

Druckstöße in Ventilen - Lösungen für die Standfestigkeit

- 1. Einleitung**
- 2. Ursachen von Druckstößen**
 - 2.1. Hydraulische Druckstöße und Kavitationsschläge**
 - 2.2. Thermische Druckstöße**
- 3. Anlagentechnische Vermeidung von Druckstößen**
- 4. Einfluss von Druckstößen auf Ventile**
 - 4.1. Gehäusefestigkeit**
 - 4.2. Gehäusedichtungen**
 - 4.3. Spindelabdichtungen**
- 5. Konstruktionsmaßnahmen**
 - 5.1. Formgestaltung und Werkstoffwahl**
 - 5.2. Dichtungswahl und Kammerung**
 - 5.3. Faltenbalgkonstruktion**
- 6. Praktische Versuche**
 - 6.1. Fraunhofer UMSICHT - Institut**
 - 6.2. Versuche am FABA[®]-Plus-Ventil**
 - 6.3. Versuche am FABA[®]-Supra-Ventil**
- 7. Zusammenfassung**
- 8. Literaturhinweise**

1. Einleitung

In medienführenden Rohrleitungen können teilweise sehr starke Druckstöße entstehen, die vielfach auch als Wasserschläge bezeichnet werden. Die dabei auftretenden Belastungen auf die Leitungen, Armaturen und Apparate können so groß sein, dass hierbei Schäden bis zum Bersten entstehen. Bevor wirksame Maßnahmen ergriffen werden, muss genau untersucht werden, um welche Art von Druckstoß es sich handelt und welche Ursachen dazu führen. Doch auch bei sorgfältigster Planung und Ausführung von Anlagen kann insbesondere bei Umbauten, Erweiterungen und wechselnden Betriebsweisen, ein Druckstoßrisiko nicht immer vollständig ausgeschlossen werden. In diesen Fällen ist es von großem Vorteil, wenn die Komponenten der Anlage eine ausreichende Standfestigkeit aufweisen.

2. Ursachen von Druckstößen

Die Entstehung von Druckstößen in Rohrleitungen kann unterschiedliche Ursachen haben. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen dem hydraulischen und dem thermischen Druckstoß.

2.1. Hydraulische Druckstöße und Kavitationsschläge

Wenn beim Durchströmen einer Rohrleitung mit Flüssigkeit eine Absperrarmatur (z.B. Absperrklappe) sehr schnell geschlossen wird, kommt das strömende Medium plötzlich zum Stillstand und die kinetische Energie wird in Druckenergie umgewandelt, d.h. vor der Armatur entsteht ein Druckstoß. Dieser läuft mit Schallgeschwindigkeit von der Entstehungsstelle entgegen der ursprünglichen Strömungsrichtung fort und wird an Unstetigkeitsstellen (Behälter, Leitungsenden, etc.) reflektiert. Diese Druckwellen können mehrfach hin- und herlaufen, wobei die Intensität durch Dissipation mehr und mehr gedämpft wird, bis sie schließlich ausklingen.

Die Druckzunahme nach einem Armaturenschnellschluss lässt sich näherungsweise mit der klassischen Joukowski-Gleichung abschätzen [1]:

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta v \quad (1)$$

Δp	Druckerhöhung [Pa]
ρ	Dichte des Fluids [kg/m ³]
a	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit [m/s]
Δv	Änderung der Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

Die maximale Höhe dieses Druckstoßes wird erreicht, wenn: $t_s \leq 2 \cdot \frac{l}{a}$ (2)

t_s	Schließzeit [s] der Armatur
l	Länge [m] des Rohrleitungsabschnitts in der sich eine Druckwelle ausbreiten kann, ohne reflektiert zu werden

Hinter der Armatur stromabwärts entsteht durch die Trägheit der strömenden Flüssigkeit eine Druckabsenkung. Wenn hierbei der Dampfdruck unterschritten wird, erfolgt eine örtliche Verdampfung der Flüssigkeit und die Bildung einer "Kavitationsblase" [2]. Die anschließende Kondensation erfolgt meist schlagartig. Die Höhe der hierbei entstehenden Druckspitze, auch als "Kavitationsschlag" bezeichnet hängt vom Armaturentyp und der Schließgeschwindigkeit ab und kann weit über dem normalen Systemdruck liegen. Auch die hierbei entstehenden Druckwellen können in der Rohrleitung mehrfach hin- und herlaufen bevor sie reibungsbedingt zum Erliegen kommen.

2.2. Thermische Druckstöße

Trifft heißer Dampf auf größere Kondensatansammlungen in Folge unzureichender Entwässerung in Rohrleitungssystemen, tritt eine plötzliche Verdampfung ein. Die damit verbundenen Volumenänderungen bewirken teilweise heftige Wasserschläge und damit starke Druckstöße, die weit über dem Betriebsdruck liegen können.

