



## Hydrodynamische Auffahrunfälle

### Ein einfaches Prinzip zur Vermeidung von Druckstößen in Rohrleitungen

Horst-Michael Prasser<sup>1</sup>, Andreas Dudlik<sup>2</sup> und Stefan Schlüter<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Sicherheitsforschung

<sup>2</sup>Fraunhofer-Institut Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik UMSICHT

Bremsen quietschen, von hinten heranrasende Fahrzeuge krachen in eine immer weiter anwachsende Wand aus Schrott. Die auftretenden hohen Kräfte falten die stolzesten Karossen zu Knäuel zusammen als wären sie aus Pappe. Glücklicherweise, der da unbeschadet herauskommt. Das passiert bei einem Auffahrunfall, wenn sich dem Verkehr unerwartet ein Hindernis entgegenstellt und abgebremst werden muss – schneller als es die Bremsen hergeben. Physikalisch wird Bewegungsimpuls in Kraft umgesetzt – in Kraft, die die Autos deformiert und so den Schaden verursacht. In Rohrleitungen geht es nicht viel anders zu, wenn eine strömende Flüssigkeit beispielsweise durch ein Ventil schnell gebremst wird. Nur, dass die „Autobahn“ hier

noch viel dichter befahren ist. Eine unvorstellbare Anzahl von Molekülen rast ohne jeden Sicherheitsabstand dahin. Am Absperrventil ist dann Schluss; der Fluss wird gestoppt, und der Druck steigt plötzlich an. Die Moleküle, die von hinten kommen, fahren auf – genauso wie Autos auf der Autobahn. Das Ergebnis ist eine Druckwelle, die sich entgegen der anfänglichen Strömungsrichtung mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet. Je nach Höhe des Drucks können Dichtungen bersten, die Rohrleitung platzt, oder das Ventil wird zerstört. Größere Flüssigkeitsmassen, die plötzlich ihre Geschwindigkeit oder ihre Bewegungsrichtung ändern, rütteln an der Rohrleitung und lassen sie von den Auflagern springen.



### Störfall mit Schadstoffemission

Was dann passiert, ist, je nachdem, was da strömt, entweder ein Chemiestörfall mit Gefahrstoffemissionen in die Umwelt, ein Brand oder, bei glimpflichem Verlauf, einfach nur der Verlust der Anlage und teurerer Produktionsausfall. Aus diesem Grunde suchen Betriebsingenieure, denen die Risiken des schnellen Absperrens von Rohrleitungen bekannt sind, nach pragmatischen Methoden zur Vermeidung von Druckstößen. Das kann zum Beispiel ein verzögertes Schließen beziehungsweise Öffnen von Armaturen oder eine stärkere Auslegung der Leitungen und Halterungen sein.

Doch diese Maßnahmen muten bei genauem Hinsehen eher wie Notlösungen an: Die Verstärkung von Bauteilen verteuert die Anlage, es ist also immer erstrebenswert, den Druckstoß von vornherein zu verhindern. Fest ausgelegte Sicherheitseinrichtungen haben jedoch den Nachteil, dass sie bei wechselnden Betriebsbedingungen nicht immer optimal angepasst sein können. Auch ist es schwierig, alle zu erwartenden Betriebszustände von Anfang an vorherzusehen und die entsprechenden Sicherheitssysteme zu planen. Die Strömungsvorgänge können sich schon bei vergleichsweise einfachen Anlagen durch das Zusammenspiel der Einflussgrößen Leitungsgeometrie (Länge, Profil und Lagerung), Grad der Vernetzung des Leitungssystems und der möglichen Abweichungen vom Normalbetrieb (Pumpenausfall, Notabsperren, Leckagen, Anfahrvorgänge) von Fall zu Fall stark unterscheiden. Daher ist hier Sicherheitstechnik gefragt, die sich von selbst den jeweils vorliegenden Randbedingungen anpasst, das heißt, die adaptiv funktioniert. Außerdem sollten sicherheitstechnische Zusätze möglichst zuverlässig sein, und dazu gehört, dass sie ohne Hilfsenergie auskommen. Daher bieten sich passive und natürlich kostengünstige Systeme zur Verhinderung der „Auffahrunfälle in Rohrleitungen“ an.

Flüssigkeiten lassen sich nicht ruckartig abbremsen: Bringt man die Strömung durch ein Ventil zum Stillstand, entsteht zunächst ein Druckstoß und einige Sekunden später ein Kavitationsschlag. Die Folge sind extrem hohe Belastungen, die auf Absperrarmatur und Rohrleitung wirken.

