

## III/5 Methoden zur Vermeidung von Druckstößen und Kavitationsschlägen in Rohrleitungssystemen

Dr.-Ing. Andreas Dudlik, Dr. Stefan Schlüter, Prof. Dr.-Ing. Hans Fahlenkamp  
und Dipl.-Ing. Jörg Alt

### Kurzfassung

In diesem Beitrag werden drei Methoden zur Vermeidung von Druckstößen und Kavitationsschlägen in Rohrleitungssystemen vorgestellt und im Hinblick auf den Einsatz in der betrieblichen Praxis diskutiert:

1. Die *fest eingestellte* Verringerung der Schließgeschwindigkeit der Absperrarmatur,
2. die *fluidgesteuerte* Verringerung der Schließgeschwindigkeit der Absperrarmatur sowie
3. der Einsatz von gasgefüllten Druckbehältern.

Der Schwerpunkt in diesem Beitrag liegt auf der Untersuchung von Blasenspeichern (weitere Methoden s. [5-9]). Alle drei Verfahren werden an der Versuchsanlage von Fraunhofer UM-SICHT experimentell untersucht und mit fluiddynamischen Berechnungsprogrammen simuliert. Je nach der Art der Anforderung (kürzeste Schließzeit, geringste Druckschwankungen, kostengünstigstes Verfahren) können die drei Verfahren – einzeln oder in Kombination – ein breites Spektrum unterschiedlicher Betriebs- und Systemparameter abdecken.

### Einführung

Hervorgerufen durch eine plötzliche Änderung der Strömungsgeschwindigkeit treten in Rohrleitungssystemen Druckwellen („Druckstöße“) auf, deren Amplituden wesentlich höher sein können als die im stationären Betrieb vorliegenden Fluiddrücke. Diese sich mit hoher Geschwindigkeit von etwa 900-1500 m/s längs der Rohrleitung ausbreitenden Druckwellen entstehen hauptsächlich durch folgende Regel- und Stelleingriffe bzw. durch Störungen des bestimmungsgemäßen Betriebs:

- Einstromvorgänge in Leitungen (bei der Inbetriebnahme),
- Ausfall von Pumpen/Kompressoren,
- Leckagen, Öffnungs- und Schließvorgänge von Armaturen,
- schnelle Druckentlastung von Behältern,
- schnelle Durchfluss-Regelungsvorgänge oder
- Rohrleitungsbruch bzw. Flanschabriss.

Die Auswirkungen der durch diese Szenarien erzeugten Druck- und Kraftspitzen sind seit langem bekannt und in der Literatur beschrieben – von Durchsatzschwankungen bei Abfüllvorgängen in der Getränkemittelindustrie, Schlägen in Wasserleitungen über Regelungsprobleme kompressorbetriebener Gasleitungen bis hin zu elastischen und plastischen Verformungen von Rohrunterstützungen und zu Leitungsbrüchen [1].

Die Analyse der Ursachen ist dagegen in der Regel aufwendig, da die experimentelle Untersuchung der Strömungsvorgänge aufgrund der hochfrequent zu erfassenden Messgrößen Druck, Kraft, Geschwindigkeit und Phasenverteilung erst in letzter Zeit mit vertretbarem Aufwand technisch möglich geworden ist [2]. Dieser Aufwand richtet sich nach der Komplexität der in der Rohrleitung auftretenden Strömungsvorgänge (Ein-, Zwei- bzw. Mehrphasenströmungen).

Bei *einphasig* durchströmten, flüssigkeitstransportierenden Rohrleitungen kann die maximal auftretende Druckhöhe mit Hilfe der klassischen Joukowsky-Gleichung (z. B. in [3]) abgeschätzt werden. Danach ergibt sich die Druckänderung aus der Dichte  $\rho$  des strömenden Fluids, der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit  $a$  und der Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  des strömenden Fluids zu

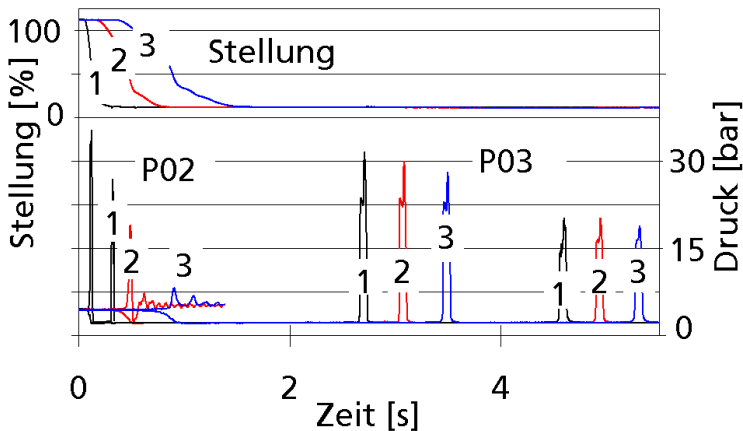
$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta v. \quad (1)$$