Wasserschläge entstehen auch in Kondensatsystemen, wenn in eine teilweise mit Entspannungsdampf gefüllte Kondensatleitung unterkühltes Kondensat eingespeist wird. Bei der Kondensation des Entspannungsdampfes entsteht örtlicher Unterdruck. Beim anschließenden Zuströmen des Kondensates unter hoher Geschwindigkeit entstehen ebenfalls starke Druckstöße. Wasserschlagrisiken sind somit immer dann gegeben, wenn Kondensat unterschiedlicher Temperatur in einer Sammelleitung gemischt wird.

3. Anlagentechnische Vermeidung von Druckstößen

Die beschriebenen Druckstöße lassen sich in den meisten Fällen durch entsprechende Gestaltung der Anlage vermeiden, wobei hier die Maßnahmen zwischen den hydraulischen und thermischen Druckstößen sehr unterschiedlich sind.

Da bei hydraulischen Druckstößen die Intensität von den Stellzeiten der Absperrarmaturen, den An- und Abfahrzeiten von Pumpen und von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig ist, lassen sich durch eine Veränderung dieser Parameter Druckstöße begrenzen oder auch ganz vermeiden. Im Gegensatz zu den Druckstößen auf der Zulaufseite der Armatur ist die Bildung einer Kavitationsblase nur durch eine wesentlich höhere Schließzeit zu vermeiden, die allerdings in der Praxis meist nicht akzeptabel ist. Lassen sich diese Parameter nicht verändern, kann durch Einsatz von Blasenspeichern oder Windkessel unter Nutzung der Kompressibilität des in diesen Apparaten vorhandenen Gasvolumens ein Druckstoß gedämpft, aber nicht vermieden werden. Weitere Möglichkeiten zur Verhinderung sind in [2] beschrieben.

Die Vermeidung von thermischen Druckstößen in Dampfanlagen kann zunächst einmal durch eine ausreichende Entwässerung erreicht werden. Die richtige Auswahl der Kondensatableiter bei gleichzeitig korrekter Anordnung der Entwässerungs- und Kondensatleitungen ist hierbei entscheidend [3]. Besonders bei der Inbetriebnahme einer noch kalten Anlage ist die Gefahr der Entstehung von Druckstößen besonders groß, da hierbei die größten Kondensatmengen entstehen.

Dipl.-Ing. Erhard Stork, ARI-Armaturen Albert Richter GmbH & Co. KG, D-33756 Schloß Holte-Stukenbrock
Tel.: +49 5207/994-0, Fax: +49 5207/994-297, E-Mail: info.vertrieb@ari-armaturen.com, Internet: <http://www.ari-armaturen.com>

Die erforderlichen Maßnahmen zur Vermeidung der im Zusammenhang mit der Entspannung, Mischung und Weiterleitung des abgeführten Kondensates aus Dampfleitungen entstehenden Druckstöße, sind auch in [3] detailliert beschrieben.

4. Einfluss von Druckstößen auf Ventile

Da sich Druckstöße in Anlagen nicht immer vollständig vermeiden lassen, sollen im Folgenden die Auswirkungen beschrieben werden, die sich auf Armaturen, insbesondere Ventile ergeben. Am Beispiel des Absperrventils "FABA-Plus[®]" sind in Bild 1 die Bereiche gekennzeichnet, auf die bezüglich der Druckstoßbelastungen im Folgenden eingegangen wird.

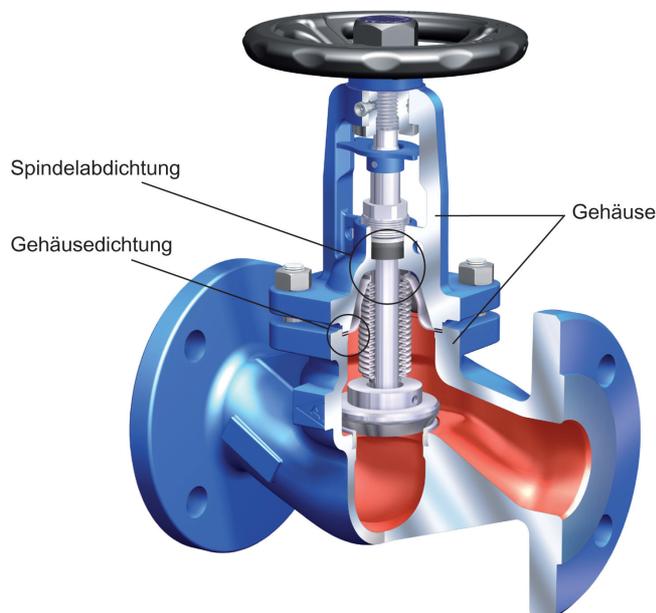


Bild 1:
Absperrventil "FABA[®]-Plus" [4]

