

Nachbehandlung von Hochdruckrohren zur Steigerung der dynamischen Dauerfestigkeit

BURDE-CO - H.Mossig 2002

Ein unter pulsierendem Druck stehendes Rohr ist so auszulegen, daß ohne maßliche oder festigkeitsmäßige Überdimensionierung die folgenden Anforderungen erfüllt werden:

- Die im Betrieb auftretenden Drücke dürfen das Rohr nicht überbeanspruchen.
- Die dem Rohr durch betriebsbedingte wechselnden Drücke aufgeprägten Spannungsausschläge dürfen dessen Dauerhaltbarkeit nicht übersteigen.

Die Dauerhaltbarkeit eines Rohres $D/d > 2$ wird bestimmt durch die Dimensionierung, dem Gütegrad des Innendurchmessers und der Auswahl des Werkstoffes und dessen Nachbehandlung.

1) Allgemeines

Wird ein Rohr mit einem Innendruck $p_i \gg p_a$ beaufschlagt, wird sich eine ungleichmäßige Verteilung der Zugspannungen einstellen, siehe Bild 1, schematisch dargestellt für Außendruck $p_a = 1$ bar. Für ein Rohr z.B. der Material - Güte NBK befindet sich die Spannungsspitze der Tangentialspannung σ_t am Innendurchmesser d und fällt zum Außendurchmesser D stark ab. Daraus folgt, daß die größte Belastung des Rohres an der Innenfaser auftritt und weiters, daß eine Vergrößerung von $D/d > 4$ nur eine geringe Steigerung der Dauerfestigkeit bewirkt. Wird ein Rohr gebogen, werden in die über der neutralen Faser liegende Rohrabschnitte weitere Zugspannungen eingebracht, die hinzugerechnet werden müssen.

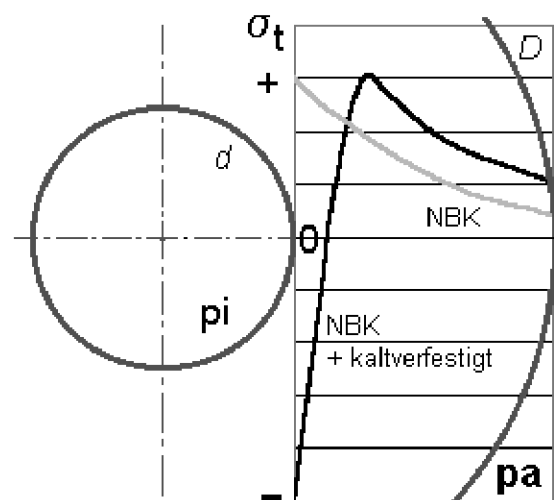


Bild 1 Spannungsverlauf in Rohren

2) Vormaterial und Drücke

Brennstoffleitungen von Dieselmotoren sind zwischen Hochdruckpumpe und Einspritzdüse in zweifacher Hinsicht beansprucht:

- durch den pulsierenden Einspritzdruck im Leitungsinnen
- auf Wechselbiegung durch Biegeschwingungen

Die dafür und für eine Nachbehandlung geeigneten Werkstoffe sind am Beispiel von Rohren mit $D = 6$ mm zusammengestellt, siehe Tabelle.

- Der St 52 - 1.0580 mit höherem Streckgrenzverhältnis als der Standardwerkstoff St 30 Al
- Der PP 600 ist ein besonders beruhigter Feinkornwerkstoff von [1], der sich durch seine Unempfindlichkeit gegen Sprödbruch auszeichnet.

In der Regel werden die Werkstoffe im normalgeglühten Zustand NBK verbaut, als Basis dienen die Werte der DIN Norm ISO 8535-1 [2]. Die mechanischen Eigenschaften können durch eine definierte Wärmebehandlung PPSH [1] weiter gesteigert werden.

Wird das Rohr über die Streckgrenze R_{eH} druckbeansprucht, beginnt der Werkstoff zu fließen, es kommt zum Versagen des Rohres, da der Berstdruck erreicht ist.

Nach Mises / Vaupel errechnet sich der Berstdruck p_b , wie unten angeführt. Die maximale statische Druck p_s und die maximale dynamische Beanspruchung p_d werden aus dem Berstdruck abgeleitet [1].