Ein Zahlenbeispiel: In einer 1 km langen Stahlleitung der Nennweiten DN 250, die stationär mit 3 m/s durchströmt wird, führt ein schnelles Absperren mit einer Absperrklappe innerhalb von ca. 30 s zu einem Druckanstieg von 30 bar.

## Die Methoden zur Vermeidung

### 1. Fest vorgegebene Armaturen-Schließgeschwindigkeit

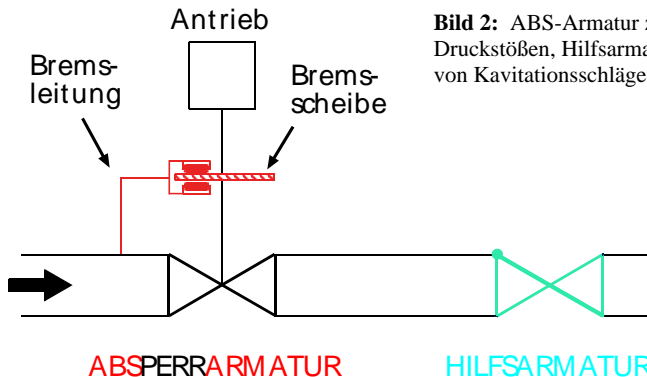
Das Verfahren der fest programmierten bzw. vorgegebenen Schließgeschwindigkeit ist preisgünstig; es kann etwa per SPS fest vorgegeben werden. Der Vorgang ist in **Bild 1** dargestellt. Hierbei wird Wasser von einem Vorratsbehälter durch eine Rohrleitung DN 100 zu einem Pufferbehälter transportiert (vgl. **Bild 5**). Der Druckstoß stromaufwärts der Absperrklappe (**Bild 1**, P02) wird durch eine Erhöhung der Schließzeit von 0,1 auf ca. 1 s fast vollständig gedämpft. Das Verfahren kann jedoch nicht immer zweckmäßig eingesetzt werden. Oft werden schnelle Schließgeschwindigkeiten gefordert (z. B. bei Schiffsbefüllungen, Notabsperrarmaturen); andererseits können sich die Einflussparameter ändern (stationäre Flüssigkeitgeschwindigkeiten, Medieneigenschaften infolge von Temperaturschwankungen). Darüber hinaus können mit einer Einstellung, die Druckstöße sicher vermeidet, nicht ebenfalls die Kavitationsschläge stromabwärts der Absperrarmatur (**Bild 1**, P03) hinreichend gedämpft werden. Hierzu können weitaus größere Schließzeiten erforderlich sein. Die bestimmenden Parameter sind neben der Armaturencharakteristik die Leitungslänge vor bzw. hinter der Absperrarmatur.



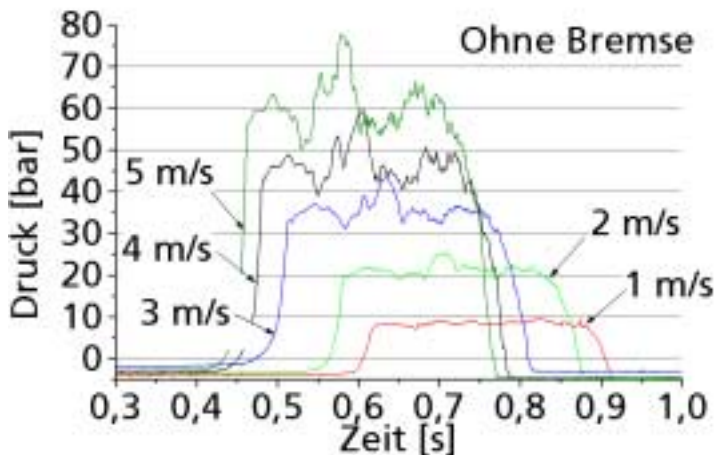
**Bild 1:** Zur Vermeidung von Druckstößen und Kavitationsschlägen mittels (vor)programmierter Schließgeschwindigkeit der Absperrarmatur

