 ms ist der Steuerquerschnitt der Druckwaage so weit verringert, daß der Volumenstrom gedrosselt wird. Mit abnehmendem Volumenstrom Q verringert sich der Lastdruck $p_2(t)$.



3: Kennwerte zur Beurteilung des dynamischen Verhaltens von Stromregelventilen



5: Sprungantworten (Lastsprünge) eines 2-Wege-Stromregelventils (Messung)

4: Sprungantwort (Anfahrungsprung) eines 2-Wege-Stromregelventils (Messung)

Nach $t = 320$ ms hat das Stromregelventil den Sollwert $Q_{soll} = 20$ l/min erreicht. Der Lastdruck entspricht dem an der Lastblende eingestellten Wert $p_2(t \rightarrow \infty) = 25$ bar. Im Gegensatz zum Anfahrungsprung stellt der Lastsprung eine sprungförmige Lastdruckänderung innerhalb des Regelbereichs des Stromregelventils, der durch die Ungleichung $p_0 - |p_{min}| > p_2 \geq 0$ bar gekennzeichnet ist.

Bild 5 zeigt die Antwortfunktion des Volumenstroms auf eine positive sowie eine negative Lastdruckänderung. Für die Zeit $t < t_0$ ist das Ventil in der Regelposition. Der Volumenstrom beträgt $Q = 60$ l/min, der Lastdruck $p_2(t < t_0) = 75$ bar. Zum Zeitpunkt $t = t_0$ schaltet das Wegeventil. Der Druck sinkt in wenigen Millisekunden um etwa 60 bar. Gleichzeitig stellt sich ein zu großer Volumenstrom $Q(t)$ über das Stromregelventil ein, der zu einer Verschiebung der Druckwaage führt. Hierdurch wird der Steuerquerschnitt der Druckwaage verringert. Nach $t = 175$ ms ist der Sollwert $Q_{soll} = 60$ l/min erreicht, die Druck-, Strömungs- und Federkräfte auf der Druckwaage befinden sich im Gleichgewicht.

Eine positive Lastdruckänderung wird zum Zeitpunkt $t = t_1$ erzielt, indem das Wegeventil wieder geschlossen wird. Hierdurch steigt der Lastdruck p_2 an. Gleichzeitig stellt sich ein gegenüber dem Sollwert verminderter Volumenstrom über das Stromregelventil ein. Hierdurch verringert sich die Druckdifferenz an der Meßblende, so daß die Feder die Druckwaage in Öffnungsrichtung auslenken kann. Der Volumenstrom nimmt somit zu, bis nach etwa 460 ms nach der Erregung der Sollwert des Volumenstroms $Q_{soll} = 60$ l/min erreicht ist.

Vergleicht man den positiven und den negativen Lastsprung in Bild 5, so fällt auf, daß Lastdruckänderungen zu geringen Lastdruckwerten größere Fehlersignale aufweisen, als Lastdruckänderungen zu höherem Lastdruckniveau. Bevor hierauf näher eingegangen wird, sei zunächst die Abhängigkeit der Stromüberhöhung beim Anfahrungsprung von den Betriebsgrößen vorgestellt.

3. Untersuchung der Stromüberhöhung beim Anfahrungsprung

3.1. Einfluß des Versorgungsdrucks p_0 auf die Stromüberhöhung

Um die Abhängigkeit der Stromüberhöhung vom Versorgungsdruck p_0 zu bestimmen, wurden Anfahrungsprünge mit verschiedenen Einstellungen des Versorgungsdrucks p_0 gemessen. Die Lastblende ist jeweils so eingestellt worden, daß sich in der Durchlaßstellung des Wegeventils ein für die Versuchsreihe konstanter Lastdruck $p_2(t \rightarrow \infty)$ ergibt. Die Auswertung dieser Antwortfunktion ist in **Bild 6** gezeigt. Aufgetragen ist der maximale Volumenstrom \bar{Q}_{max} , der sich aus der Summe des eingestellten Volumenstroms Q_{soll} und der Stromüberhöhung \bar{Q}_u ergibt, über dem Versorgungsdruck p_0 . Parameter ist der Einstellwert des Volumenstroms $Q_{soll} = f(E)$. Durch Dreiecke sind die gemessenen, durch Kreuze die gerechneten Werte dargestellt.

