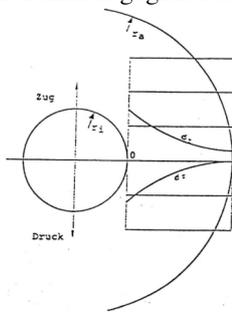


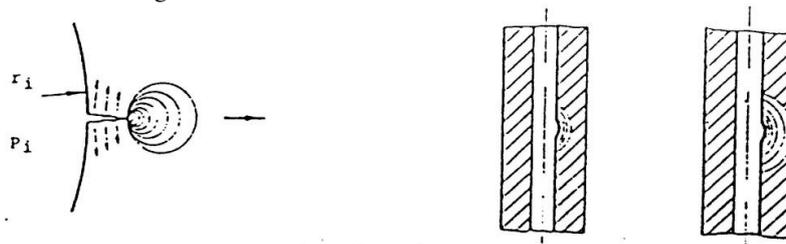
Hochdruckleitungen für hohe, pulsierende und schwellende Drücke - Probleme und Gegenmaßnahmen, Autofrettage

Hochdruckleitungen für hohe, pulsierende und schwellende Drücke Bedingt durch die in den letzten Jahren vermehrt zur Anwendung gelangende Hochdrucktechnik treten immer mehr Dauerbrüche in Hochdruckleitungen auf. Diese Dauerbrüche werden durch pulsierende oder schwellende Drücke verursacht und können durch geeignete Auswahl und Nachbehandlung der dickwandigen Hochdruckrohre verhindert werden. Basierend auf jahrzehntelanger Erfahrung im Bau von Hochdruck- Komponenten und Anlagen kann SITEC heute auch pulsfeste Rohrsysteme und Leitungen anbieten. Pulsierende und schwellende Drücke Die hauptsächlichsten Belastungen, die in Hochdruckleitungen zu den unvorhergesehenen und deshalb gefürchteten Dauerbrüchen führen, sind pulsierende Drücke und Vibrationen in den Verschraubungen. Beim Auftreten von pulsierenden Drücken sind Hochdruckrohre für eine genügende Wechselfestigkeit auszulegen. Allgemein werden für Hochdruckleitungen dickwandige Rohre mit Durchmesser-Verhältnissen von 2-4 verwendet. Dickwandige Rohre haben aber ganz spezielle Eigenschaften, die uns zwingen, ihrem speziellen Dehnungsverhalten unter Betriebsbedingungen Rechnung zu tragen, sofern eine optimale Auslegung erreicht werden soll:

1. Die Spannungsverteilung über die Wandstärke von dickwandigem Rohr unter Innendruck ist äußerst ungleich, indem Spannungsspitzen an der Innenfaser bedeutend geringeren Spannungen an der Außenfaser gegenüberstehen.



2. Sowohl an der Außen- wie an der Innenfaser handelt es sich dabei in tangentialer Richtung um Zugspannungen.
3. Kleinste Mikrorisse und andere fabrikationsbedingte Ungleichförmigkeiten treten vor allem an der Innenfaser auf. Bei allen Fabrikationsverfahren ist dies die am schwersten zu beherrschende Stelle des Rohres.
4. Der pulsierende Druck wirkt wie ein Keil, der Schlag um Schlag in diese Mikrorisse getrieben wird. Dadurch bildet sich um das Reißende, diesem vorauseilend, eine plastische Zone, die sich in Richtung Außenfaser bewegt. Sobald sie die Außenfaser erreicht hat, kommt es zum Bersten des Rohres in der Form eines Längsrisse.



5. Hochdruckleitungen werden oft vor dem Einbau, den Platzbedürfnissen entsprechend, gebogen, womit ungleichmäßig über den Querschnitt verteilte Eigenspannungen in das gebogene Rohrstück eingeführt werden. Nach dem Biegen werden auf der Außenseite des Biegeradius Zug- und auf der Innenseite Druckspannungen als Eigenspannungen verbleiben.
6. Hochdruckleitungen aus nicht rostfreien Stählen können durch Korrosionsrückstände zu verstopften Ventilen und Abrieb in den Packungen führen.

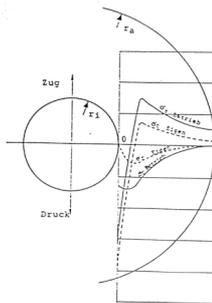
Obige 6 Punkte summiert, zeigt sich, dass eine Hochdruckleitung immer an der Innenfaser gefährdet ist. Diese Tatsache versucht man durch Spezifikationen minimaler Rauheit der Bohrung zu berücksichtigen. Dieser Maßnahme sind aber Grenzen gesetzt durch die Möglichkeiten einer wirtschaftlichen Fertigung. Bei einer eventuellen Nachbehandlung der Rohrinneoberfläche ist darauf zu achten, daß die raue Schicht in der Bohrung abgetragen wird und nicht nur optisch durch "Verschmieren" zum Verschwinden gebracht wird. Weiter wird auf eine möglichst hohe Dehnung des Werkstoffes geachtet, wobei natürlich die benötigte Streckgrenze und

Zugfestigkeit nicht unterschritten werden dürfen. Hochfeste Stähle werden relativ selten verwendet wegen ihrer tiefen Dehnwerte und ihrer Neigung zu Sprödbrüchen unter pulsierenden Lasten.