4.1. Gehäusefestigkeit

Die Bemessung und das Design des Ventilgehäuses richtet sich nach den Auslegungsparametern Druck und Temperatur zuzüglich der nach den Regelwerken vorgeschriebenen Sicherheiten. Da die in Anlagen auftretenden Druckstöße Werte annehmen können, die deutlich über den zulässigen Werten für die jeweiligen Ventile liegen, kann es zumindest bei spröden Werkstoffen ohne ausgeprägte Streckgrenze (z.B. Grauguss) zum Gehäusebruch kommen. Aus diesem Grund schränken verschiedene Regelwerke den Einsatz dieser Werkstoffe ein [5, 6].

4.2. Gehäusedichtungen

Die statischen Dichtelemente zwischen den einzelnen Gehäuseteilen der Ventile unterliegen der gleichen Druck- und Temperaturbelastung, wie das Gehäuse selbst. Wenn hier die max. Belastungswerte für Druck und Temperatur überschritten werden, kann dieses zu Undichtigkeiten oder sogar zum "Herausblasen" von Teilen der Dichtung führen.

4.3. Spindelabdichtungen

Im Gegensatz zu den statischen Gehäusedichtungen erfahren die Dichtungen für die Spindeldurchführung zusätzlich eine dynamische Belastung durch die Bewegung der Spindel, die axial, radial oder eine Kombination aus beidem sein kann. Handventile werden meist selten betätigt, Regelventile sind dagegen häufig bis ständig im Einsatz. Die beiden klassischen Systeme sind hierbei die Stopfbuchspackung (Bild 2) und die PTFE-Dachmanschette (Bild 3). Sind diese Art von Abdichtungen im Verschleiß schon weit fortgeschritten, kann ein Druckstoß schnell zu einer Undichtigkeit führen, wobei die Stopfbuchspackung dann noch den Vorteil des Nachspannens aufweist.

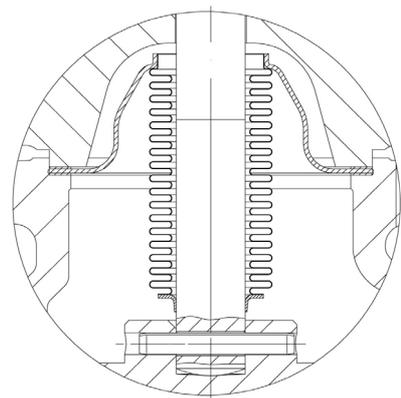
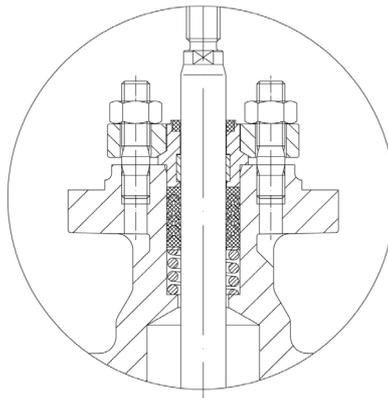
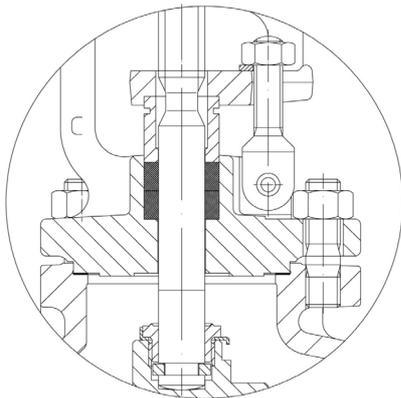


Bild 2: Stopfbuchspackung

Bild 3: Dachmannschetten

Bild 4: Metall-Faltenbalg

Der in Bild 4 gezeigte Edelstahl-Faltenbalg bietet eine dauerhaft dichte und wartungsfreie Spindelabdichtung, da kein Verschleiß auftreten kann. Als Faltenbalgmaterial kommt hierbei vorwiegend ein austenitischer Edelstahl z.B. 1.4541 oder 1.4571 zum Einsatz, der zur Erzielung einer geringen Steifheit sehr dünnwandig ist. Gegenüber Druckstößen ist die Belastbarkeit daher begrenzt, denn es besteht das Risiko einer plastischen Verformung bis hin zum Materialbruch.