## 2. Fluidgesteuerte Armaturen-Schließgeschwindigkeit

Das zweite Verfahren besteht in einer Anordnung, mit der ein Schließ- oder Drosselvorgang der Absperrarmatur unabhängig von wechselnden Anlagen- und Betriebsbedingungen der Rohrleitung in kürzest möglicher Zeit erfolgt, ohne dass dabei ein vorgegebener Druck in der Rohrleitung überschritten wird. Die Anordnung soll ohne eine Einspeisung von Luft oder anderen Gasen in die Rohrleitung auskommen, um die Verunreinigung der Förderflüssigkeit auszuschließen. Aufwendigere Einrichtungen, wie Windkessel, komplizierte Regeleinrichtungen für die Schließ- bzw. Drosselarmatur und umfangreiche Installationen für die Umlenkung der Transportflüssigkeit sollten vermieden werden. Die Lösung ist in **Bild 2** dargestellt (vgl. auch [4]).



**Bild 2:** ABS-Armatur zur Vermeidung von Druckstößen, Hilfsarmatur zur Vermeidung von Kavitationsschlägen (vgl. [4])



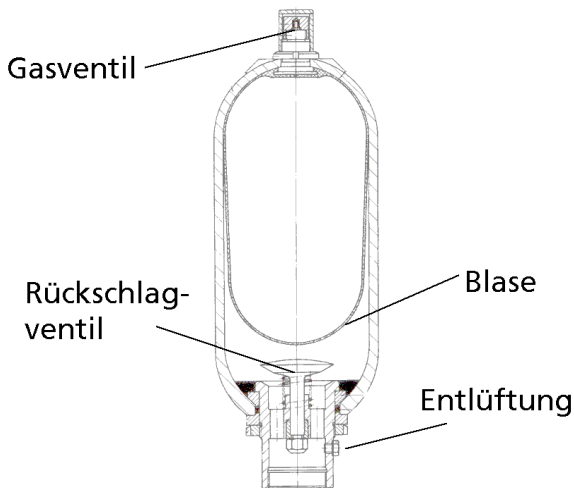
**Bild 3:** Druck P02 stromaufwärts der Armatur in Position 2 (vgl. **Bild 2**) bei den Strömungsgeschwindigkeiten 1, 2, 3, 4 und 5 m/s und einer mittleren Schließzeit von ca. 350 ms ohne und mit ABS-Armatur (vgl. [4])

Wird die Absperrarmatur aus **Bild 3** schnell geschlossen, so baut sich infolge der Verzögerung der Flüssigkeitssäule eine Druckspitze vor der Armatur auf. Dieser Druck wird in eine angeschlossene Bremsleitung eingeleitet und wirkt dann auf den Bremszylinder des Bremssattels. Die Bremsbacken des Bremssattels bremsen die Rotationsbewegung der Scheibe ab. Damit wird eine weitere Schließbewegung der Klappe verhindert und ein weiterer Druckanstieg ist ausgeschlossen. Bei Druckabfall lösen sich die Beläge von der Bremsscheibe und die Schließbewegung wird fortgesetzt. Stromabwärts der Absperrarmatur verhindert die Anordnung einer Rückschlagklappe den Dampfblasenkollaps [4]. Dadurch werden Kavitationsanschläge vermieden.

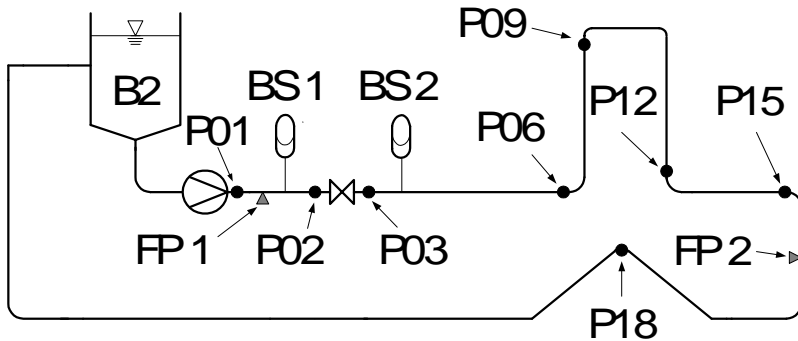
**Bild 3** zeigt den zeitlichen Verlauf des Drucks P02 (stromaufwärts, vgl. **Bild 1**). Die linke Abbildung zeigt die maximalen Druckamplitude ohne Bremssystem, die recht den Druckverlauf unter Zuschaltung der hydraulischen Bremse. Die maximale Druckamplitude beträgt bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 5 m/s fast 80 bar und bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s fast 10 bar. In der rechten Abbildung beträgt der maximale Druck nur noch 10 - 15 bar, der bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 2 m/s erreicht wird. Das entspricht einer Verminderung um rund 80 %. Ursache für den erhöhten Druck bei einer Geschwindigkeit von 2 m/s ist vermutlich eine mangelhafte Entlüftung des Bremssystems.