Die Berechnung geht von einer Reihenschaltung der Widerstände der Druckwaage, die Meßblende und der Lastblende aus. Der Widerstand der Druckwaage kann hierbei vernachlässigt werden, da sich im ersten Moment des Anfahrungsprungs die Querschnitte der Druckwaage und der Meß-

blende wie $A_D(x)$: $A_{MB} = 5 : 1$ verhalten. Hierdurch ergibt sich die folgende einfache Abschätzung des maximalen Volumenstroms \bar{Q}_{max} . Der Lastdruck $p_2(t)$ hängt von den Widerständen der Druckwaage und der Meßblende entsprechend der Gleichung

$$\bar{p}_2 = \frac{p_0}{1 + (B_L/B_M)^2}$$

ab.

Hierbei bedeutet

- B_L = Durchflußbeiwert der Lastblende,
- B_M = Durchflußbeiwert der Meßblende,
- \bar{p}_2 = Lastdruck p_2 , der sich zwischen zwei Widerständen mit den Durchflußbeiwerten B_L und B_M für $p_0 = \text{const.}$ und $t \rightarrow \infty$ einstellt.

Die Bestimmungsgleichungen für diese Beiwerte sind

$$B_L = \frac{Q_{soll} = f(E)}{\sqrt{p_2(t \rightarrow \infty)}}$$

$$B_M = \frac{Q_{soll} = f(E)}{\sqrt{|p_M(t \rightarrow \infty)|}}$$

Die Druckdifferenz $|p_M(t \rightarrow \infty)|$ entspricht der im statischen Betrieb an der Meßblende abfallenden Druckdifferenz, deren Werte bei ausgeführten Stromregelventilen zwischen 3–10 bar liegen. Für die bei dieser Untersuchung eingesetzten Ventile der NG 16 beträgt diese Druckdifferenz etwa 4 bar bei einem Volumenstrom von $\bar{Q}_{soll} = 20$ l/min.

Da der Kompressionsölstrom im Volumen V_2 vernachlässigt wird, gilt für den Volumenstrom über die Lastblenden

$$\bar{Q}_{max} = B_L \cdot \sqrt{\bar{p}_2}$$

bzw.

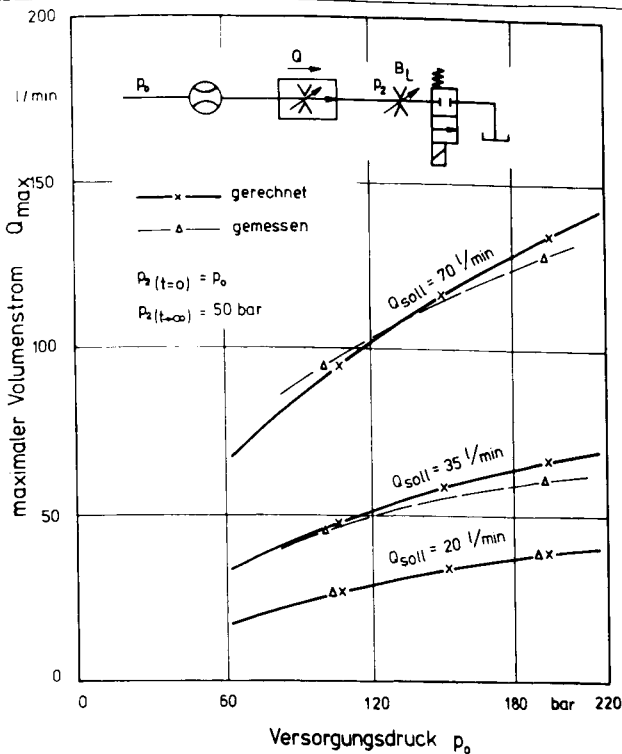
$$\bar{Q}_{max} = B_L \cdot \sqrt{\frac{p_0}{1 + (B_L/B_M)^2}}$$

Wie Bild 6 zeigt, ergibt sich tendenzmäßig gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und gerechneten Ergebnissen. Festzuhalten gilt, daß der maximale Volumenstrom \bar{Q}_{max} proportional der Wurzel des Versorgungsdrucks p_0 ist.