5. Konstruktionsmaßnahmen

5.1. Formgestaltung und Werkstoffwahl

Dipl.-Ing. Erhard Stork, ARI-Armaturen Albert Richter GmbH & Co. KG, D-33756 Schloß Holte-Stukenbrock
 Tel.: +49 5207/994-0, Fax: +49 5207/994-297, E-Mail: info.vertrieb@ari-armaturen.com, Internet: <http://www.ari-armaturen.com>

Sind in einer Anlage Druckstöße nicht auszuschließen, ist es zunächst wichtig nur Gehäusewerkstoffe zu verwenden, die eine ausreichende Duktilität aufweisen. Weiterhin hat die Gestaltung der Gehäusebauteile einen entscheidenden Einfluss auf die Standfestigkeit eines Ventils gegenüber Druckstößen. Dieses soll im Folgenden am Beispiel der Optimierung des Bügeldeckels eines Absperrventils vorgestellt werden. In Bild 5 ist die Spannungsverteilung aus der Finite Elemente (FEM) Berechnung des Absperrventils "FABA[®]" gezeigt. Nach der Gestaltoptimierung ergibt sich die in Bild 6 dargestellte günstigere Spannungsverteilung. Dieser im Rahmen der "FABA[®]-Plus"-Entwicklung überarbeitete Bügeldeckel hat bei einer leichten Gewichtsreduzierung eine ca. 60 % höhere Belastbarkeit, die durch Zugversuche nachgewiesen wurde. Somit ist gegenüber Druckstößen eine höhere Sicherheit erreicht worden.

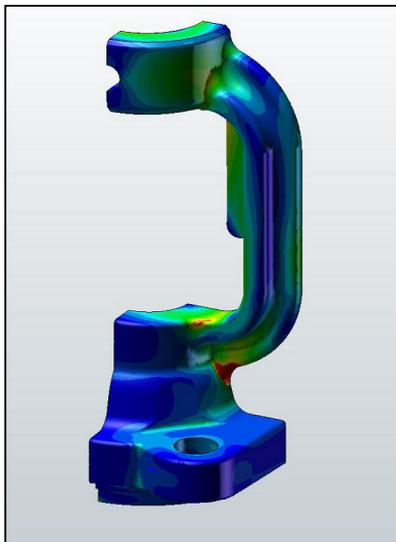


Bild 5: Vor der Optimierung



Bild 6: Nach der Optimierung

5.2. Dichtungswahl und Kammerung

Um eine Beschädigung oder sogar ein Herausblasen von Flachdichtungen bei Druckstößen zu verhindern, ist der Einsatz von "kammprofilierten Dichtungen" sinnvoll. Diese in Bild 7 dargestellten Dichtungen bestehen in der Regel aus einem profilierten metallischen Träger und der Weichstoffauflage. Nach Einbau und Vorspannung der Dichtung wird der Weichstoff, z.B. Graphit oder PTFE in das Trägerprofil gepresst und somit zusätzlich verankert.

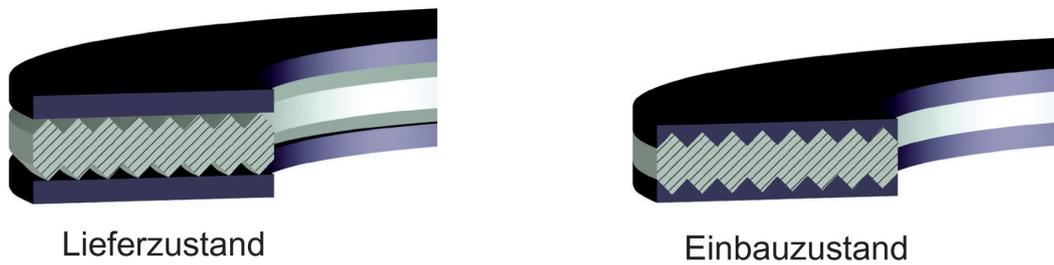


Bild 7: Kammprofilierte Dichtung

Eine weitere Maßnahme ist die Kammerung der Dichtung. Bei dem in Bild 8 dargestellten Absperrventil "FABA[®]-Supra C" ist die Dichtung zwischen Ober- und Unterteil doppelt gekammert, wobei der innen liegende Steg die Dichtung gegen das Medium abschirmt. Eventuelle Druckstöße können die Dichtung gar nicht erst erreichen. Der äußere Steg dient der Abstützung und zusätzlichen Sicherheit nach außen. Aus einer defekten Dichtung kann dann kein "Mediumstrahl" entweichen.