### 3. Gasgefüllte Druckbehälter

Das dritte Verfahren besteht in der Installation von gasgefüllten Druckbehältern in das eigentliche Rohrleitungssystem. Hierbei ist es von Vorteil, den direkten Austausch von Gas mit der Flüssigkeit zu vermeiden, um durch Löslichkeitsvorgänge nicht Gas nachfüllen zu müssen. Eine Lösung besteht in der Anwendung von sog. Blasenspeichern (**Bild 4**). Das dämpfende Gas (z. B. Luft) wird – in Abhängigkeit vom stationären Rohrleitungsdruck – in eine flexible Blase gefüllt. Das Rückschlagventil verhindert, dass die Membran beim Befüllen oder bei Drucksinken in der Rohrleitung im Betrieb durch zu hohe Ausdehnung verletzt wird. Der Behälter wird auf die Rohrleitung mit direktem Kontakt zum Transportmedium in die Nähe der Druckstoßquelle (z. B. Absperrarmatur) montiert (vgl. **Bild 5**, Einbauposition 1).

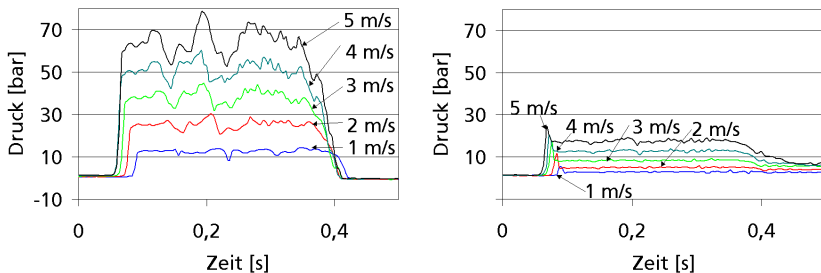


**Bild 4:** Schematischer Aufbau von Blasenspeichern



**Bild 5:** Vereinfachtes R&I-Fließbild mit der exzentrischen Absperrrklappe an Messposition 1

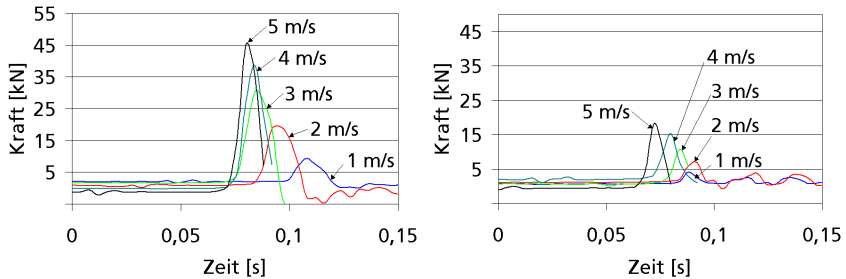
Das Leitungssystem für die Untersuchungen zu diesem Beitrag ist in **Bild 5** schematisch dargestellt. Eine Pumpe fördert Wasser aus einem Behälter über eine Versuchsleitung (Länge: ca. 220 m) im Kreislauf. Der Versuch beginnt, wenn die Armatur bei laufender Pumpe schließt. Nach ca. 10 s wird die Klappe wieder geöffnet. Mit einer schnellen Messdatenerfassung werden Druck und Kraft an unterschiedlichen Stellen im Leitungssystem in hoher zeitlicher Auflösung (ca. 5 kHz) erfasst. Die axiale Position der Armatur wird von in **Bild 4** dargestellten Position 1 (Länge der Leitung stromaufwärts der Armatur: ca. 17 m) variiert (z. B. Position 2 – Länge der Rohrleitung stromaufwärts der Absperrrarmatur: ca. 200 m).