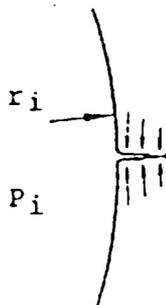
Wir müssen bedenken, daß bei statischer Belastung eines Rohres mit Durchmesser-Verhältnis aus weichgeglühtem, rostfreiem Stahl z.B. W.-Nr.: 1.4435 bei 1.000 bar die Fließgrenze an der Innenfaser erreicht wird. Für eine schwellende Last muß somit ein kaltverfestigtes Rohr gewählt werden, um den gleichen Grenzfall des Fließbeginns an der Innenfaser nicht zu überschreiten. Eine Erhöhung des Durchmesser-Verhältnisses über 3 ergibt nur eine unbedeutende Verbesserung, da z.B. eine Erhöhung von 3 auf 4 den zulässigen Druck zum Erreichen des gleichen Spannungszustandes an der Innenfaser nur um ca. 5% Prozent ansteigen läßt.

Alle ungünstigen Faktoren treffen somit an der Innenfaser von Hochdruckleitungen zusammen, wobei bei 1.000 bar praktisch kein Sicherheitsfaktor mehr übrigbleibt. Nachbehandlung von Hochdruckrohren für pulsierende Drücke Durch die Nachbehandlung der fertig gebogenen Hochdruckleitungen wird eine Zugspannungsspitze an der Innenfaser in eine Druckspannungsspitze überführt und damit eine drastische Erhöhung der Betriebssicherheit und der Lebensdauer erreicht.

- Die Spannungsverteilung über die Rohrwandstärke wird den Betriebsbedingungen besser angepaßt.
- Die unter Innendruck auftretende extreme Zugspannungsspitze in tangentialer Richtung an der Innenfaser eines Rohres entfällt.
- Durch geeignete Auslegung wird erreicht, daß an der Innenfaser die Eigen- und Betriebsspannungen in den drei Richtungen, tangential, axial und radial nur als Druckspannungen auftreten. Die kritische Innenfaser wird gar nicht mehr auf Zug belastet. Die höchste Zugspannung befindet sich im Vollmaterial.

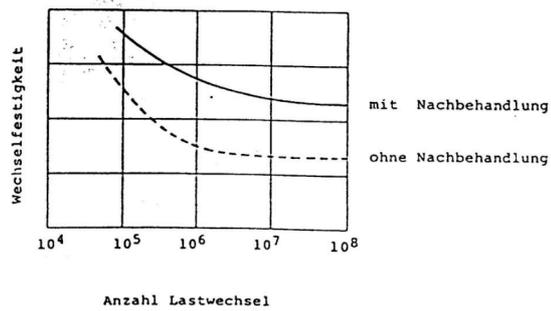


- Spannungskonzentrationen werden abgebaut.
- Der negative Effekt von Mikrorissen auf die Lebensdauer von pulsierenden Hochdruckleitungen wird durch diese Druckspannungen eliminiert. Die Druckspannungen haben sogar eine Heilwirkung auf Mikrorisse an der Innenfaser.



- Da sämtlicher Werkstoff in der Umgebung eines Mikrorisses unter Druck steht, kann keine lokale plastische Verformung auf Zug stattfinden.
- Hochfeste Stähle mit relativ tiefen Dehnungswerten können wieder vermehrt verwendet werden. Die Spannungskonzentrationen an der Innenfaser, die bei diesen Werkstoffen oft zu den gefürchteten Sprödbrüchen führten, sind abgebaut.
- Die ungleichen Spannungsverteilungen über den Querschnitt eines gebogenen Rohrstückes werden an der Innenfaser eliminiert.

- Nachstehendes Schaubild zeigt den typischen Verlauf der Wechselfestigkeit zweier identischer Rohre, mit und ohne Nachbehandlung.



Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß es mit diesem Verfahren möglich ist, die Wechselfestigkeit und somit die Lebensdauer einer dickwandigen Hochdruckleitung ca. um den Faktor 1,8 zu erhöhen. Dieser zusätzliche Spielraum sollte vor allem zum Wiedergewinn eines verantwortbaren Sicherheitsfaktors verwendet werden.

Rolf Sieber

SITEC-Sieber Engineering AG
 Aschbach 621
 CH-8124 Maur / Zürich