

Der Feind im Ventil – Kritische Betriebszustände bei Stellventilen



Sonderdruck aus
„atp – Automatisierungstechnische Praxis“
Jahrgang 44 · Heft 7 · 2002

Verfasser:
Dr. Ralph Herbrich

Der Feind im Ventil – Kritische Betriebszustände bei Stellventilen

Dr. R. Herbrich, SAMSON AG

Stellventile werden meist zur Regelung von Gas- und Flüssigkeitsströmen eingesetzt. Dies erscheint zunächst problemlos im Vergleich zu feststoffbeladenen Fluiden. Feststoffanteile führen schnell zu Materialabtrag (Abrasion) im Ventil. Die flüssige Phase hingegen birgt die Gefahr von Kavitation und Flashing. Um für die Festlegung eines für eine Regelung geeigneten Stellventils diese Zustände möglichst detailliert beurteilen zu können, ist die Kenntnis der genauen Prozessdaten ein Muss. Dies gilt besonders für die Verhältnisse hinter dem Ventil. Treten im oder hinter dem Ventil hohe Strömungsgeschwindigkeiten auf, kann der Druck lokal so stark absinken, dass er in den Bereich des Dampfdruckes der Flüssigkeit gelangt. Dann bilden sich im strömenden Fluid kleine Gasblasen aus (Kavitation), die mit der Strömung in Bereiche höheren Drucks gelangen und dort wieder zusammenfallen. Bei dieser Blasenimplosion bilden sich so genannte Microjets aus, die die Materialoberfläche beschä-

digen (Kavitationserosion). Solche Betriebszustände, in denen der Regelprozess mehr oder weniger stark gestört ist, resultieren fast immer aus einer nur unzureichenden Planung der Anlage oder einer „im Schnellschuss“ realisierten Auslegung des Stellventils. In Zeiten, in denen der „Return on Investment“ eines Unternehmens im Vordergrund steht, scheut man aufwändige und damit kostspielige Lösungen manchmal zu sehr. In Standardventilen, mit denen viel zu große Druckdifferenzen realisiert werden sollen, kommt es zu ventilschädigenden und den Regelprozess störenden Phänomenen wie Kavitation oder Durchflussbegrenzung. Im folgenden Beitrag soll auf diese die Regelung beeinträchtigende und für ein Ventil unter Umständen „lebensbedrohlichen“ Zustände näher eingegangen werden. Als wichtige Maßnahme zur Vermeidung wird ein neuartiges Drosselement vorgestellt, das Schäden dieser Art vermeidet und im Raffineriebereich bereits erfolgreich eingesetzt wurde.

The Enemy in the Valve – Critical operating conditions in control valves

Control valves are, above all, used to control the flow of gases and liquids. In contrast to fluids carrying along solids, which quickly cause abrasion in the valve, this does not seem to present an obvious problem. The liquid phase, however, holds the danger of cavitation and flashing. To be able to evaluate such conditions as accurately as possible before choosing the appropriate control valve, it is crucial to know the exact process data. This applies in particular to the conditions downstream of the control valve. Extremely high flow rates in the valve or downstream of it can cause the pressure to locally drop to the extent that it reaches the vapor pressure of the liquid. As a result, small gas bubbles (cavitation bubbles) form in the process fluid. They are carried along by the flow to areas of higher pressure where they collapse. These bubble implosions result in microjets which damage the surface of the material (cavita-

tion erosion). Such operating conditions, in which the control process is disturbed in varying degrees, are almost always a result of insufficient plant planning or hasty valve selection and sizing. In times when return on investment is given top priority, companies too often hesitate to invest in complex and cost-intensive solutions. Nevertheless, when standard valves are used to handle too high pressure drops, effects like cavitation and flow limitation, which damage the valve and disrupt the control process, are a common feature. In the following article, these effects impairing the control process and possibly causing “life-threatening” conditions for a control valve are to be dealt with in more detail. As an important course of action to prevent detrimental operating conditions, a new throttling element will be introduced. It helps to prevent damage and already has a very good track record in the refining industry.