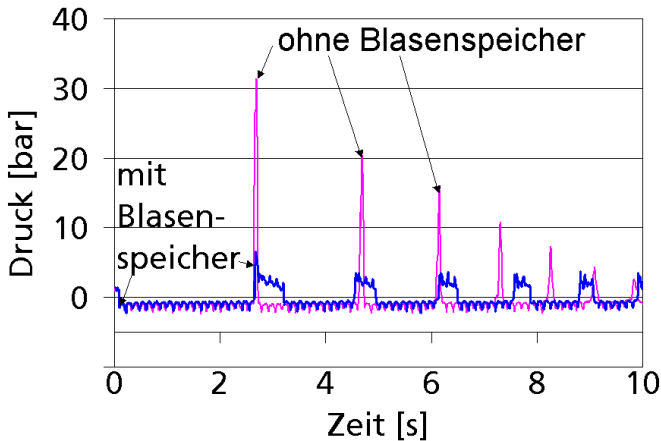
**Bild 6:** Druck P02 bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1, 2, 3, 4 und 5 m/s; exzentrische Klappe an P02; ohne bzw. mit Blasenspeicher 1 (Gasblasenvolumina: 48, 45, 45, 43 und 41 l)

In **Bild 6** sind die zeitlichen Druckverläufe bei einem Armaturenschnellschluss (Absperrrklappe an Position 2) dargestellt. Parameter ist die stationäre Strömungsgeschwindigkeit des Leitungsmediums. Ausgehend von den stationären Betriebsdrücken von ca. 1-2 bar werden Druckspitzen bis zu 80 bar gemessen. Man erkennt, dass die Druckstöße bei Einsatz des Blasenspeichers 1 (Einbau 700 mm stromaufwärts der Armatur) stark gedämpft werden.

Analog wird der Kräfteintrag in Umlenkungen und Festpunkte um 50-70 % reduziert (vgl. **Bild 7**). In dieser Abbildung ist der Kräfteintrag in den Festpunkt 1 (ca. 10 m stromaufwärts der Klappe an Position 1) dargestellt. Zum Zwecke der Übersicht sind die Daten für 3-5 m/s im linken Bild nicht vollständig aufgetragen.



**Bild 7:** Axialkrafteintrag in den Festpunkt 1 bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 1, 2, 3, 4 und 5 m/s; exzentrische Klappe an POS 1; ohne bzw. mit Blasenspeicher (Gasblasenvolumina: 48, 48, 38, 30 und 25 l)



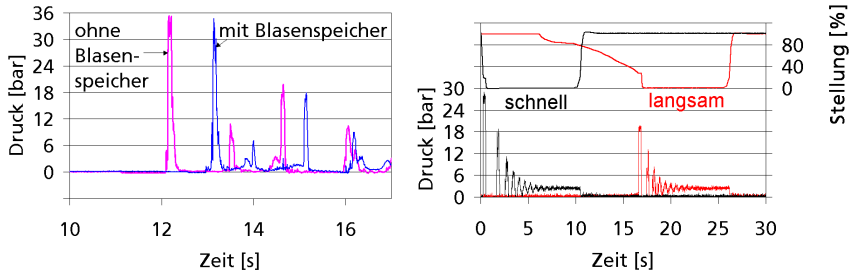
**Bild 8:** Druck P03 nach einem Armaturenschnellschluss bei einer stationären Strömungsgeschwindigkeit von 3 m/s; exzentrische Klappe an POS 1; mit Blasenspeicher (Gasblasenvolumen: 39 l)

Die Kavitationsschläge, die im Leitungsteil stromabwärts der Absperrklappe entstehen, werden ebenfalls stark gedämpft (vgl. **Bild 8**).

### Einsatzbedingungen

#### 1. Fest vorgegebene Armaturen-Schließgeschwindigkeit

Die Methode bedingt stabile Betriebsbedingungen. Änderungen der Flüssigkeitgeschwindigkeit, der Leitungslänge sowie des Armaturentyps (Widerstandscharakteristik) können die Dämpfung erheblich verschlechtern. Als Beispiel ist in **Bild 9** rechts der zeitliche Druckverlauf an o. g. Leitungssystem mit einer exzentrischen Absperrklappe DN 50 an Position 2 dargestellt. Obwohl der Schließvorgang ein Vielfaches der Reflektionszeit der Druckwelle (hier: ca. 0.4 s) beträgt, erhält man aufgrund der hierfür ungünstigen Armaturencharakteristik beachtliche Druckstöße.