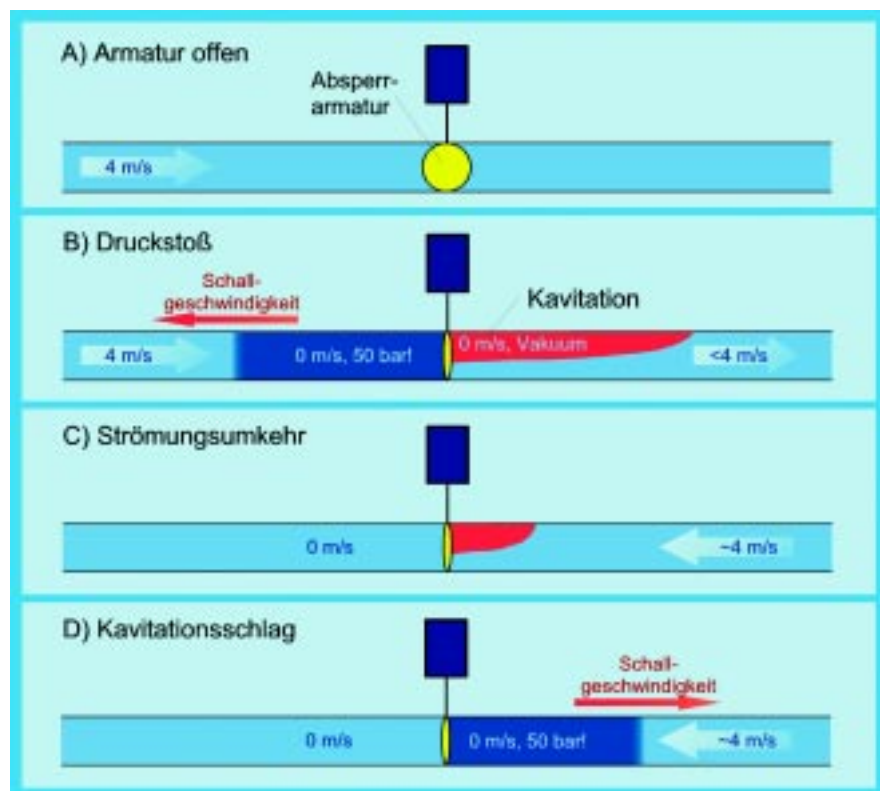
Doch was passiert eigentlich beim Schließen eines Ventils? – Es gibt deutliche Unterschiede im Verhalten der Flüssigkeit in der Rohrleitung vor und hinter der Absperrarmatur. Während sich das Abbremsen vor dem Ventil in kurzzeitigem Druckanstieg äußert, kommt es hinter der Armatur erst einmal zu einem Druckabfall. Nehmen wir ein Beispiel: Vor der Armatur kann der Druck in einer Stahlleitung, in der Wasser bei Umgebungstemperatur mit vier Metern pro Sekunde fließt, durch schnelles Absperrern auf fünfzig Bar ansteigen. Die resultierenden Kräfte, die auf einen Festpunkt wirken, können dabei die normalen Gewicht- und Reibungskräfte durchaus um das 100-fache übersteigen. Hinter der Absperrstelle fließt die Transportflüssigkeit, die das Ventil schon passiert hat, aufgrund ihrer Trägheit zunächst annähernd mit Ausgangsgeschwindigkeit weiter. Dabei sinkt der Druck hinter dem Ventil rasch ab. Wenn dann der Siededruck unterschritten wird, bilden sich großräumige, expandierende Dampfblasen. Der Druck hinter der Absperrstelle (Sättigungsdruck der Flüssigkeit) ist nun kleiner als am Ende der Leitung. Dadurch wird die Flüssigkeitsströmung verzögert und schließlich wieder zurück in Richtung

der Absperrstelle beschleunigt. – Es tritt Strömungsumkehr ein. Die vorher gebildeten Dampfblasen kondensieren schnell, die Flüssigkeit prallt auf die geschlossene Armatur. Das Resultat ist ebenfalls ein Druckstoß, der in diesem Fall Kavitationsschlag genannt wird.

Die Wirkung des Kavitationsschlages stromabwärts ist vergleichbar mit der des Druckstoßes stromaufwärts der Armatur, nur tritt der Kavitationsschlag meist erst einige Sekunden nach dem Schließen der Armatur auf. Da die beiden Arten von Druckstößen verschiedene Ursachen haben, mussten wir demzufolge auch unterschiedliche Methoden zu ihrer Vermeidung finden.