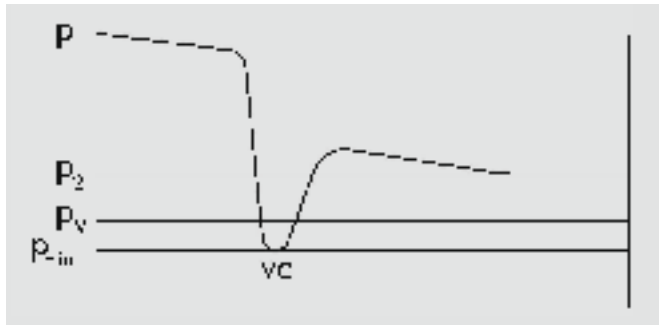


Abbildung 1: Typischer Druckverlauf im Ventil; direkt hinter der vena contracta (vc) ist der Druck deutlich niedriger als der Nachdruck p_2 .

1. Einführung

Stellventile regeln Druck, Temperatur und Durchfluss. Dabei muss das Ventil Druck vernichten – oder genauer: Druck in Wärme überführen. Dies geschieht, indem durch eine Verminderung des Strömungsquerschnitts zwischen Sitz und Kegel des Ventils die Fließgeschwindigkeit erhöht und so potenzielle Druckenergie in kinetische Energie überführt wird. Hinter der Drosselstelle wird aufgrund des großen Strömungsraumes die Geschwindigkeit wieder reduziert, die kinetische Energie durch intensive Verwirbelung in Wärme überführt (Stoßverlust), aber leider zum Teil auch als Druck zurückgewonnen. Um einen bestimmten Nachdruck p_2 zu erreichen, muss daher der Druck im Ventil je nach Stärke des Druckrückgewinns mehr oder wenig unter den Nachdruck p_2 abgesenkt werden und kann dabei den Dampfdruck p_v des Fluids unterschreiten (Abbildung 1), insbesondere in den Wirbelkernen der Mischungszone. Ist dies der Fall, so bilden sich kleine Gasbläschen aus – mikroskopisch kleine Ansammlungen von gas- oder dampfförmigen Molekülen. Sie können in ihrer Größe schnell anwachsen, indem im Fluid gelöste Gasanteile in die Blase hinein diffundieren. Gelöster Sauerstoff ist hier im Besonderen zu nennen. Er ist in praktisch jeder Flüssigkeit, die nicht entgast wurde, anzutreffen. Je größer die Gaskonzentration in der Flüssigkeit, um so stärker wachsen die Gasblasen an. Eine solche lokal erhöhte Sauerstoffkonzentration kann zu Oxidationen und damit zu Beschädigungen des Ventilmaterials führen.

2. Druckverhältnisse im Ventil

Der Druckrückgewinn sorgt für das Verschwinden der Kavitationsblasen; sie implodieren, was sich auch in einem typischen „Prasselgeräusch“ ausdrückt (Kavitationsschall). Ein Maß für den Druckrückgewinn ist der ventilspezifische z_v -Wert. Er steht für das Verhältnis von äußerer Druckdifferenz $(p_1 - p_2)$ zu innerer Druckdifferenz $(p_1 - p_i)$, ab dem Kavitation auftritt. Da sich die innere Druckdifferenz einer direkten Messung entzieht, wird der z_v -Wert durch eine Geräuschemessung im Prüfstand

ermittelt (Abbildung 2). Bei Kavitationsbeginn, der aus dem Geräuschverlauf sehr gut zu ersehen ist, ist der innere Druck p_i dem Dampfdruck der Flüssigkeit gleichzusetzen: $p_i = p_v$. Besitzt ein Ventil einen über den gesamten Hubbereich konstanten z_v -Wert, so kann man bei bekanntem angestrebten Differenzdruckverhältnis $X_F = \Delta p / (p_1 - p_v)$ einen eventuell auftretenden Kavitationsbetrieb vorhersagen: Liegt X_F über z_v , so tritt Kavitation auf.

Die Betriebsdrücke p_1 und p_2 sind meist durch den Produktionsprozess vorgegeben. Von der Geometrie der Drosselstelle sowie der Höhe des Dampfdrucks hängt es ab, ob man in den Bereich der Kavitation gelangt. Je größer die Druckdifferenz am Stellventil wird, desto tiefer liegt das Druckminimum an der Drosselstelle. Unterhalb des kritischen Differenzdruckverhältnisses z_v steigt mit dem Differenzdruck der Geräuschpegel leicht an, was allein aus der inneren Reibung der turbulenten Strömung an Gehäusewand und Garnitur resultiert.