Tabelle : Werkstoffe, Abmessungen und Drücke, Rohre nicht nachbehandelt, ungebogen

Rohr Werkstoff	Außen D mm	Innen d mm	Wand s mm	Zugfest. R_m >N/mm ²	Streckgr. ReH >N/mm ²	Beanspruchung dynam.		
						pb bar	ps bar	pd bar
St 52	6,00	2,50	1,75			4.579	2.289	916
NBK	6,00	2,00	2,00	490	355	5.746	2.873	1.149
A5>=22%	6,00	1,80	2,10			6.297	3.148	1.259
St 52	6,00	2,50	1,75			6.934	3.467	1.387
PPSH	6,00	2,00	2,00	700	600	8.701	4.351	1.740
A5>=14%	6,00	1,80	2,10			9.535	4.768	1.907
PP 600	6,00	2,50	1,75			5.444	2.722	1.089
NBK	6,00	2,00	2,00	560	450	6.832	3.416	1.366
A5>=20%	6,00	1,80	2,10			7.487	3.743	1.497
PP 600	6,00	2,50	1,75			7.963	3.981	1.593
PPSH	6,00	2,00	2,00	800	700	9.993	4.996	1.999
A5>=15%	6,00	1,80	2,10			10.951	5.475	2.190

In keinem der bekannten Regelwerke zur Berechnung des Berstdruckes findet die Oberflächenbeschaffenheit des Innendurchmessers Berücksichtigung, auch in den obigen Annahmen wird von einer prozesssicher reproduzierbaren guten Oberfläche ausgegangen.

3) Oberfläche am Innendurchmesser

Die nahtlos, kaltgezogenen Rohre weisen insbesondere am Innendurchmesser d fertigungsbedingte Beschädigungen bis 0,13 mm Tiefe auf [2]. Dies kann zwar verbessert werden, Risse und Riefen sind aber verfahrensgemäß und ohne Nacharbeit nicht gänzlich zu vermeiden. Die von den Oberflächenfehlern ausgehende Kerbwirkung ist die Hauptursache für die rißinduzierten Ermüdungsbrüche von Hochdruckrohren.

4) Nachbehandlung durch Autofrettage

Wird ein Rohr mit einem Innendruck statisch so belastet, daß die Streckgrenze $\sim R_{p0,2}$ deutlich überschritten ist, stellt sich eine dauerhafte plastische Verformung ein. Durch diese überelastische Beanspruchung wird eine Druckeigenspannung eingebracht, die den Zugeigenspannungen entgegen wirken. Damit wird nicht nur eine Steigerung der Dauerfestigkeit von 10 – 15 % erreicht, sondern vielmehr wird die Zugspannungsspitze vom gefährdeten Innendurchmesser in die Rohrwand verschoben, siehe Bild 1. Dies führt zu einer gemessenen Verbesserung bei dynamischer Beanspruchung, dargestellt am Werkstoff **St 52 NBK**, Abmessung 6 x 2 mm [1], siehe Bild 2. In diesem Fall wurde der dynamischen Druckfestigkeit pd von 1.400 bar der unbehandelten Rohre, auf 1.800 bar angehoben.

Ein ähnliches Ergebnis zeigt eine behandelte Leitung 6 x 1,75 mm aus **St 52 PPSH**, behandelt mit 5.700 bar. Die gepulsten Rohre haben einen gemessenen Anstieg auf pd_{max} 2.074 bar im Dauerbetrieb.

In beiden Fällen entspricht die Oberfläche am Innendurchmesser der geraden Rohrabschnitte dem Gütegrad Level P gemäß DIN ISO 8535-1[2], Tabelle 2.

In der Serie ist die Nachbehandlung an fertig gebogenen Leitungen durchzuführen.

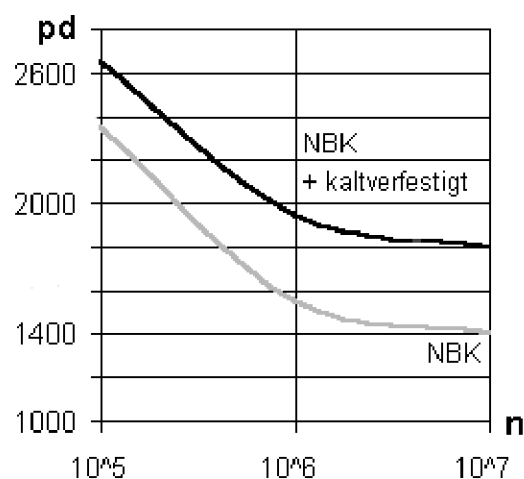


Bild 2 Lastwechselversuch

[1] Poppe&Potthoff / Werther

[2] Dieselmotoren, Stahlrohre für Einspritzleitungen