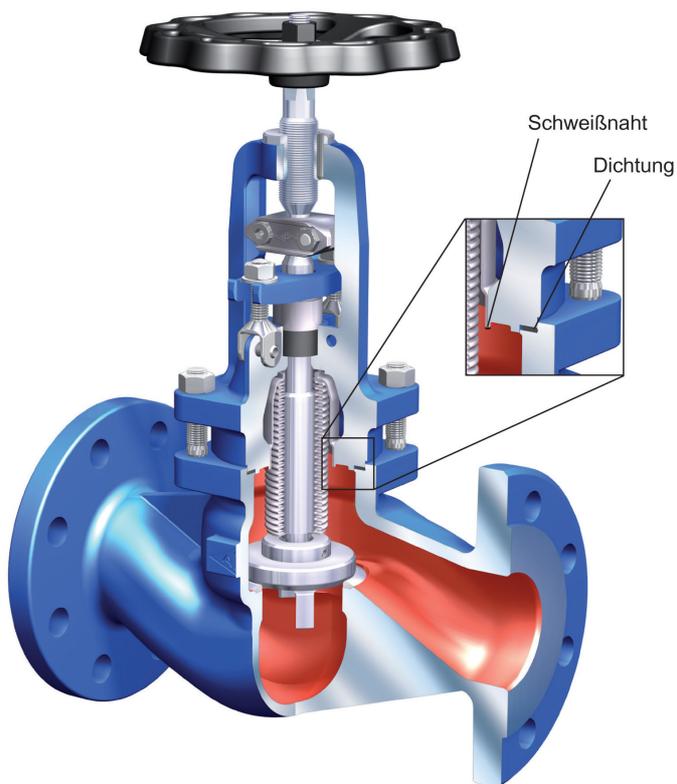


Bild 8:
Absperrventil "FABA[®]-Supra C" [4]

Einen großen Einfluss auf die Standfestigkeit der Gehäusedichtung haben die aus Druckstößen resultierenden Bewegungen der Faltenbalganschlussteile. Werden diese Blechteile durch Klemmen zwischen Flachdichtungen fixiert, können diese dann bei Überschreitung einer Grenze versagen. Aus diesem Grund ist beim "FABA[®]-Supra" (Bild 8) das Faltenbalg-Anschlussteil direkt mit dem Gehäuse-Oberteil verschweißt. Auch die Anzahl der Dichtungen reduziert sich auf eine.

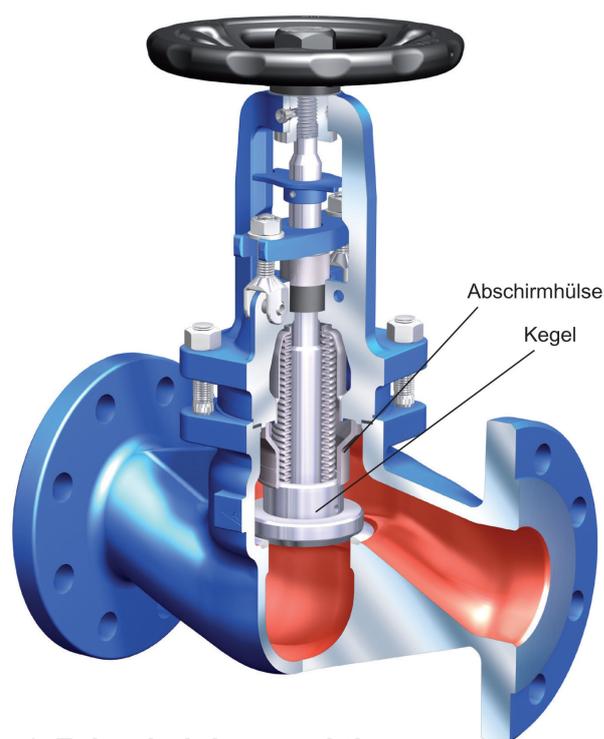


Bild 9:
Absperrentil "FABA[®]-Supra i" [4]

5.3. Faltenbalgkonstruktion

Zur Verhinderung der Beschädigung von Metall-Faltenbälgen durch Druckstöße ist sicherzustellen, dass der Faltenbalg eine ausreichende Druckfestigkeit mit entsprechenden Reserven aufweist. Hier ist zur Erhöhung der Druckbelastbarkeit mehrwandigen Ausführungen der Vorzug gegenüber einer Erhöhung der Wandstärke eines einwandigen Balges zu geben. Die das Medium berührende Wand übernimmt hierbei die Dichtfunktion und die weiteren Wände die Abstützung und damit die Erhöhung der Druckfestigkeit. Da mit einer Vergrößerung der Wandstärke wie auch der Erhöhung der Anzahl der Wände gleichzeitig die Steifheit (Federrate) des Balges steigt, sind diesen Maßnahmen gegen Druckstöße Grenzen gesetzt.

Eine weitere Verbesserung der Druckstoßsicherheit bei Faltenbalgventilen ist durch eine Abschirmung des Balges auf der Mediumsseite zu erzielen. Eine derartige Konstruktion ist in Bild 9 am Beispiel des "FABA[®]-Supra i" dargestellt. Die am Oberteil angeschweißte Abschirmhülse übernimmt hierbei gleichzeitig die Aufgabe der Kegelführung. Eventuelle Druckstöße und Wasserschläge gelangen erst gar nicht bis zum Faltenbalg und hohe Strömungsgeschwindigkeiten können den Kegel nicht zu Schwingungen anregen.