Ab dem z_v -Wert liegen die Verhältnisse dann jedoch ungünstiger: Der Dampfdruck der Flüssigkeit wird nun zumindest kurzzeitig im Bereich der Drosselstelle unterschritten, die Flüssigkeit verdampft. Zu beachten ist die starke Temperaturabhängigkeit des Dampfdrucks der Flüssigkeit: So steigt der Dampfdruck von Wasser im Bereich von 20 bis 100 °C von etwa 0,02 bar auf Umgebungsluftdruck (1,013 bar) an. Bei 200 °C beträgt er bereits 15,5 bar, bei 250 °C knapp 40 bar. Andere Substanzen besitzen schon bei Zimmertemperatur einen recht hohen Dampfdruck; man denke an flüchtige Stoffe wie die leichten Alkohole. Für alle Fluide gilt: Je höher deren Dampfdruck, umso eher wird er im Ventil unterschritten.

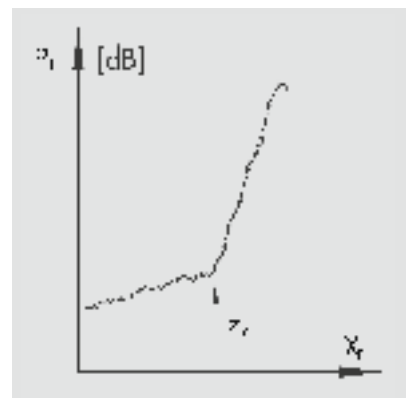


Abbildung 2: Schallpegelverlauf in Abhängigkeit vom Differenzdruckverhältnis $X_F = (p_1 - p_2) / (p_1 - p_v)$: Ab dem z_v -Wert bilden sich Kavitationsblasen, deren Implodieren das typische „Prasselgeräusch“ verursacht.

3. Schädigende Wirkung

Die anschließende Implosion der entstandenen Gasblasen im Kavitationsbetrieb ist auf den Druckrückgewinn auf der Nachdruckseite zurückzuführen (Abbildung 1). Während der Druck in der Blase im Bereich des Dampfdrucks p_v der Flüssigkeit liegt, ist der umgebende Nachdruck p_2 viel höher, so dass die Blasen zusammenbrechen. Hierbei werden durch die adiabata-

tische Aufheizung für einige hundert Picosekunden lokal Temperaturen von mehreren tausend Kelvin erreicht [1, 2].

Der Zusammensturz der Gasblasen erfolgt nicht gleichmäßig: Die Geometrie weicht mehr oder weniger stark von der Kugelsymmetrie ab. Sowohl eine sich in den Bereich höheren Drucks hinein bewegendende Gasblase als auch eine in Wandnähe implodierende Blase zeigen eine eher nierenförmige Deformation, die schließlich zu einer Zerteilung in zwei Fragmente führt [1, 3]. Der sich zwischen den beiden Fragmenten ausbildende Tröpfchenstrahl trifft mit hoher Geschwindigkeit – 500 m/s und mehr – auf Bauteile des Ventils. Je höher der die Blase umgebende Nachdruck p_2 ist, desto größer ist auch die Geschwindigkeit dieses Microjets. Häufig liegen die wandnahen Drücke sogar in der Größenordnung des Vordruckes p_1 , da sich direkt hinter der Drosselstelle meist noch keine turbulente Vermischung eingestellt hat. Die schädigende Kraft beim Blaseneinsturz ist dann aufgrund der Abhängigkeit vom Umgebungsdruck der Blase besonders groß (Proportionalität mit nahezu $p_1 - p_v$). [1, 4]

Da die Kavitation direkt an bzw. hinter der Drosselstelle entsteht, werden genau die Teile des Ventils getroffen, die in unmittelbarer Nähe liegen: Sitz und Kegel, insbesondere die Dichtkante, aber auch die Kegelstange sowie das Gehäuseoberteil des Ventils. Die Schädigung zeigt sich in einer Zerstörung der Werkstoffoberfläche; man spricht von der Kavitationserosion. Hier finden sich je nach Material unterschiedliche Schädigungen: von plastischer Verformung bis hin zu Rissbildung und Partikelabtrag. In Abbildung 3 erkennt man Kavitationsschäden an zwei Kegeln.

Mit Zunahme des Differenzdruckverhältnisses steigt die Zahl der Kavitationsblasen schnell an, so dass auch deren schädigende Wirkung zunimmt. Gleichzeitig wachsen die Blasen, da auch die Diffusion gelöster Gasbestandteile in die Blase hinein verstärkt wird. Dadurch nimmt jedoch der Gasanteil im Kavitationsbereich insgesamt so stark zu, dass die Kompressibilität des Fluids ansteigt. Die Folge ist ein leichtes Absinken der Schallgeschwindigkeit und der Druckstoßintensität und damit eine Abnahme der Erosion [1].

