

Beulverhalten von profilierten PVC-hart-Großrohren unter äußerem Überdruck

von Dipl.-Phys. E. Barth und Ing. (grad.) R. Schommer, Troisdorf, veröffentlicht in „Kunststoffe“, 1975, S. 85-88

Sonderdruck aus der Zeitschrift „Kunststoffe“ · 65. Jahrgang 1975 · Heft 2 · S. 85—88

Alle Rechte, auch die des Nachdrucks, der photomechanischen Wiedergabe dieses Sonderdrucks und der Übersetzung, behält sich der Verlag vor
Carl Hanser Verlag, München 86

Beulverhalten von profilierten PVC-hart-Großrohren unter äußerem Überdruck

Von Dipl.-Phys. E. Barth und Ing. (grad.) R. Schommer, Troisdorf

Durch die Prüfung von PVC-hart-Spiralrohren unter äußerem Überdruck wurde ermittelt, daß die gemessenen Ringsteifigkeitswerte eine befriedigende Übereinstimmung mit der von VON MISES angegebenen Beulgleichung zeigen. Damit ist durch die Einführung der Ringsteifigkeit die Möglichkeit zur einfachen Berechnung von Rohrleitungssystemen aus Rohren mit profilierter Rohrwand gegeben. Der Einfluß von Zeit und Temperatur wird durch einen Korrekturfaktor berücksichtigt.

Für den Transport von Gasen werden zunehmend Rohre mit großen Querschnitten benötigt. Wegen der Aggressivität und den erhöhten Temperaturen vieler Gase müssen diese Rohre strengen Anforderungen hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaftswerte und ihrer Beständigkeit gegen Chemikalienangriff genügen.

Kunststoffe, insbesondere PVC hart, haben sich seit Jahrzehnten im Apparate- und Anlagenbau unter ähnlichen Bedingungen gut bewährt. Bis zu Nennweiten von 600 mm werden daher auch extrudierte Rohre aus PVC hart als Abgasleitungen verwendet. Mit der Entwicklung von Spiralrohren aus PVC hart steht nun ein Erzeugnis zur Verfügung (Abb. 1), das mit wirtschaftlichem Aufwand in Dimensionen bis zu 2700 mm Dmr. hergestellt werden kann.

Durch einen wendelförmig an der Außenoberfläche verlaufenden Steg wird bei geringerem Materialeinsatz eine hohe Steifigkeit erzielt.

Bedingt durch das Herstellverfahren besitzen diese Rohre einen fast idealen, kreisförmigen Querschnitt und eine gerade Achse. Sechs unterschiedliche Profildimensionen (Abb. 2) erlauben es, in einem weiten Bereich die Rohrsteifigkeit an die gestellten Anforderungen anzupassen.

Die Betriebsbedingungen für den Transport technischer Gase erfordern Rohrleitungen von hoher Steifigkeit mit einem hohen Widerstand gegen das Einbeulen unter äußerem Überdruck. Zusätzlich ist eine gute Dimensionsstabilität erwünscht,

um wirtschaftliche Auflagerabstände zu erzielen. Bei senkrechter, freistehender Rohrführung (z. B. bei Kaminen) ist die Beanspruchung auf Knickung zu beachten. Auch hierfür ist eine hohe Steifigkeit zusammen mit einem hohen Rundheitsgrad wichtig.

Die sichere Dimensionierung von Rohrleitungen ist für glattwandige Rohre mit Hilfe der klassischen Beulformeln möglich^{1,2)}. Die auf der Basis der Arbeiten von EULER durch VON WINDENBURG, VON MISES u. a. weiterentwickelte Beultheorie erlaubt es, den kritischen Beuldruck für glattwandige Rohre zu berechnen.

Die durch die Profilierung der Rohrwand erzielte Steifigkeit des Spiralrohrs wirft jedoch für die Berechnung des kritischen Beuldruckes Probleme auf. Es stehen zwar Beulgleichungen für Kugelschalen, Kreiszyylinder und auch für Kreiszyylinder mit Spanten zur Verfügung. Der Einfluß eines wendelförmig an der äußeren Rohroberfläche unlaufenden Stegs wird durch diese jedoch nicht erfaßt.

Für die Berechnung des kritischen Beuldruckes wird eine gleichförmige Wanddicke angenommen, die mit der dritten Potenz in die Beulgleichung eingeht:

$$p_k = \frac{E}{4(1-\mu^2)} \left(\frac{s}{r}\right)^3 \quad (1)$$

mit p_k = kritischer Beuldruck, E = Elastizitätsmodul, μ = Querkontraktion (für PVC = 0,38), s = Wanddicke, r = mittlerer Radius.