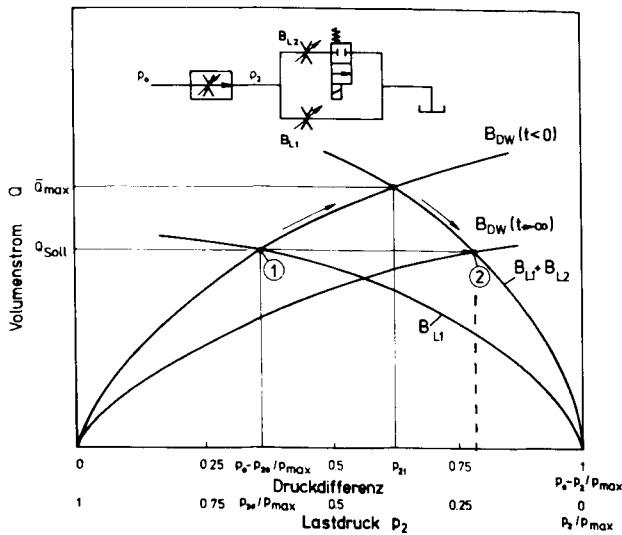
3.2. Abhängigkeit der Stromüberhöhung vom Einstellwert

$$Q_{soll} = f(E)$$

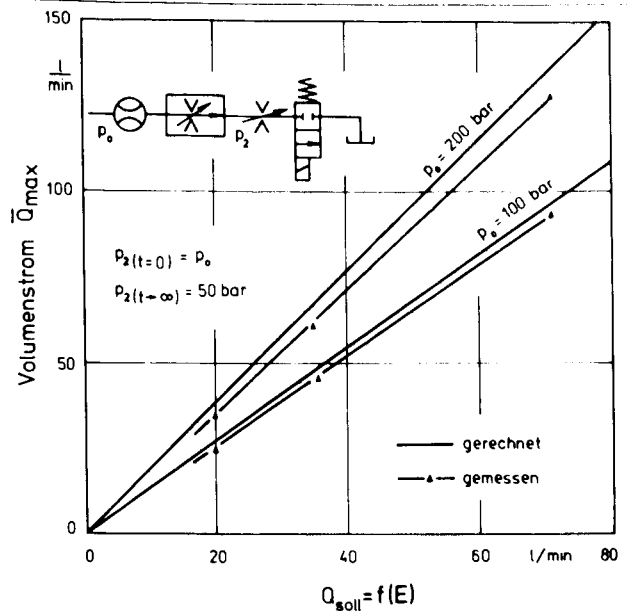
Als weiterer Parameter, der die Stromüberhöhung beim Anfahrungsprung beeinflusst, ist der Einstellwert $Q_{soll} = f(E)$ zu nennen. **Bild 7** zeigt die Abhängigkeit des maximalen Volumenstroms \bar{Q}_{max} von der Volumenstromvorgabe $Q_{soll} = f(E)$. Als Parameter ist der Versorgungsdruck p_0 eingetragen. Durch Kreise sind die aus gemessenen Antwortfunktionen $Q = f(t)$ bestimmten Kenn-