Ein in der Praxis durchaus übliches Herangehen, um Druckstöße zu verhindern, beruht auf der Verzögerung des Schließvorgangs der Armatur. Dazu kann man die Armatur mit einem Dämpfer ausstatten, der es ermöglicht, die Schließzeit fest einzustellen. Damit wird die Armatur langsam genug geschlossen, und der Druckstoß auf der Zulaufseite verschwindet.

Doch die erforderliche Schließzeit steigt mit zunehmender Länge der Zuleitung und mit steigender Fördermenge an und



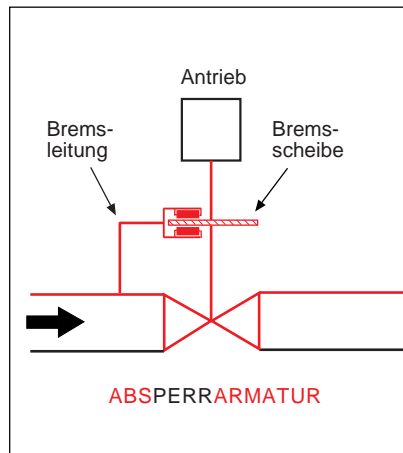


ist zudem noch von einigen weiteren Faktoren abhängig. Eine einmal eingestellte Schließzeit ist deshalb nicht immer optimal. Man denke an ein System mit mehreren Tanks, aus denen das Medium über unterschiedlich lange Leitungen zu einer Anlage oder einem Tankschiff gefördert wird – einmal über eine kurze, ein anderes Mal über eine lange Zuleitung. Um in allen Fällen Druckstöße ausschließen zu können, muss die sich aus der größten Zuleitungslänge ergebende Schließzeit eingestellt werden. Wenn man dann auf einen Behälter mit kürzerer Verbindungsleitung umschaltet, ist die Schließzeit unnötig groß. Bei einer Notabspernung würde so noch deutlich mehr Flüssigkeit durch die Leitung strömen, als bei einem optimierten Schließvorgang. Umgekehrt würde eine auf eine zu kleine Strömungsgeschwindigkeit ausgelegte Armatur bei Erhöhung der Fördermenge den Druckstoß nicht mehr verhindern.

### Bremse stoppt Flüssigkeit

Wir haben das Problem gelöst, indem wir die Armatur – in unserem Fall handelte es sich um eine Schnellschlussklappe – mit einer Scheibenbremse ausgestattet haben. Die Scheibe wirkt direkt auf die Antriebswelle der Klappe. Der Bremszylinder wird nun mit der Rohrleitung vor der Armatur verbunden. Steigt der Druck in der Leitung an, wirkt die Druckerhöhung durch die Direktverbindung zwischen Zylinder und Leitung unmittelbar auf den Bremszylinder und die Bremscheibe. Auf diese Weise löst der Druckanstieg im Strömungsmedium selbst den Bremsvorgang aus. Wenn die Armatur beginnt, sich zu schließen, geschieht das durch eine Drehbewegung der Antriebswelle. Genau diese Bewegung wird von der Scheibenbremse gestoppt, wenn der Druck in der Rohrleitung zu hoch wird. Erst wenn der Druck wieder unter den Ansprechdruck der Bremse abfällt, setzt sich der Schließvorgang fort. Die neue Armatur wirkt somit ähnlich wie das Anti-Blockier-System im Auto – deshalb haben wir sie ABS-Armatur® genannt.

Eine Schnellschlussklappe mit Bremse haben wir in einer Versuchsleitung des Fraunhofer-Instituts Umwelt-, Sicherheits-,