Liegt der angestrebte Nachdruck p_2 prozessbedingt gar unterhalb des Dampfdrucks der Flüssigkeit, gelangt man in den so genannten Flashing-Betrieb. Unter Umständen wird hier der Dampfdruck bereits vor der Drosselstelle unterschritten. Im Ventil und in der Minderdruckleitung hinter dem Ventil liegt dann eine Zweiphasenströmung vor, die gegenüber der reinen Flüssigkeitsströmung eine geringere Dichte und deshalb eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit aufweist. Gleichzeitig ist die Schallgeschwindigkeit in der Zweiphasenströmung verhältnismäßig gering, so dass es bei falscher Dimensionierung zur



Abbildung 3:
Typische Schäden durch Kavitation; die Kegel weisen massiven Materialabtrag auf.

Ausbreitung von Stoßwellen kommen kann, die die Ventilgarnitur, aber auch die angeschlossene Rohrleitung zu Schwingungen anregen kann. Liegen diese im Bereich einer Resonanzfrequenz, kann dies zum Bruch der Rohrleitung führen.

4. Allgemeine Abhilfemaßnahmen

Ein störungsfreier Regelbetrieb kann nur dann sicher gestellt sein, wenn bei Auslegung und Auswahl des Stellventils die drohende Kavitation berücksichtigt wird. Eine große Nennweite ist hierbei als wichtigster Auswahlpunkt zu nennen, um der Nachdruckströmung hinter dem Ventil möglichst schlagartig sehr viel Raum zur Verfügung zu stellen. Werden zudem die Kavitationsblasen in der Strömung günstig geführt, implodieren sie fern der Ventilwände. So können sie ihre zerstörerische Wirkung nicht entfalten, sieht man von der Geräuschemission einmal ab. Natürlich muss insgesamt eine übermäßig starke Blasenbildung vermieden werden, da es sonst zu einer deutlichen Durchflussbegrenzung im Ventil kommt. Als Maß für die beginnende Durchflussbegrenzung gilt der K_C -Wert. Er steht für das Differenzdruckverhältnis, ab dem die Durchflussbegrenzung beginnt, und ist im Wesentlichen durch den Ventiltyp (z. B. Hubventil oder Stellklappe) festgelegt. Der bei kleineren Differenzdruckverhältnissen liegende z_γ -Wert wird davon zwar ebenfalls beeinflusst, er unterliegt jedoch noch vielmehr der Detailgeometrie des Drosselkörpers. Mit steigendem K_V -Wert fällt der z_γ -Wert, mit sinkendem Ventilformfaktor F_d steigt er an. Der Faktor F_d spiegelt die Detailgeometrie der Drosselstelle wider. Er ist um so geringer, je kleiner der hydraulische Durchmesser ist. Bezogen auf identische Drosselflächen besitzen Parabolkegel mit ihren rotationssymmetrischen Ringspalten die kleinsten hydraulischen Durchmesser. [1, 5]

5. Neuartiges Drosselsystem

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen ein neuartiges Drosselsystem, das in ein Standardventilgehäuse eingebaut werden kann. Es

weist einige bauliche Besonderheiten auf: So vermeidet die doppelte Führung des Kegels mechanische Vibrationen. Die Sitzgröße ist nicht reduziert, um den Ringspalt zwischen Sitz und Kegel möglichst schmal und damit den hydraulischen Durchmesser klein zu halten: großer Sitzdurchmesser bei kleinem K_V -Wert. An Sitz und Kegel ist zudem die Kantengeometrie verändert: Eine hochgezogene Sitzdichtkante sorgt für die Anhebung des z_y -Wertes bei großen Ventilöffnungen, indem die Wirbelstrukturen unterhalb des Kegels günstig beeinflusst werden. Die oberhalb des Kegels liegende hinterdrehte Dichtkante vergrößert zusätzlich den z_y -Wert bei kleinen Auslastungen [5]. Durch die sauber definierten Abrisskanten werden die Wirbelzonen von den Wänden fern gehalten; die intensive Verwirbelung führt zu einem verstärkten Druckabbau, ohne dass zu starke Druckabsenkungen in den Wirbelkernen auftreten.