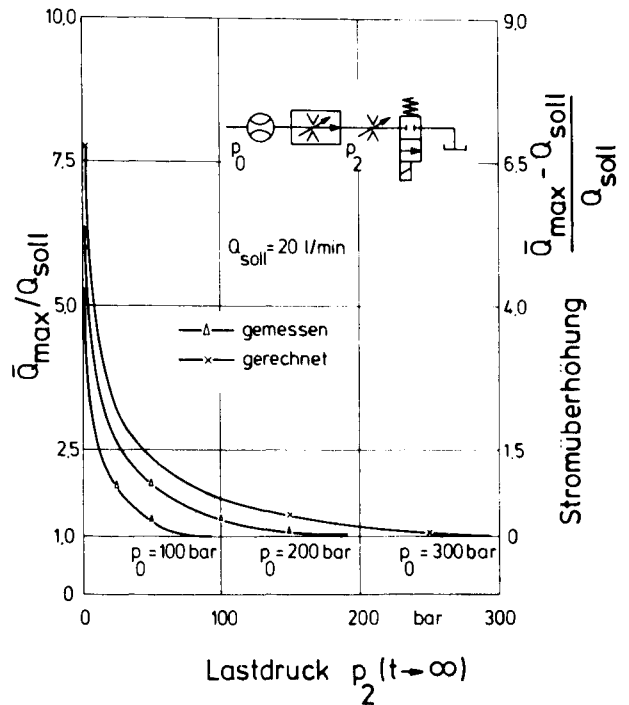
6: Abhängigkeit des maximalen Volumenstroms $\bar{Q}_{max} = \bar{Q}_ü + Q_{soll}$ vom Versorgungsdruck



9: Kennlinien des Widerstands der Druckwaage und der Lastblenden B_{L1} und $B_{L1} \cdot B_{L2}$ vor und nach dem Schalten des Wegevventils



7: Abhängigkeit des maximalen Volumenstroms $\bar{Q}_{max} = \bar{Q}_ü \cdot Q_{soll}$ von der Volumenstromvorgabe Q_{soll}



8: Abhängigkeit des maximalen Volumenstroms $\bar{Q}_{max} = \bar{Q}_ü \cdot Q_{soll}$ bzw. der Stromüberhöhung $\bar{Q}_ü / Q_{soll}$ vom Lastdruck p_2

werte, durch Linien die gerechneten Kennwerte gekennzeichnet. Für die Berechnung wird eine Reihenschaltung der Widerstände „Meßblende“ und „Lastblende“ angenommen. Der Widerstand der Druckwaage wird vernachlässigt. Es gilt

$$\bar{p}_2 = \frac{p_0}{1 + (B_L \cdot B_M)^2}$$

mit $B_M = \frac{Q_{soll}(t \rightarrow \infty)}{\sqrt{1 \cdot P_M(t \rightarrow \infty)}}$

und $B_L = \frac{Q_{soll} = f(E)}{\sqrt{p_2(t \rightarrow \infty)}}$

folgt $\bar{Q}_{max} = B_L \cdot \sqrt{\bar{p}_2}$

$$= Q_{soll}(E) \cdot \sqrt{\frac{p_0}{1 \cdot P_M(t \rightarrow \infty)}}$$

Der maximale Volumenstrom beim Anfahrspurt \bar{Q}_{max} , der sich aus dem Sollwert des Volumenstroms $Q_{soll}(E)$ und der Stromüberhöhung $\bar{Q}_ü$ zusammensetzt, nimmt – wie deutlich aus dem Vergleich von Messung und Rechnung in Bild 7 hervorgeht – linear mit dem Volumenstrom $Q_{soll} = f(E)$ zu.

3.3. Abhängigkeit der Stromüberhöhung vom Lastdruck p_2

Bisher wurde die Stromüberhöhung, die bei einem Anfahrspurt auftritt, in ihrer Abhängigkeit vom Versorgungsdruck p_0 und vom Einstellwert des Volumenstroms $Q_{soll} = f(E)$ vorgestellt. Eine weitere Zustandsgröße, die vom jeweiligen Betriebsfall vorgegeben wird, ist der Lastdruck p_2 , dessen