- 1 AD-Merkblatt
2 G. MENGES, Kunststoff-Berater Bd. 14 (1969) S. 25/27.

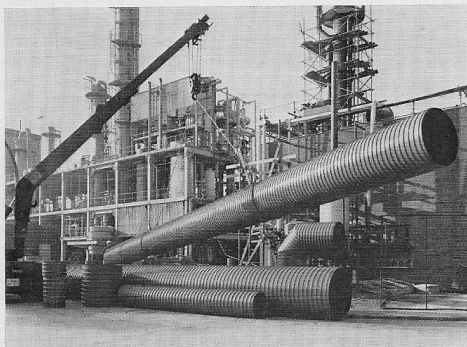
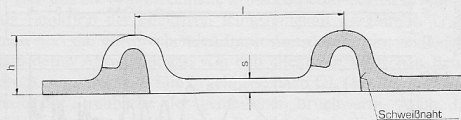


Abb. 1. ©Trovidur-Spiralrohre aus PVC hart



| Profil | L 1 | L 2 | K 1 | K 2 | K 3 | K 4 |
|---------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| s in mm | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 7,2 | 9,5 | 12,5 |
| h in mm | 18,0 | 20,0 | 22,5 | 29,5 | 38,0 | 49,2 |
| l in mm | 100,0 | 105,0 | 95,0 | 102,0 | 125,0 | 153,0 |

Abb. 2. Schematische Darstellung des Rohrprofils und entsprechende Abmessungen

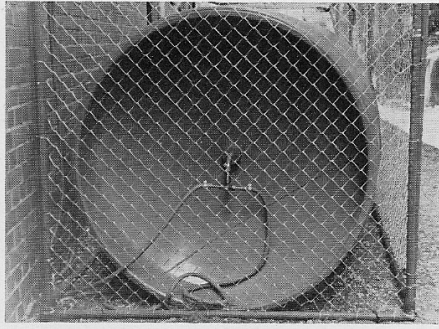


Abb. 3. Anschluß der Vakuumleitung am Prüfrohr

Da beim Spiralrohr keine glatte Rohrwand vorliegt, muß die angenommene Wanddicke aus dem Flächenträgheitsmoment I des Rohrwandprofils

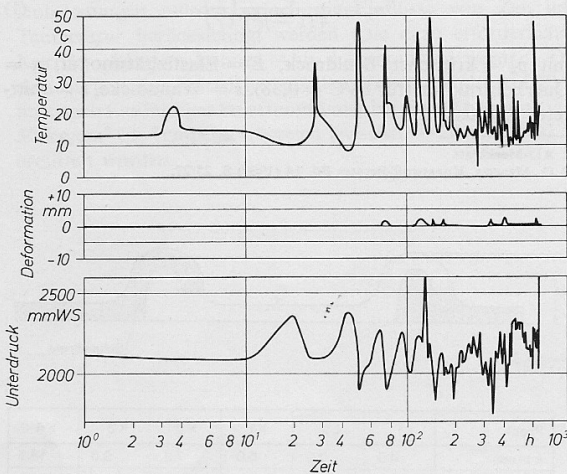
$$s = \sqrt[3]{\frac{12I}{b}} \quad (2)$$

mit b = Breite des Rohrwandprofils errechnet werden.

Die so bestimmten kritischen Beuldrücke haben jedoch keine befriedigende Übereinstimmung mit experimentell gemessenen Beuldrücken an evakuierten Spiralrohren ergeben.

Da bis auf die Wanddicke s alle Werte in der Gleichung von VON MISES bekannt sind, muß die Abweichung in der aus dem Trägheitsmoment ermittelten Wanddicke begründet sein. Dies ist erklärbar, weil der umlaufende Steg kein Ring ist, sondern eine Wendel beschreibt und das Rohrwandprofil natürlich fertigungsbedingten Dimensionsschwankungen unterliegt. Diese Abweichungen können jedoch bei der Wanddickenbestimmung aus dem Flächenträgheitsmoment nicht exakt berücksichtigt werden.

