

## 6 Zusammenfassung

Bereits seit der Antike sind die grundsätzlichen Ursachen für Druckstöße in flüssigkeitsgefüllten Rohrleitungen und die damit verbundene Gefahr der Anlagenbeschädigung/-zerstörung bekannt. Der Bruch einer Rohrleitung führt meist zum Totalausfall der Anlage, zudem besteht je nach Durchflussstoff und thermodynamischen Zustand auch Gefahr für Mensch und Umwelt. Dessen ungeachtet ist auch heute die fluiddynamische Wechselwirkung zwischen Druckstößen und den verwendeten Anlagenkomponenten (Pumpen, Einbauten, Rohrbögen...) noch nicht vollständig verstanden. Demzufolge war das Ziel der vorliegenden Arbeit, dieses Gebiet mit Hilfe von praxisnahen Versuchsaufbauten und dem Einsatz von numerischen Simulationsprogrammen wissenschaftlich zu bearbeiten.

Druckstöße entstehen, wenn der stationäre Strömungszustand in einer Rohrleitung durch schnelle Vorgänge (z.B. Ventilschnellschluss) verändert wird. Im Gegensatz zu offenen Gerinnen kann bei geschlossenen Druckrohrleitungen ein Ausgleich der Bewegungsenergie nur durch die Elastizität der Rohrwand und des Fluids erfolgen. Dies führt bei einer Verzögerung der Fließgeschwindigkeit zu einer Umwandlung der kinetischen Energie in Druckenergie. Der entstehende Druckstoß breitet sich mit der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit, die vom Elastizitätsmodul und den Abmessungen der Rohrleitung abhängig ist, in Form einer Druckwelle im System aus. In Stahlrohrleitungen ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit üblicherweise im Bereich von 1000 - 1300 m/s. Maßgeblich beeinflusst wird die Druckwellenausbreitung durch Reflektionen der Druckwelle an den Systemgrenzen (Behälter, geschlossene Schieber etc.).

Während einfache unverzweigte Rohrleitungssysteme mit analytischen Methoden berechenbar sind, können komplexe Anlagen in der Regel nur mit Hilfe von numerischen Berechnungsprogrammen analysiert werden. Voraussetzung für den Erfolg einer Simulation ist die genaue Kenntnis der Stoffdaten (Dichte, Wellenausbreitungsgeschwindigkeit) und die richtige Interpretation der simulierten Ergebnisse. Numerische Fehler sind bei einer richtigen Anwendung moderner Programme meist vernachlässigbar. In dieser Arbeit wurde das vielfach verifizierte Simulationsprogramm ROLAST verwendet, dessen Rechenverfahren auf der numerischen Lösung der eindimensionalen Grundgleichungen der Strömungsmechanik basiert.

Zur Untersuchung von Druckstößen wurde eine Versuchsanlage (DN 100, PN 63) mit Schnellschlussventil mit insgesamt 75 m Länge aufgebaut, die mit zeitlich hochauflösender Druckmesstechnik ausgestattet ist. Durch Verwendung von Abtastraten bis zu 50.000 Hz können auch hochfrequente Effekte und deren Ausbreitung entlang der Rohrleitung messtechnisch erfasst werden.

Mit einer Vielzahl von Druckstoßversuchen konnte gezeigt werden, dass die gemessene Druckwellen-Ausbreitungsgeschwindigkeit (1318,7 m/s) praktisch identisch mit der theoretisch berechneten (1319,3 m/s) ist. Auch das Reflektionsverhalten der Systemgrenzen (Behälter ist offenes Rohrende, Ventil geschlossenes Ende) entspricht den theoretischen Erwartungen. Die Versuche können beliebig reproduziert werden, wenn stochastische Vorgänge wie Kavitation und deren Rückbildung vermieden werden.