Grenzen durch die Ungleichung $p_0 < p_2 \leq 0$ bar für den hier untersuchten Versuchsaufbau gekennzeichnet sind. Die Frage, wie sich die Stromüberhöhung als Funktion des Lastdrucks $p_2(t \rightarrow \infty)$ ändert, läßt sich an Hand von Bild 8 beantworten. Aufgetragen sind die bezogene Stromüberhöhung $(\bar{Q}_{max} - Q_{soll}(E)) / Q_{soll}(E)$ und der bezogene maximale Volumenstrom $\bar{Q}_{max} / Q_{soll}(E)$ über dem Lastdruck $p_2(t \rightarrow \infty)$. Als Parameter ist der Versorgungsdruck p_0 gewählt. Die Dreiecke entsprechen Werten, die aus gemessenen Antwortfunktionen ermittelt wurden. Den gerechneten Kennwerten entsprechen die durchgezogenen Linien. Da zu Beginn des Anfahrspurts der Widerstand der Druckwaage vernachlässigt werden kann, erfolgt die Berechnung des

maximalen Volumenstroms \bar{Q}_{\max} durch die Bestimmung der Widerstandsgeometrie der Meßblende und der Lastblende. Es gilt

$$\bar{p}_2 = \frac{p_0}{1 + (B_L + B_M)^2}$$

mit $B_M = \frac{Q_{\text{soll}}(E)}{\sqrt{|p_M(t \rightarrow \infty)|}}$

und $B_L = \frac{Q_{\text{soll}}(E)}{\sqrt{|p_2(t \rightarrow \infty)|}}$

Durch Einsetzen ergibt sich

$$\frac{p_2}{p_0} = \frac{1}{1 + \frac{|p_M(t \rightarrow \infty)|}{p_2(t \rightarrow \infty)}}$$

Mit $\bar{Q}_{\max} = B_L \cdot \frac{p_2}{p_0}$

und $Q_{\text{soll}}(E) = B_L \cdot \frac{p_2(t \rightarrow \infty)}{p_0}$

$$\text{folgt } \frac{\bar{Q}_{\max}}{Q_{\text{soll}}} = \frac{B_L}{B_L} \cdot \frac{\bar{p}_2}{p_2(t \rightarrow \infty)} = \frac{p_0 p_2(t \rightarrow \infty)}{1 + \frac{|p_M(t \rightarrow \infty)|}{p_2(t \rightarrow \infty)}}$$

Die gemessenen Werte entsprechen – wie Bild 8 zeigt – den mit dieser einfachen Übersichtsrechnung bestimmten Zahlenwerten recht gut.

Es stellt sich heraus, daß mit zunehmender Sprungweite $p_0 - p_2$ beim Anfahrtsprung eine hyperbolische Zunahme der Stromüberhöhung eintritt. Als besonders kritisch sind somit Laständerungen zu sehr kleinen Lastdruckwerten $p_2(t \rightarrow \infty)$ festzustellen. Vernachlässigt man die Druckdifferenz an der Meßblende $|p_M(t \rightarrow \infty)|$ – was bei großen Zahlenwerten des Versorgungs- und des Lastdrucks zulässig ist – ergibt sich für die Anfahrtsprünge die Beziehung

$$\frac{\bar{Q}_{\max}}{Q_{\text{soll}}(E)} = \frac{p_0}{p_2(t \rightarrow \infty)}$$