Aufgrund der ermittelten Abweichungen zwischen den errechneten und den experimentellen Ergebnissen wurden Spiralrohre mit unterschiedlichen Durchmessern und Wandprofilen sowie verschieden großen Stützweiten systematisch untersucht. Dazu wurden Spiralrohre von 12 und 5 m Länge mit nach innen gewölbten Kumpelböden aus PVC-hart-Tafelmaterial, verschweißt. Im Zentrum eines Bodens wurde ein Stutzen für den Anschluß an eine Vakuumpumpe angebracht (Abb. 3).



Ku 2839.4

Abb. 4. Deformation eines Spiralrohrs NW 710, Profil L 1, während 678 h unter Vakuum sowie Verlauf von Temperatur und Innendruck während der Beanspruchung

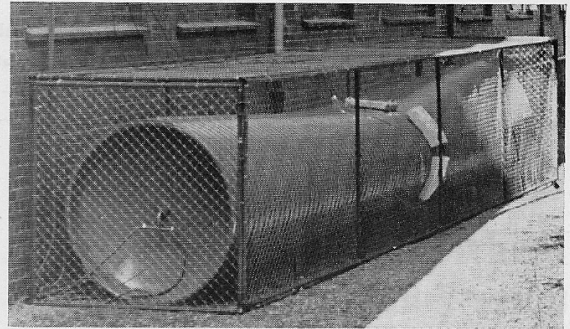
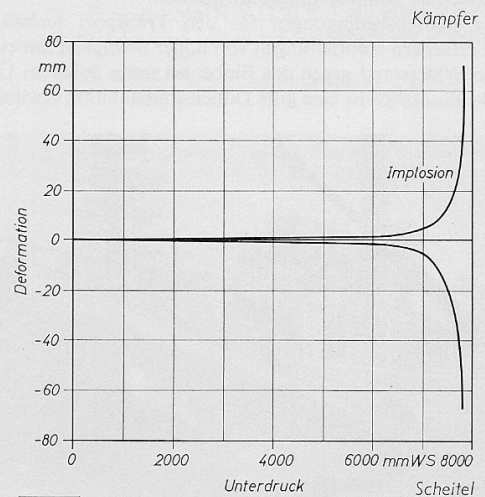


Abb. 5. Deformation eines Spiralrohrs beim Vakuumversuch

Durch Stützringe aus 19 mm dicken Holzspanplatten, die 50 cm von jedem Rohrende entfernt in das Rohr eingesetzt waren, wurden die Kumpelböden gegen die Übertragung der Rohrdeformation gesichert. Durch den Anschlußstutzen wurden die so vorbereiteten Rohre mit einer Vakuumpumpe evakuiert, und zwar sowohl stetig bis zu ihrer Implosion, als auch stufenweise bis zu Druckdifferenzen unterschiedlicher Höhe und damit verbundenen Zeitstandversuchen. Dabei wurde die Zunahme der Deformation in Abhängigkeit von der Druckdifferenz und der Zeit bis zu einer Prüfdauer von 2500 h gemessen (Abb. 4).

Alle Versuche erfolgten mangels eines für die Prüfung genügend großen Prüfraums und aus Sicherheitsgründen im Freien. Durch diesen Umstand mußten natürlich andere Nachteile in Kauf genommen werden. Hier ist besonders der Einfluß der wechselnden Außentemperaturen auf die Druckdifferenz und die davon abhängige Deformation des Spiralrohrs zu nennen.

Während der Versuche wurden der Außendruck, der Innendruck, die Temperatur und die Deformation der Rohre gemessen. Die Deformation der Spiralrohre wurde in der Mitte zwischen den Stützscheiteln, jeweils an 3 Meßstellen (am Scheitel und an beiden Seiten des Rohrkämpfers) registriert. Anfangs verwendete Dehnungsmeßstreifen versagten wegen der großen Verformungen infolge der guten Elastizität des Rohrwerkstoffs (Abb. 5). Danach wurden mit Erfolg Megatron-Potentiometer WGR 100 als Dehnungsgeber verwendet.