**Bild 9: Links:** Druck P09 bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 3 m/s; exzentrische Klappe an POS 1; mit Blasen-speicher (Gasvolumen: 39 l); **Rechts:** Druckstöße bei exzentrischer Klappe DN 50, unterschiedliche Schließzeiten

## 2. Fluidgesteuerte Armaturen-Schließgeschwindigkeit

Dieses Verfahren ist weitestgehend unabhängig von wechselnden Betriebs- und Systemparametern. Es wird immer die kürzest mögliche Schließzeit erreicht (ABS-Eigenschaft, vgl. [4]). Extrem kurze Schließzeiten (< 100 ms) können derzeit jedoch nicht erreicht werden. Bei der Dämpfung von Kavitationsschlägen ist zu beachten, dass eine ausreichende Entfernung der Rückschlagklappe zur Absperrarmatur vorhanden sein muss.

## 3. Gasgefüllte Druckbehälter

Der große Vorteil liegt darin, dass kleinste Schließzeiten bei gleichzeitig kleinen Druckstößen realisiert werden können. Nachteilig sind die vergleichsweise hohen Investitionskosten. Zu beachten ist neben der ausreichenden Dimensionierung, dass die Apparate in die Nähe der Druckstoßquelle montiert werden. Dies wird an **Bild 10** verdeutlicht. Beim o. e. Absperr-szenario bildet sich eine zweite Dampfblase auf der Rohrbrücke aus, die beim Wiederöffnen kollabiert. Trotz Blasen-speicher kann hier keine Reduzierung des Kavitationsschlages erreicht werden, da der Abstand zwischen Brückenhochpunkt und Blasen-speicher ca. 45 m beträgt.

## Literatur

- [1] Raschke, E., Seelinger, A., Sperber, A., Straßburger, A.: „Simulation des instationären hydraulischen Verhaltens verfahrenstechnischer Anlagen mit langen Rohrleitungen“, CIT 66 (1994) 5, S. 652-660.
- [2] Dudlik, A.: Vergleichende Untersuchungen transienter Strömungsvorgänge in Rohrleitungen, Dissertation, Universität Dortmund, 1999.
- [3] Thorley, A. R. D., „Fluid Transients in Pipeline Systems“, D & L George LTD, 1991, Hadley Wood, Bamet, GB.
- [4] Dudlik, A.; Schlüter, S.; Prasser, H.-M.: Verhinderung von Druckstößen und Kavitationsschlägen beim schnellen Absperrn einer Flüssigkeitsleitung, ROHRBAU 99, Weimar, ISBN: 3-00-005286-0.
- [5] Raschke, E., Salla, M., Hültschmidt, W.: „Druckstoß gedämpft, Rohrleitung geschützt – Kondensationsschläge in Rohrleitungen unter dem dämpfenden Einfluss von Gasen“, Verfahrenstechnik 7-8/97, S. 45-49.
- [6] Klemann, E.: DDR-Wirtschaftspatent Nr. DD-PS 211615.
- [7] Gustavsson, B.: PCT-Classification: F17D 1/20, F24D 10/00, International Publication No.: WO-PS 94/02775.
- [8] G. Lück, Fa. ABB: DPA-Offenlegungsschrift Nr. DD-OS 23 46 754.
- [9] Froehlich, K.-P.: DDR-Wirtschaftspatent Nr. DD-PS 201041/4.

**Verfasser:** Dr.-Ing. Andreas Dudlik (Vortragender)  
Fraunhofer UMSICHT  
Kompetenzfeldleiter Rohrleitungstechnik / Rohrströmung  
Dr.-Ing. Stefan Schlüter  
Fraunhofer UMSICHT  
Bereichsleiter Sicherheits- und Prozesstechnik  
Prof. Dr.-Ing. Hans Fahlenkamp  
Institutsleiter  
Osterfelder Straße 3  
46047 Oberhausen  
Telefon: (02 08) 85 98 – 0  
Telefax: (02 08) 85 98 – 290  
e-mail: [du@umsicht.fhg.de](mailto:du@umsicht.fhg.de)  
und  
Dipl.-Ing. Jörg Alt  
HYDAC Technology GmbH  
Verfahrenstechnik, Offshore  
Geschäftsbereich Speichertechnik  
66273 Sulzbach / Saar  
Telefon: (0 68 97) 809 337  
Telefax: (0 68 97) 809 464