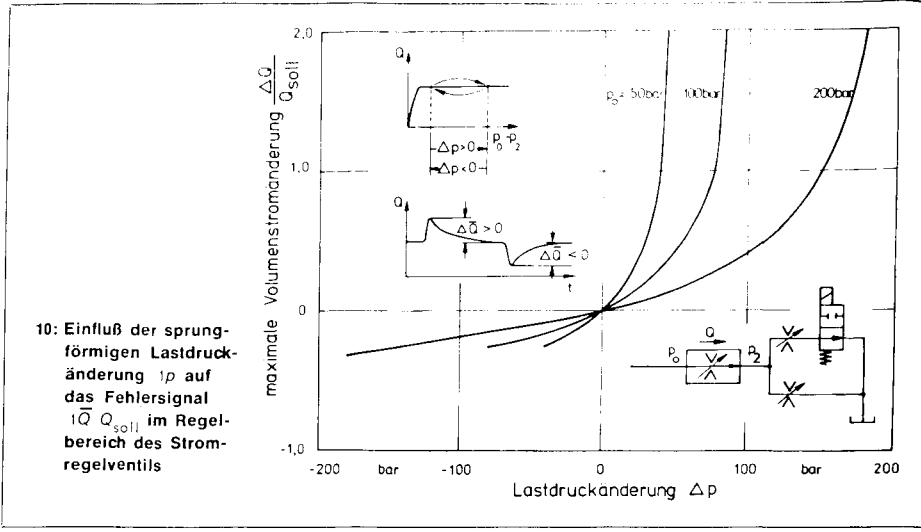
Der maximale Volumenstrom ist damit besonders vom Einstellwert des Volumenstroms $Q_{\text{soll}} = f(E)$ und der Wurzel des Verhältnisses von Versorgungs- und Lastdruck abhängig. Für die Stromüberhöhung ergibt sich die Relation

$$\bar{Q}_v = \bar{Q}_{\max} - Q_{\text{soll}}(E) = Q_{\text{soll}} \cdot \left[\frac{p_0}{p_2(t \rightarrow \infty)} - 1 \right]$$

4. Untersuchung der Stromüberhöhung bei Lastsprüngen

Die bisher für den Anfahrtsprung gezeigte Methode, den maximalen Volumenstrom \bar{Q}_{\max} durch die Analyse der Widerstandsgeometrie abzuschätzen, läßt sich ebenfalls auf Lastsprünge, d. h. sprungförmige Änderungen des Lastdrucks p_2 im geregelten Volumenstrombereich des Kennfeldes $Q = f(p_0 - p_2, E)$ übertragen. Eine Abschätzung der Widerstände im Regelbereich ergibt – abgesehen von sehr geringen Druckdifferenzen $p_0 - p_2$ zwischen Ein- und Ausgang des Stromregelventils – eine Reihenschaltung der Steuerquerschnitte der Druckwaage und der Lastblende, da der Widerstand der Meßblende vernachlässigt werden kann. Anhand der statischen Kennlinien der Widerstände der Druckwaage (bei $x = \text{const.}$) und der Lastblende vor und nach dem Schalten des Wegeventils, veranschaulicht Bild 9 dieses Abschätzverfahren.

Zum Zeitpunkt $t < 0$ fließt der Volumenstrom $Q = Q_{\text{soll}}$. Die Druckdifferenz am



10: Einfluß der sprungförmigen Lastdruckänderung Δp auf das Fehlersignal $|\bar{Q} - Q_{\text{soll}}|$ im Regelbereich des Stromregelventils

Stromregelventil beträgt $p_0 - p_{20}$ und die Druckwaage hat eine Regelposition eingefahren, die der Blendenkennlinie $B_{DW}(t < 0)$ entspricht. An der Lastblende fällt der Druck p_{20} ab. Zum Zeitpunkt $t = 0$ schaltet das Wegeventil, die Lastblenden entsprechen der Kennlinie des Widerstandes $B_L = B_{L1} + B_{L2}$. Der bei dieser Widerstandsreihenschaltung von B_{DW} und $B_L = B_{L1} + B_{L2}$ maximal mögliche Volumenstrom ist \bar{Q}_{\max} , der zugehörige Lastdruck beträgt p_{21} . Die Abweichung zwischen dem Volumen-Soll- und -Istwert führt zu einer Änderung der Position der Druckwaage, bis die Blendenkennlinie $B_{DW}(t \rightarrow \infty)$ erreicht wird. Der Volumenstrom $Q(t \rightarrow \infty)$ stellt sich hierbei auf die Sollwertvorgabe $Q_{\text{soll}} = f(E)$ ein.