Ku 2838.5

Abb. 6. Deformation eines Spiralrohrs NW 1250, Profil K 3, in Abhängigkeit von der Beanspruchung. Prüftemperatur + 9 °C

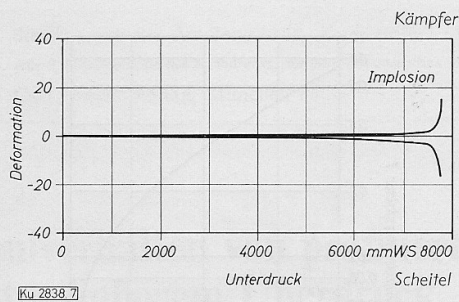


Abb. 7. Deformation (in mm) eines Spiralrohrs NW 700, Profil K 1, in Abhängigkeit von der Beanspruchung. Prüftemperatur + 6 °C

Es wurden Versuche mit Spiralrohren NW 710 bis 1250 aus allen in Abb. 2 beschriebenen Profilen durchgeführt. Dabei lagen die Stützweiten zwischen 395 und 900 cm. Ein Rohr NW 1250 aus dem Profil K 4 konnte bei einer Länge von 6 m trotz Absenkens des Innendrucks auf 10 Torr nicht zur Implosion gebracht werden. Die Deformation betrug dabei nur 1% des Rohrdurchmessers. Der Verlauf der Deformation in Abhängigkeit von der Druckdifferenz bei äußerem Überdruck ist in den Abb. 6 und 7 dargestellt. Diese Kurven wurden bei Kurzzeitversuchen mit stetiger Absenkung des Innendrucks bis zur Implosion ermittelt. Die Zeiten von Beginn der Evakuierung bis zum Bruch betragen bei dem Rohr NW 1250/K 3 102 min und bei dem Rohr NW 710/K 1 15 min. Die Stützweiten betragen 804 bzw. 450 cm.

Danach steigt die Deformation mit zunehmender Druckdifferenz zunächst linear an und erreicht bei etwa 75% des kritischen Beuldrucks einen Wert von nur 0,25% des Rohrdurchmessers. Die gute Übereinstimmung zwischen der relativen Verformung und der Druckdifferenz ist auf die annähernd gleiche Ringsteifigkeit der beiden Rohre zurückzuführen (Tabelle 1).

Die Verformung zeigt bei allen geprüften Spiralrohren etwa die gleiche Abhängigkeit von der Druckdifferenz. Der lineare Bereich der Deformation liegt je nach Ringsteifigkeit zwischen 50% ($RS = 0,0874$) und 80% ($RS = 0,237$) des kritischen Beuldrucks und bei Verformungswerten bis zu 0,8% des Rohrdurchmessers. Selbst an der Grenze des linearen Verformungsbereichs durchgeführte Zeitstandversuche bis zu 2500 h zeigten nur eine unbedeutende Zunahme der Deformation. Dies ist verständlich, da in diesem Bereich die Spannungen in der Rohrwand wegen der geringen Deformation nur in der Größenordnung von 10 kp/cm^2 liegen. Daraus ergibt sich eine hohe Sicherheit gegen Einbeulen, wobei natürlich die Einflußgrößen Temperatur, Zeit und Stützweite berücksichtigt werden müssen.

Aus den Messungen folgt ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Beuldruck und der Ringsteifigkeit der Rohre. Nach den von LEONHARDT³⁾ durchgeführten Berechnungen ergibt sich für die Deformation elastischer Rohre aus der Ringsteifigkeit RS folgende Beziehung:

$$RS(T) = \frac{E(t)I}{r^2} = \frac{P}{\Delta D_{iv}(\xi) \cdot l} \cdot \xi \quad [\text{kp/cm}^2] \quad (3)$$

mit $RS(T)$ = Ringsteifigkeit in Abhängigkeit von der Tem-

3 G. LEONHARDT, Berechnung von Verformungsbeiwerten für Versuchsbelastungen. Unveröffentlichtes Gutachten, erstellt im Auftrag der Dynamit Nobel AG.

Tabelle 1. Verhalten zweier Spiralrohre im Vakuumversuch

| NW | Profil | Ringsteifigkeit RS [kp/cm^2] | Stützweite l [cm] | 1/4-Verhältnis | Druckdifferenz Δp in mm WS bei einer Deformation von | | | |
|------|--------|---|---------------------|----------------|--|------|------|-----------|
| | | | | | 0,1 | 0,5 | 1% | Implosion |
| 710 | K 1 | 0,2357 | 4500 | 6,48 | 2600 | 7000 | 7700 | 7800 |
| 1250 | K 3 | 0,2211 | 8040 | 6,43 | 2700 | 6600 | 7000 | 7800 |