6. Praktische Versuche

Zur Ermittlung der Belastungsgrenzen und der Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen im Ventil dienten umfangreiche Versuche am Fraunhofer UMSICHT - Institut in Oberhausen [7]. Hierbei wurden die beiden Faltenbalg-Absperrventile "FABA[®]-Plus" und "FABA[®]-Supra" härtesten Belastungen durch Druckstöße ausgesetzt.

6.1 Fraunhofer UMSICHT - Institut

Das Fraunhofer UMSICHT - Institut in Oberhausen verfügt über ein ausgedehntes Versuchsfeld, wo hydraulische Druckstöße und Kavitationsschläge realitätsnah erzeugt werden können. Die in Bild 10 dargestellte Anlage besteht aus einem geschlossenen Rohrleitungssystem, wo mittels einer Kreiselpumpe Wasser durch eine insgesamt 225 m lange Leitungsschleife der Nennweite DN 100 im stationären Umlauf gefördert wird. Nach Schließen einer im System eingebauten, besonders schnellschließenden Klappe entsteht durch das abrupte Stoppen der Wassersäule im Zulauf der Klappe ein Druckstoß und hinter der Klappe ein Kavitationsschlag. Diese Druckspitzen durchlaufen das System, wobei durch die Reflexionen eine Reihe von Druckstößen mit abnehmender Intensität entstehen. Durch Variation der Geschwindigkeit des abzubremsenden Flüssigkeitsstroms können gezielt definierte Druckspitzen erzeugt werden, die in dieser Anordnung maximale Werte von ca. 100 bar erreichen.

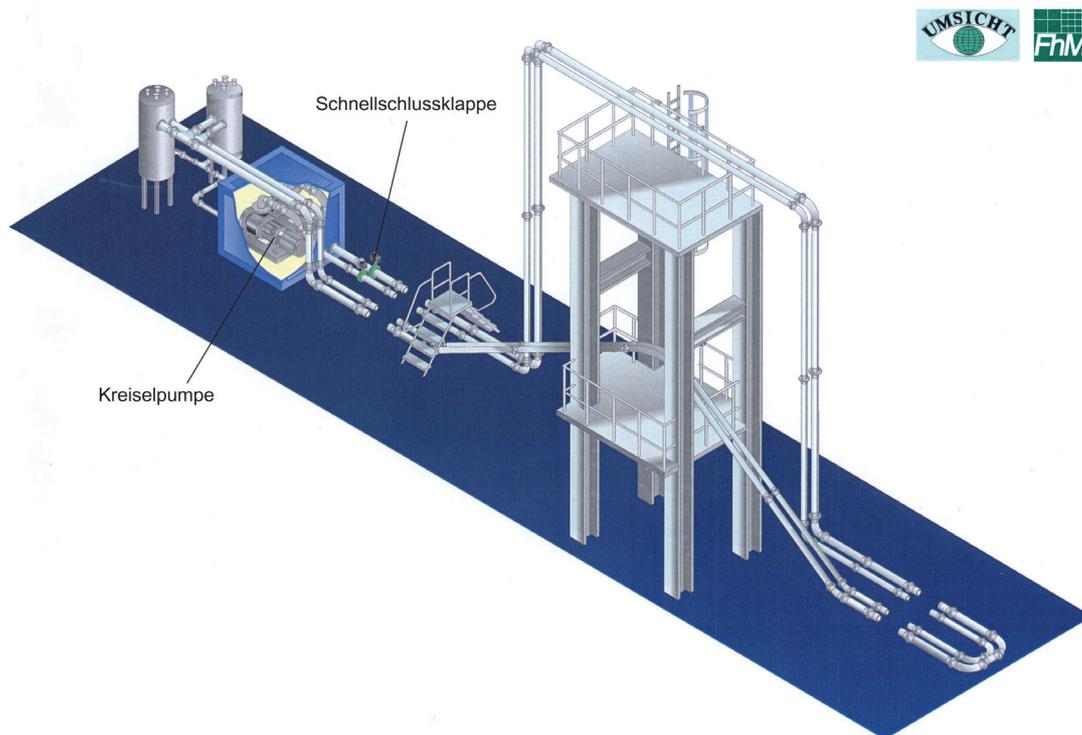


Bild 10: Rohrleitungsversuchsfeld Fraunhofer UMSICHT Institut (Oberhausen) [7]

Durch einen Trick gelingt es, diese maximalen Werte noch einmal zu verdoppeln, indem man die Druckwelle in eine Stichleitung mit einem geschlossenen Ende hineinlaufen lässt (Bild 11). Am Ende wird diese mit der doppelten Intensität reflektiert. Ordnet man an diesem Ende das zu testende Versuchsventil an, wird dieses mit einer in etwa verdoppelten Druckspitze belastet. Aus Bild 12 geht deutlich hervor, dass durch die Verdopplung max. 200 bar erreicht werden.