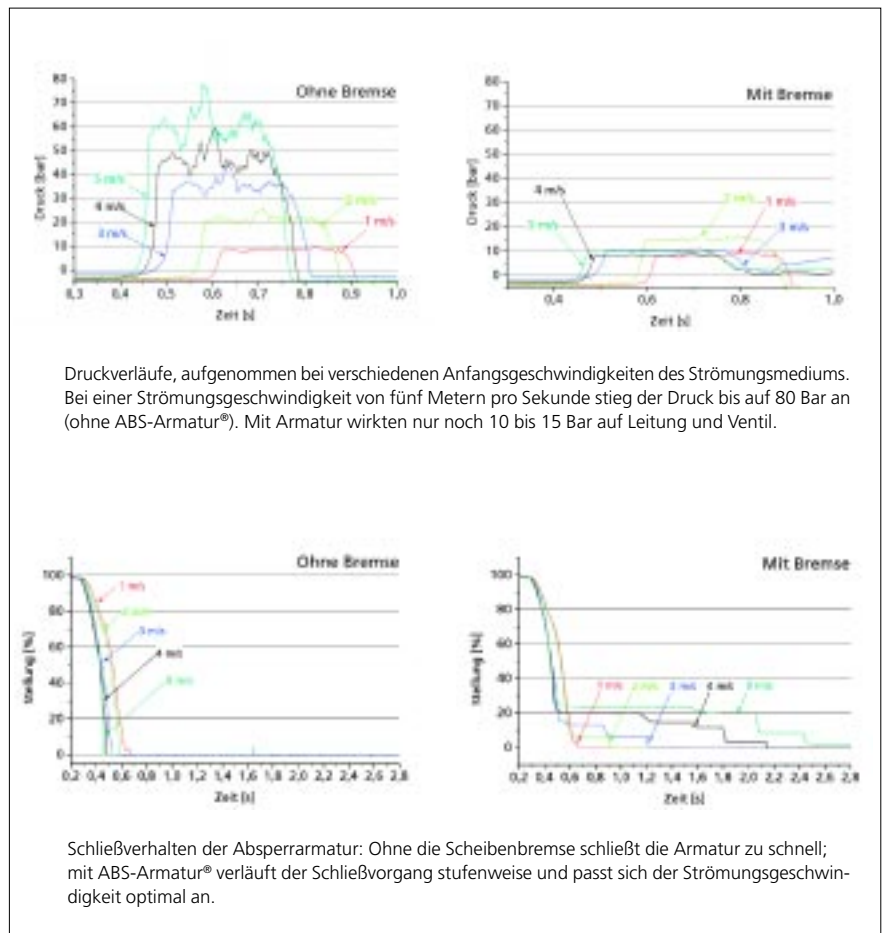


Die ABS-Armatur®  
– eine Absperrklappe mit Scheibenbremse.

Energietechnik UMSICHT in Oberhausen erprobt. Die Rohrleitung war insgesamt etwa 200 Meter lang, als Modellflüssigkeit haben wir Wasser bei Umgebungstemperatur verwendet. Bei den Ex-

perimenten zeigte sich, dass die Armatur tatsächlich in der Lage ist, sich wechselnden Verhältnissen in der Rohrleitung optimal anzupassen, sich also adaptiv zu verhalten. Sie begrenzt den Druck nahezu unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit auf einen Wert zwischen zehn und fünfzehn Bar. Bei Vergleichsversuchen mit abgeschalteter Scheibenbremse haben wir hingegen die typischen Druckstöße beobachtet, deren Amplitude mit zunehmender Geschwindigkeit anwächst.

Die Wirkungsweise wird deutlich, wenn man den Schließvorgang betrachtet. Bei abgeschalteter Bremse dauert das Schließen der Klappe nur etwa eine halbe Sekunde. Mit aktivierter Bremse fährt die Armatur stufenweise zu. Der Schließvorgang passt sich automatisch den Strömungsverhältnissen an, die Leitung wird jeweils in der kürzest möglichen Zeit abgesperrt. – Und dabei benötigt die Bremse keinerlei Hilfsenergie.



Druckverläufe, aufgenommen bei verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten des Strömungsmediums. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von fünf Metern pro Sekunde stieg der Druck bis auf 80 Bar an (ohne ABS-Armatur®). Mit Armatur wirkten nur noch 10 bis 15 Bar auf Leitung und Ventil.

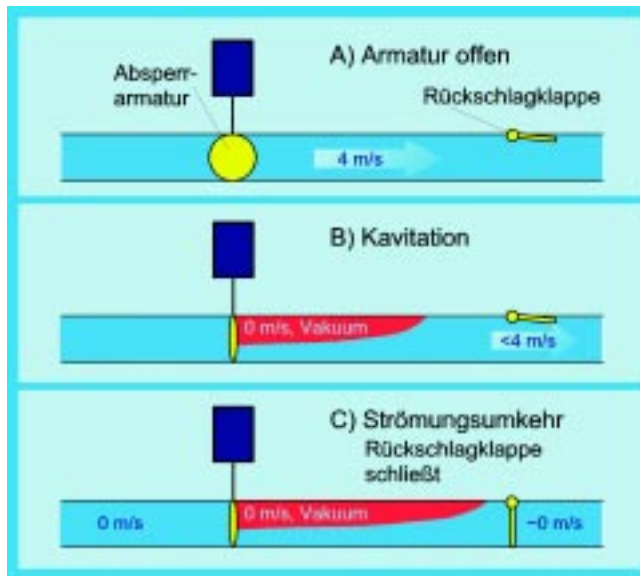
Schließverhalten der Absperrarmatur: Ohne die Scheibenbremse schließt die Armatur zu schnell; mit ABS-Armatur® verläuft der Schließvorgang stufenweise und passt sich der Strömungsgeschwindigkeit optimal an.