Als sehr komplex hat sich die Interaktion zwischen Druckstößen und der Kreiselpumpe erwiesen. Je nach Betriebszustand sind verstärkende oder dämpfende Effekte möglich. Besonders wahrscheinlich ist eine dynamische Wechselwirkung im Teillastbetrieb der Kreiselpumpe, da hier instationäre Vorgänge, wie z.B. Druckpulsationen mit bis zu 25% Amplitude bezogen auf den mittleren Förderdruck, verstärkt auftreten. Diese hochfrequenten Druckpulsationen (Frequenz entspricht der Schaufelpassierfrequenz) können die Ausbreitung einer Druckwelle und deren Reflektion stören. In eindimensionalen Simulationsprogrammen wird die Kreiselpumpen-Pulsation üblicherweise nicht berücksichtigt. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass eine numerische Kombination aus Kreisel- und Kolbenpumpe die Wirkung der Druckpulsation nachbilden kann.

Im Falle einer Druckstoßverstärkung hat sich gezeigt, dass mehrere schwingungsfähige Teilsysteme (Fluidsäule, Klappe des Schnellschlussventils) dafür verantwortlich sind. In einem solchen System kann ein Druckstoß eine selbsterregte Schwingung auslösen, deren Energiequelle die Kreiselpumpe ist. Voraussetzung ist die Elastizität eines Bauteils, in diesem Fall die Beweglichkeit der Klappe des Schnellschlussventils. Dadurch wird die unvermeidliche Dissipation des Druckstoßes ausgeglichen, indem durch die Bewegung der Klappe Strömungsenergie in Druckenergie umwandelt wird. Dabei ist die Bildung von stehenden Wellen (Resonanz) möglich, deren Amplituden das Niveau des initialisierenden Druckstoßes deutlich überschreiten können.

Rohrbögen wurden bisher in der Literatur überwiegend als hydraulisch offen angesehen. Mit Hilfe der eingesetzten hochdynamischen Messtechnik konnte jedoch

nachgewiesen werden, dass Bögen wie partielle Reflektionsstellen wirken und das maximale Plateau der initiiierenden Druckstöße lokal um 10 – 20% reduzieren können. Das Auftreten dieses Phänomens konnte auch mit CFD-Simulationen qualitativ bestätigt werden.

Werden Rohrleitungen aus verschiedenen Werkstoffen verbunden, so entsteht insbesondere bei der Kombination von stark unterschiedlichen Elastizitätsmodulen (z.B. Stahl- und Kunststoffrohre) eine Sprungstelle in der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit. Dies führt zu einer Teilreflektion von Druckwellen (vergleichbar mit teilgeöffneten Armaturen), die sich ebenfalls im System ausbreiten. Insbesondere in verzweigten Rohrleitungssystemen sind dadurch Druckwellen-Überlagerungen möglich, die zu komplexen Schwingungssituationen führen können. Diese Phänomene dürfen daher nicht unterschätzt werden.

Um die Amplitude von unvermeidlichen Druckstößen zu begrenzen, können prinzipiell Windkessel oder federbelastete Sicherheitsventile eingesetzt werden. In beiden Fällen ist die druckstoßreduzierende Wirkung am größten, wenn das Bauteil direkt an der Quelle des Druckstoßes (am Schnellschlussventil) installiert wird. Damit konnte eine Reduzierung der Druckstoßamplitude um bis zu 60% erreicht werden. Durch eine Optimierung der Sicherheitsventile ist eine weitere Reduzierung möglich.

Beide Dämpfungsmethoden erfordern jedoch eine sorgfältige Auslegung und Positionierung im Rohrleitungssystem, da eine falsche Anwendung (z.B. zu geringer Durchmesser der Zuleitung zum Windkessel) auch zu einer Erhöhung der Druckstoßamplituden führen kann.

Allen beschriebenen Phänomenen ist gemeinsam, dass sie durch eine geeignete Anpassung von eindimensionalen Berechnungsprogrammen, wie dem in dieser Arbeit verwendeten Programm ROLAST, simuliert werden können. Damit ist es möglich, bereits in der Planungsphase von Anlagen kritische Betriebszustände zu identifizieren und durch geeignete Maßnahmen Schäden vorzubeugen.