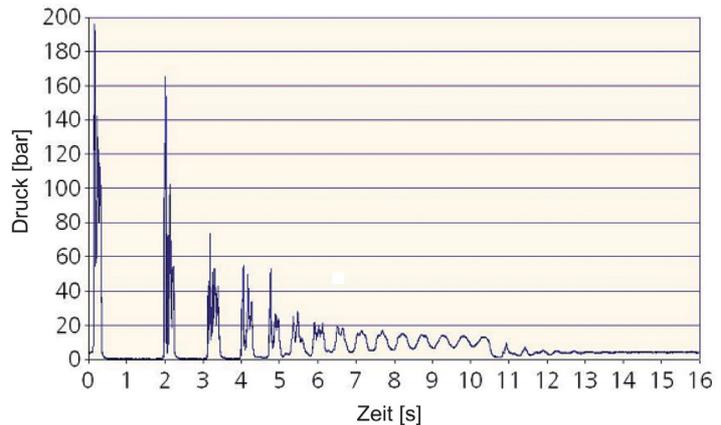


Bild 12: Zeitlicher Verlauf der Druckstöße

Bild 11: Stichleitung zur Verdopplung des Druckstoßes [7]

6.2 Versuche am FABAR[®]-Plus-Ventil

Zunächst wurden Versuche mit einem Standard-Ventil "FABA[®]-Plus" DN 80 PN 40 nach Bild 1 durchgeführt. Bild 13 zeigt das am Leitungsende montierte Ventil. Das zugehörige Video vermittelt optisch wie auch akustisch die hohen Belastungen. Durch schrittweise Erhöhung der Druckstöße, konnte die Grenze bis zur Verformung dieses serienmäßig 2-wandigen Balges ermittelt werden. Bei 100 bar zeigte dieses für max. 40 bar ausgelegte Ventil noch keine negativen Ergebnisse, Balg und Deckeldichtung waren unverändert (Bild 14). Erst ab ca. 130 bar versagte die bei diesem Ventil nur einfach gekammerte Deckeldichtung, der Balg zeigte ab ca. 150 bar die ersten Verformungen.



Bild 13: Versuchsventil am Ende der Stichleitung [7]

Um den verstärkenden Einfluss der zusätzlichen zweiten Faltenbalgwand zu erproben, wurde auch ein 1-wandiger Versuchsbalg (nicht Serie!) getestet. Dieser zeigte schon ab ca. 100 bar sehr starke Verformungen (Bild 15).

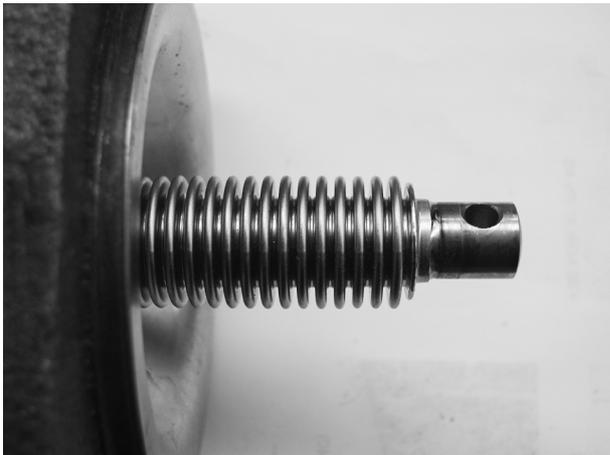


Bild 14:
2-wandiger Serienfaltenbalg (FABA®-Plus)

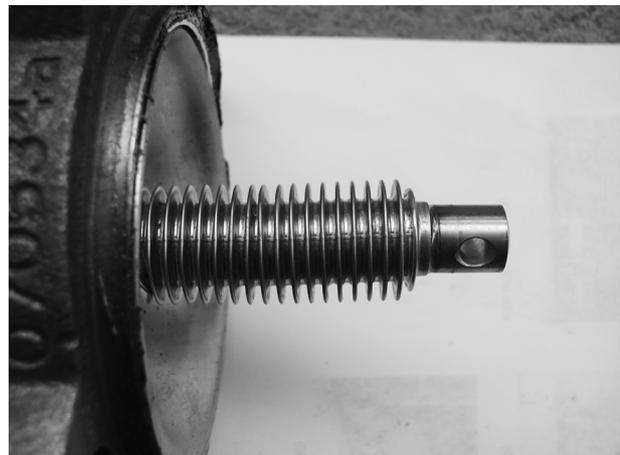


Bild 15:
Verformter 1-wandiger Versuchsbalg

6.3 Versuche am FABA®-Supra-Ventil

Die gleichen Versuche wurden anschließend mit dem extra für diese hohen Belastungsfälle konstruierten Absperrventil "FABA®-Supra" DN 80 PN 40 durchgeführt. Wie in Bildern 8 und 9 ersichtlich, sind die unter 5. beschriebenen Maßnahmen konsequent in dieser Armatur verwirklicht. Auch bei diesem Bügeldeckel wurden bezüglich Werkstoff und Spannungsauslastung die bei Druckstößen auftretenden hohen Kräfte zu Grunde gelegt und die Form entsprechend der FEM-Optimierung gestaltet. Die