Schließverhalten und Wirkung der ABS-Armatur®.





Eine einfache Rückschlagklappe verhindert den Kavitationsschlag. Im Moment der Strömungsumkehr, fällt die Klappe und schließt die Vakuumblase ein. Anschließend muss die Blase nur noch langsam aufgefüllt werden.



### Kavitationsschläge verhindern

Allerdings lässt sich mit der ABS-Armatur® allein nur der Druckstoß vor der Absperrstelle, nicht aber der Kavitationsschlag vermeiden. Das liegt an der großen Lebensdauer der Kavitationsblase. Sie kollabiert erst, nachdem die Flüssigkeitssäule hinter der Armatur durch den Gegendruck, der am Leitungsende anliegt, abgebremst wird und sich die Strömungsrichtung umkehrt. Der Druckanstieg tritt auf, wenn die Blase aufgebraucht und die Flüssigkeit auf die geschlossene Armatur prallt.

Doch auch hier haben wir eine Möglichkeit gefunden, um den Kavitationsschlag zu verhindern: In einigem Abstand hin-

ter der eigentlichen Absperrarmatur haben wir eine Hilfsarmatur angeordnet, die genau dann schließt, wenn das Strömungsmedium gerade seine Richtung ändert. Dabei tritt kein Druckanstieg auf, da die Geschwindigkeit in diesem Moment nahezu Null ist. Nachfolgend kann das Medium jedoch auch nicht mehr in Richtung auf die geschlossene Absperrarmatur beschleunigt werden. Die Kavitationsblase bleibt zwischen beiden Armaturen eingeschlossen – Kavitationsschlag ade.

Doch Vorsicht! Man darf natürlich die Leitung in diesem Zustand nicht einfach wieder in Betrieb nehmen. Öffnet man die Absperrarmatur bei vorhandener Blase, kommt es zu einem heftigen Konden-

sationsschlag. Man löst dieses Problem jedoch leicht, indem man den Leitungsabschnitt zwischen den Armaturen „sanft“ auffüllt. Das kann zum Beispiel durch eine kleine Überströmleitung geschehen oder indem man die Absperrarmatur sehr langsam öffnet.

Und auch diese Lösung ist denkbar einfach: Als Hilfsarmatur bietet sich eine Rückschlagklappe an. Sie lässt das Strömungsmedium in der normalen Förderichtung durch und schließt von selbst, wenn sich die Strömung umkehrt. Damit haben wir auch zur Verhinderung der Kavitationsschläge ein passives System gefunden – es kommt ganz ohne Steuerung und Hilfsenergie aus. Natürlich muss man bei der Auslegung aufpassen. Denn wenn der Abstand zwischen den beiden Armaturen nicht richtig berechnet ist, breitet sich die Kavitationsblase in der Rohrleitung bis hinter die Rückschlagklappe aus. Dann tritt dort später ein so genannter sekundärer Kavitationsschlag auf. – Die Bedeutung einer theoretischen Modellierung von Strömungsprozessen in Rohrleitungen ist also offensichtlich.

Mit Rückschlagklappe und ABS-Armatur® haben wir ein System entwickelt und patentiert, mit dem eine Rohrleitung schnell und ohne gefährliche Belastungen abgesperrt werden kann. Sowohl einzeln für sich als auch in Kombination stellen beide Verfahren passive und adaptive Sicherheitssysteme gegen „hydrodynamische Auffahrunfälle“ in Rohrleitungen dar.

### Literatur

Prasser, H.-M.; Schlüter, S.; Dudlik, A.: Anordnung zur Verhinderung unerwünschter Drücke beim Absperrern oder Drosseln der Flüssigkeitsförderung in einer Rohrleitung, Patent DE 199 40 096 C2, Offenlegungsschrift DE 199 40 096 A1, Europäische Patentanmeldung EP 1079161 A2.

Prasser, H.-M.; Schlüter, S.; Dudlik, A.: Anordnung zur Verhinderung eines Kavitationsschlages beim schnellen Absperrern einer zum Transport von Flüssigkeiten genutzten Rohrleitung, Patent DE 198 15 242 A 1.