Die mathematische Formulierung ergibt:

$$Q_{\text{soll}} = B_{DW}(t < 0) \cdot \sqrt{p_0 - p_{20}} = B_{DW}(t \rightarrow \infty) \cdot \sqrt{p_0 - p_2(t \rightarrow \infty)}$$

$$|\bar{Q} = \bar{Q}_{\max} - Q_{\text{soll}}$$

Hierbei bedeuten

- p_{20} = Druck $p_2(t < 0)$
 - p_2 = Druck $p_2(t \rightarrow \infty)$ für $B_{DW}(t \rightarrow \infty) = \text{const.}$ und $B_L = \text{const.}$
 - $|\bar{Q}$ = maximales Fehlersignal
- Außerdem gilt

$$\frac{p_{21}}{p_0} = \frac{1}{1 + \left[\frac{B_{DW}(t < 0)}{B_L} \right]^2}$$

Durch Umformen lassen sich diese Gleichungen zusammenfassen zu

$$\frac{|\bar{Q}}{Q_{\text{soll}}} = \left[\sqrt{\frac{1}{1 - \frac{|p|}{p_0}}} - 1 \right]$$

wobei $|p| = p_{20} - p_2$ die Lastdruckänderung bezeichnet.

Für die Lösung dieser Gleichung lassen sich zwei Fälle unterscheiden:

1. Fall

Dieser Fall stellt sich ein, wenn von einem hohen Druckniveau $p_2(t < 0)$ zu einem geringen Druckniveau $p_2(t \rightarrow \infty)$ die Laständerung erfolgt. Für die bezogene Stromüberhöhung ergibt sich, da der Betrag unter der Wurzel größer Eins ist, ein positives Fehlersignal des Volumenstroms $Q(t)$.

2. Fall

Dieser Fall entspricht einer Laständerung von einem niedrigen $p_2(t < 0)$ zu einem hohen Lastdruck $p_2(t \rightarrow \infty)$.

Für den bezogenen maximalen Volumenstrom \bar{Q}_{\max} , Q_{soll} ergibt sich ein Wert kleiner Eins, wodurch ein negatives Fehlersignal, also ein Volumenstrom, der geringer ist als der Sollwert, auftritt.

Die Ergebnisse dieser Berechnung des Fehlersignals des Volumenstroms bei Lastsprüngen im Regelbereich des Stromregelventils zeigt Bild 10. Aufgetragen ist das auf den Einstellwert $Q_{\text{soll}} = f(E)$ bezogene Fehlersignal $|\bar{Q} = \bar{Q}_{\max} - Q_{\text{soll}}$ über der Lastdruckänderung $|p| = p_{20}(t < 0) - p_2(t \rightarrow \infty)$.

Deutlich ist zu erkennen, daß sich besonders sprungförmige Lastdruckänderungen zu großen $|p| > 0$ ungünstig auswirken, während Lastdruckänderungen zu höherem Druckniveau des Lastdrucks p_2 relativ geringe Fehlersignale hervorrufen.

5. Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung stellt den Einfluß der betriebsspezifischen Größen auf das dynamische Verhalten von 2-Wege-Stromregelventilen dar. Zu den betriebsspezifischen Größen zählen der eingestellte Volumenstrom Q_{soll} , der Versorgungsdruck p_0 und der Lastdruck p_2 . Wie bei nichtlinearen Systemen üblich, ergibt sich ein von den Anfangsbedingungen abhängiges Fehlersignal.

Ein einfaches Modell, das die Stromüberhöhung \bar{Q}_v beim Anfahrtsprung bzw. das maximale Fehlersignal des Volumenstroms $|\bar{Q}$ als Funktion der betriebsspezifischen Faktoren zu berechnen gestattet, wird vorgestellt und anhand von gemessenen Sprungantworten auf seine Aussagefähigkeit geprüft.

Literaturhinweis

Trudziński, R. M.: Experimentelle und analytische Bestimmung des Betriebsverhaltens von direktwirkenden und vorgesteuerten 2-Wege-Stromregelventilen, Diss. TH Aachen 1980

Bildnachweis: Verfasser