Dichtung zwischen Ober- und Unterteil ist in kammprofilierter Ausführung durch innen- und außenliegende Stege eingeschlossen und damit doppelt gekammert. Der verstärkte, doppelwandige Edelstahlfaltenbalg ist mittels Schweißhülse direkt an das Oberteil angeschweißt. Hierdurch entfällt die beim "FABA[®]-Plus" erforderliche zweite Dichtung und die durch Druckstöße entstehenden elastischen Bewegungen des Faltenbalges werden nicht auf die Dichtung übertragen. In Bild 16 ist diese Schweißnaht beim gezeigten Oberteil des FABA[®]-Supra-C deutlich zu erkennen.



Bild 16:
Umspülter Faltenbalg des FABA[®]-Supra-C

Diese Ausführung wurde in einer Reihe von Versuchen Druckstößen von 200 bar unterzogen, wobei keine Verformungen oder Undichtigkeiten feststellbar waren (Bild 17).



Bild 17:
Faltenbalg des FABA[®]-Supra-C PN 40
nach Druckstößen von 200 bar

Durch die in Bild 18 gezeigte zusätzliche Abschirmung mit integrierter Kegelführung ist die maximale Belastbarkeit dieses Faltenbalgventils noch einmal erhöht, da die Druckstöße erst gar nicht auf den Balg treffen.

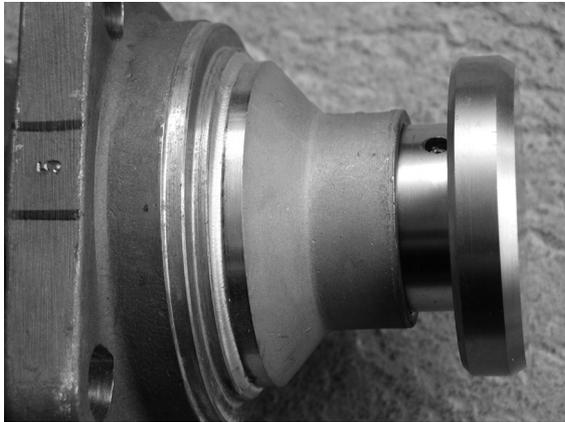


Bild 18:
FABA[®]-Supra-i mit abgeschirmtem Faltenbalg

7. Zusammenfassung

Die in Anlagen auftretenden Druckstöße in medienführenden Rohrleitungen können nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden, wobei die Ursachen vielfach sehr unterschiedlich sind. Im vorliegenden Beitrag wird ausgehend von der physikalisch völlig unterschiedlichen Art der Entstehung über die Möglichkeiten der anlagentechnischen Vermeidung die Auswirkung auf Armaturen, insbesondere Ventilen herausgearbeitet. Es folgt die Vorstellung verschiedener konstruktiver Maßnahmen, die Ventile widerstandsfähiger gegen Druckstöße machen und die Standfestigkeit erhöhen. Der Nachweis der Wirksamkeit der beschriebenen Konstruktionsdetails wird an Hand der vorgestellten am Fraunhofer UMSICHT Institut in Oberhausen durchgeführten umfangreichen Druckstoßversuche erbracht.

8. Literaturhinweise

- [1] A. Dudlik: "Vergleichende Untersuchungen zur Beschreibung von transienten Strömungsvorgängen in Rohrleitungen" Fraunhofer IRB Verlag
- [2] A. Dudlik, S. Schlüter, P.-M. Weinspach: "Druckstöße und Kavitationsschläge in Fernwärmerohrleitungen - Messung, Berechnung und Vermeidung" Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen
- [3] ARI-Armaturen: Praxishandbuch für Dampf und Kondensat
- [4] ARI-Armaturen: Herstellerkatalog 2010 (www.ari-armaturen.com)
- [5] DIN EN 12953-2: Großwasserraumkessel Teil 2: Werkstoffe für drucktragende Kesselteile und Zubehör
- [6] AD 2000 A4: Gehäuse von Ausrüstungsteilen
- [7] Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Osterfelder Straße 3, D-46047 Oberhausen (www.umsicht.fhg.de)