Abbildung 4: Neues Drosselsystem AC-Trim, speziell für minimalen Kavitationsschall

Eine weitere Steigerung des z_y -Wertes erreicht man mit im Sitz integrierten Festdrosseln, die vor der Garnitur durchströmt werden (Abbildung 5): Bei kleiner Ventilauslastung wird der Druckabbau fast vollständig über die Sitz-Kegel-Garnitur realisiert, während bei großen Auslastungen die Drosselscheiben zusammen mit dem Kegel für einen kavitationsfreien Druckabbau sorgen. Dieses AC-Trim genannte Drosselsystem entwickelt erst bei merklich höheren Differenzdruckverhältnissen Kavitationsschall als beispielsweise ein Käfigventil. Bei sehr großen Druckdifferenzen über 10 bar und starker Kavitation (Differenzdruckverhältnisse X_F größer 0,7) werden Kegel und Sitz zusätzlich gehärtet.

6. Zusammenfassung

Die beste Strategie zur Vermeidung von Problemen bei Ventilen ist eine sorgfältige Auslegung auf den Einsatzfall. Treten bei bereits in Betrieb befindlichen Anlagen unerwartet große Lärm- und Erosionsprobleme auf, so ist eine komplette Neuplanung

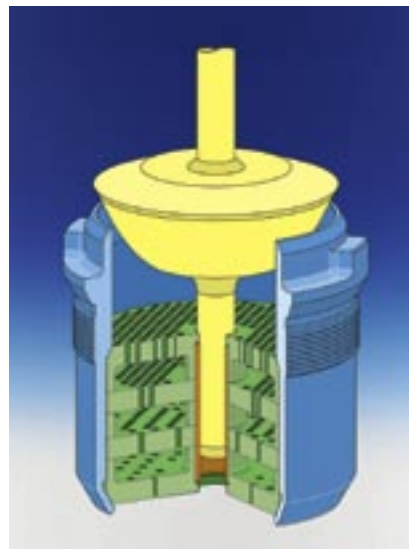


Abbildung 5: Der mehrstufige Druckabbau im AC-Trim wird durch integrierte Drosselscheiben realisiert. Zusammen mit der neu gewählten Kantengeometrie erhöht sich der z_y -Wert sowohl bei großen als auch bei kleinen Ventilöffnungen. Die durchgehende Kegelstange verhindert zudem Vibrationen.

– mit möglicherweise stufenweisem Druckabbau durch Mehrstufenkegel – aus Kostengründen oft ausgeschlossen. In diesem Fall kann der Einsatz von speziellen Drossel-elementen, die in Standardventilgehäuse eingebaut werden können, die letzte Rettung darstellen. So führte ein in einer Raffinerie eingesetztes Regelventil bei Vordrücken von 15 bar und Differenzdruckverhältnissen von 0,5 bis 0,9 zu großen Schwierigkeiten im Regelbetrieb: Schon nach 18 Monaten war das Ventilgehäuse durch Kavitationserosion stark beschädigt. Hier konnte mit Einsatz des AC-Trim in einem Hubventil die Beschädigung durch Kavitationserosion vermieden werden. Gleichzeitig reduzierte sich die Schallemission auf Pegel unter 70 dB(A).

Weitere Literatur zum Thema:

- [1] T. Dobben: „Kavitation in Stellgliedern“, Sonderdruckschrift der SAMSON AG
- [2] W. Güth: „Zur Entstehung der Stoßwellen bei der Kavitation“, *Acustica*, Vol. 6 (1956), 526-531
- [3] R. Knapp, J. Daily, F. Hammit: „Cavitation“, McGraw-Hill Book Company, New York (1970), 343-347
- [4] W. Lauterborn: „Kavitation durch Laserlicht“, *Acustica*, Vol. 31 (1974), 51-78
- [5] J. Kiesbauer: „Stellventile bei kritischen Prozessbedingungen in Raffinerien“, *Industriearmaturen*, Heft 3/2001, 243-250



Dr. Ralph Herbrich
Schulungs- und Pressereferent der SAMSON AG
Telefon: 069 4009-1938, Telefax: 069 4009-1716
E-Mail: rherbrich@samson.de



SAMSON AG · MESS- UND REGELTECHNIK · Weismüllerstraße 3 · 60314 Frankfurt am Main
Telefon: 069 4009-0 · Telefax: 069 4009-1507 · E-Mail: samson@samson.de · Internet: <http://www.samson.de>