Tabelle 2. Ringsteifigkeit von Trovidur® Spiralrohren aus PVC hart bei 20 °C

| NW | Profil | RS [kp/cm^2] | NW | Profil | RS [kp/cm^2] |
|------|--------|---------------------------|------|--------|---------------------------|
| 500 | L 1 | 0,2640 | 1600 | K 1 | 0,0216 |
| 500 | L 2 | 0,3780 | 1600 | K 2 | 0,0478 |
| 500 | K 1 | 0,7072 | 1600 | K 3 | 0,1067 |
| 630 | L 1 | 0,1356 | 1800 | K 2 | 0,0336 |
| 630 | L 2 | 0,1945 | 1800 | K 3 | 0,0752 |
| 630 | K 1 | 0,3643 | 1800 | K 4 | 0,1666 |
| 710 | L 1 | 0,0874 | 2000 | K 2 | 0,0245 |
| 710 | L 2 | 0,1256 | 2000 | K 3 | 0,0549 |
| 710 | K 1 | 0,2357 | 2000 | K 4 | 0,1219 |
| 800 | L 1 | 0,0667 | 2200 | K 2 | 0,0184 |
| 800 | L 2 | 0,0958 | 2200 | K 3 | 0,0413 |
| 800 | K 1 | 0,1800 | 2200 | K 4 | 0,0919 |
| 1000 | K 1 | 0,08858 | 2500 | K 3 | 0,0283 |
| 1000 | K 2 | 0,1883 | 2500 | K 4 | 0,0630 |
| 1000 | K 3 | 0,4175 | | | |
| 1250 | K 1 | 0,0451 | 2700 | K 3 | 0,0224 |
| 1250 | K 2 | 0,0993 | 2700 | K 4 | 0,0500 |
| 1250 | K 3 | 0,2211 | | | |
| 1400 | K 1 | 0,0323 | | | |
| 1400 | K 2 | 0,0712 | | | |
| 1400 | K 3 | 0,1587 | | | |

peratur in kp/cm^2 , $E(t)$ = Elastizitätsmodul, zeit- und temperaturabhängig in kp/cm^2 (24 h-Wert bei +20 °C), I = Flächenträgheitsmoment der Rohrwand je cm Rohrlänge in cm^4/cm , r = Radius der neutralen Faser in cm, P = Scheitelbelastung bei 3% Verformung in kp, ΔD_{iv} = mittlere vertikale Verformung in cm, l = Rohrlänge in cm, ξ = Verformungsbeiwert, abhängig von $\Delta D_{iv}/D$.

Danach kann die Ringsteifigkeit eines Spiralrohrs relativ einfach durch Bestimmen der Scheiteldruckkraft und der in vertikaler Richtung ermittelten Deformation gemessen werden. Da die Ringsteifigkeit $RS = E I / r^3$ auch in der Beulformel von VON MISES enthalten ist $I = s^3 b / 12 b$ [cm^4/cm] mit s = Wanddicke [cm] und b = Breite eines Rohrwandprofils [cm]), wurde zur Auswertung der durchgeführten Versuche die Ringsteifigkeit zugrunde gelegt. Von den untersuchten Rohren standen die im Scheiteldruckversuch gemessenen Ringsteifigkeiten zur Verfügung.

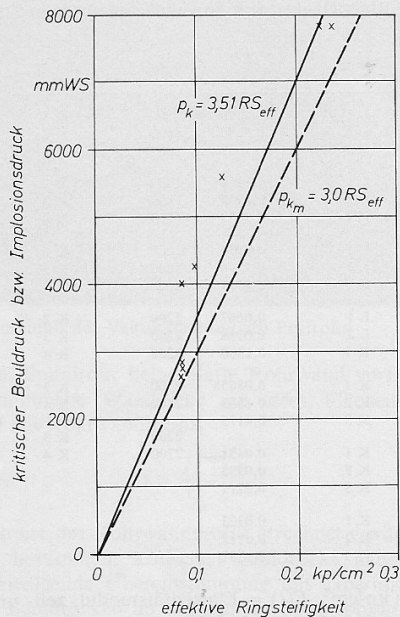
Führt man die Ringsteifigkeit in die Gleichung von VON MISES (Gl. (1)) ein, erhält man:

$$p_k = RS \frac{12}{4(1-\mu^2)} = 3,51 RS \quad (4)$$

Da die effektive Ringsteifigkeit eines Spiralrohrs einfach gemessen werden kann, läßt sich durch Einsetzen des gemessenen Werts auch der effektive kritische Beuldruck bestimmen:

$$p_{k_{\text{eff}}} = 3,51 RS_{\text{eff}} \quad (4a)$$

Der aus Gl. (4a) errechnete kritische Beuldruck ist in Abb. 8 als Funktion der effektiven Ringsteifigkeit dargestellt. Trägt man dort die entsprechenden Implosionsdrücke ein, zeigt sich, daß deren Abweichungen von den effektiven kritischen Beuldrücken gering sind. Die Ergebnisse nach Gl. (4a) liegen innerhalb der Streubreite der gemessenen Bruchwerte. Auch die gemessenen Druckdifferenzen Δp für Deformationen von z. B. 0,5 und 1% ergeben eine Gerade, deren Steigung derjenigen der Implosionskurve entspricht.



Ku 2838 8

Abb. 8. Abhängigkeit des Beuldrucks von der Ringsteifigkeit. X = Implosionsdruck der jeweiligen Rohre

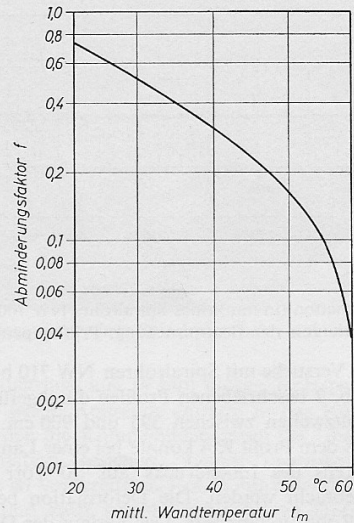
Die Streuungen der gemessenen Beuldrücke erklären sich aus den Dimensionsschwankungen der Spiralrohre und den Temperaturunterschieden während der Versuche. Nimmt man die negativen Abweichungen vom Mittelwert als Maßstab und legt die Funktion

$$p_k = a RS \quad (4b)$$

durch die niedrigsten Werte des Streubereichs der Bruchpunkte, ergibt sich als Funktion für die gemessenen Beuldrücke:

$$p_{km} = 3,0 RS \quad (4c)$$

Dabei ist zu berücksichtigen, daß sowohl die rechnerisch ermittelten (Tabelle 2) als auch die gemessenen Beuldrücke Kurzzeitwerte darstellen. Für die praktische Berechnung von Rohrleitungen müssen jedoch die Einflüsse von Zeit und Temperatur berücksichtigt werden. Die dazu erforderlichen Korrekturfaktoren können Abb. 9 entnommen werden. Die dort dargestellte Kurve ist aus den Kriechmoduln von PVC hart nach fünfjähriger Belastungsdauer bei einer Spannung von 50 kp/cm² im Temperaturbereich zwischen +20 und +60 °C ermittelt worden.



Ku 2838 9

Abb. 9. Zeit- und Temperaturfaktor, bezogen auf die mittlere Rohrwandtemperatur

Die sich daraus ergebende Funktion

$$p_{k_{\text{eff}}} = 3,0 RS_{\text{eff}} \cdot f \quad [\text{kp/cm}^2] \quad (5)$$

ist noch durch den Sicherheitsfaktor ν zu ergänzen:

$$p_{k_{\text{eff}}} = \frac{3,0 RS_{\text{eff}} \cdot f}{\nu} \quad [\text{kp/cm}^2] \quad (5a)$$

Im AD-Merkblatt und in der DVS-Richtlinie 2205, Blatt 1, wird gegen elastisches Einbeulen ein Sicherheitsbeiwert ν von 3 empfohlen. Aufgrund der ermittelten Meßwerte und der optimalen Rundheit der Spiralrohre genügt jedoch bei normalen Betriebsbedingungen ein Sicherheitsbeiwert ν von 2 bis 2,5. Außergewöhnliche Bedingungen, wie z. B. Schwingungen, Windbelastung und erhebliche Temperaturschwankungen, müssen zusätzlich in Rechnung gestellt werden.

Unter den genannten Bedingungen kann man z. B. als zulässigen Betriebsdruck bei +40 °C mittlerer Rohrwandtemperatur für ein Spiralrohr NW 1250 K 3 mit einer Ringsteifigkeit von 0,2211 kp/cm² folgenden Betriebsdruck ermitteln:

$$p_{\text{zul}} = \frac{3,0 \cdot 0,2211 \cdot 0,32}{2,5} = 0,0849 \text{ kp/cm}^2 \triangleq 850 \text{ mm WS.}$$

Anschrift des Verfassers: Dipl.-Phys. E. Barth u. Ing. (grad.) R. Schommer, Dynamit Nobel AG, Sparte Kunststoffe, 521 Troisdorf, Postfach 1209.