

Der Rohrwerkstoff PE 100

Dipl.-Ing. Thomas Frank
Frank GmbH
64546 Mörfelden-Walldorf

1 Geschichtliche Entwicklung von PEHD

Der Werkstoff Polyethylen wurde 1933 von der Firma ICI entwickelt. Die ersten Anwendungen als Druckrohr sind aus den 50er Jahren bekannt. Die großtechnische Anwendung setzt die Herstellung als Massenprodukt voraus. Der erste Hersteller, der eine solche Produktion (im Ziegler-Niederdruckverfahren) einführte, war die Fa. HOECHST AG im Jahre 1954.

Die Verwendung eines Werkstoffes auf einem technisch anspruchsvollen Sektor wie dem Rohrleitungsbau erfordert zwangsläufig das Vorhandensein von entsprechenden Normen und Richtlinien. Als erste Norm ist die in überarbeiteter Form heute noch gültige DIN 8075 (1960) veröffentlicht worden.

Ebenfalls aus Deutschland stammen die ersten Studien über die Schweißung von PEHD (Deutscher Verein für Schweißtechnik), welche Grundlage für die heute immer noch zur Anwendung kommenden DVS-Richtlinien waren. Diese Normen und Richtlinien wurden von den meisten europäischen Ländern ganz oder teilweise übernommen und unterliegen einer ständigen Überarbeitung.

Der Einsatz von PEHD in der Gasindustrie geht auf den Anfang der 60er Jahre zurück, wo in den USA die ersten Leitungen verlegt wurden. In Europa sind die ersten Anwendungen aus dem Jahre 1968 bekannt. Damals wurden in Großbritannien (British Gas) und Belgien (Electrabel) die ersten Leitungen verlegt. Viele andere europäische Länder folgten im Laufe der Zeit. In Deutschland sind die ersten Anwendungen Ende der 60er Jahre bei der Maingas AG Frankfurt/Main ausgeführt worden.

Seitdem gab es gravierende Weiterentwicklungen bezüglich der Qualität von Formmassen und Verbindungstechniken. Aufgrund dieser Tatsache ist es wenig verwunderlich, daß heute PEHD-Leitungen einen Anteil von bis zu 95 % an den neuverlegten Niederdruckleitungen besitzen. Der günstige Preis und die flexible Verlegetechnik sind die Gründe dafür, daß der hohe Marktanteil im Laufe der letzten Jahre weiter ausgebaut wurde.

Die Weiterentwicklung der Formmassen und der hohe Qualitätsstandard in der Herstellung der Rohre und Formteile führten dazu, daß PE 100 heute auch bei Gasleitungen bis 10 bar Betriebsdruck, in Trinkwassernetzen bis 16 bar und in der Druckluftversorgung eingesetzt wird.

2 PEHD Werkstoffe der 3. Generation

Die heute zum Einsatz kommenden PEHD-Typen haben mit dem Werkstoff der 60er Jahre nur noch wenig Gemeinsamkeiten. Bereits 1975 wurden die ersten PEHD-Typen der 2. Generation auf den Markt gebracht (ELTEX TUB 71 / HOSTALEN GM 5010 T2). Diese Formmassen können heute aufgrund ihrer Zeitstandfestigkeit in eine neue Werkstoffklasse eingeteilt werden: PE 80.

In der Berechnung und Auslegung von PEHD-Rohrleitungen hatte sich zu diesem Zeitpunkt nur wenig geändert. Die DIN 8074, in welcher die zulässigen Betriebsdrücke angegeben werden, ging weiterhin von den gleichen zulässigen Betriebsdrücken aus. Die erhöhte Zeitstandfestigkeit führte lediglich zu einer Erhöhung der Sicherheitsreserven im Vergleich zum bisher eingesetzten PE 63.

Im Jahre 1988 kam die dritte Type von PEHD-Formmassen an den Markt. Diese unterscheidet sich im Vergleich zum PEHD-Typ 2 durch eine sogenannte bimodale Verteilung der Molmasse. Bimodal bedeutet, daß zwei unterschiedliche Gruppen von Molekülketten vor-

handen sind, lange und kurze. In die langen (hochmolekularen) Molekülketten sind Verzweigungen selektiv eingefügt. Diese sogenannten Kurzkettenverzweigungen werden in einem speziellen Polymerisationsprozeß auf die Makromoleküle „aufgepfropft“. Die Folge ist eine Optimierung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften der amorphen Zone und damit (amorphe Zone ist das schwächste Glied) des gesamten Materials.

Diese Eigenschaftsverbesserung äußert sich unter anderem in einem gesteigerten Widerstand gegen schnelle sowie langsame Rißfortpflanzung und einer Erhöhung der Zeitstandfestigkeit.

Prinzipiell ist die Bezeichnung PE 100 nicht mit PEHD-Typ 3 gleichzusetzen, da zur Klassifizierung von PE 100-Typen lediglich die Zeitstandfestigkeit ausschlaggebend ist. Hier unterscheidet man über die Vergleichsspannung bei einer Temperaturbelastung von 20 °C und einer Beanspruchungsdauer von 50 Jahren. Die zulässigen Spannungen werden in N/mm² bzw. MPa angegeben. Die Einteilung in die entsprechenden PE-Klassen erfolgt dann mittels der Reynardschen Zahlenreihe, wobei die ermittelte Langzeitfestigkeit (LCL = Lower Confidence Limit / 97,5 % Vertrauensgrenze) auf die nächst niedrigere Normzahl R10 abgewertet wird. Dieser Zusammenhang ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

LCL [MPa]	MRS [MPa]	PE-Type
6,3 - 7,99	6,3	PE 63
8,0 - 9,99	8,0	PE 80
10,0 - 12,49	10,0	PE 100

Tab. 1: Klassifizierung der PEHD-Typen

Einige der ersten PE 100-Werkstoffe waren nur leicht modifizierte PE 80-Formmassen, deren Langzeitfestigkeit durch Erhöhung der Dichte auf den erforderlichen Wert (>10 N/mm²) verbessert werden konnte. Eine deutlich gesteigerte Spannungsrißbeständigkeit (langsames Rißwachstum) konnte genauso wenig festgestellt werden wie eine erhöhte Beständigkeit gegen schnelles Rißwachstum.

Diese Werkstoffe mußten eigentlich noch zur 2. Generation gezählt werden und sind mittlerweile nicht mehr am Markt erhältlich. Alle derzeit verfügbaren PE 100-Formmassen können nicht nur hinsichtlich ihrer Zeitstandfestigkeit, sondern auch in den übrigen Materialeigenschaften mittlerweile als wesentliche Weiterentwicklung angesehen werden. Das spiegelt sich auch in den aktuellen Regelwerken (DIN, DVS) wieder. Dort wird heute klar unterschieden zwischen den verschiedenen Festigkeitsklassen, wobei vor allem PE 80 und PE 100 nahezu alle Anwendungsbereiche abdecken.

3 Zulässige Betriebsdrücke von PEHD-Rohrsystemen / Zeitstandfestigkeit

Bei der Bestimmung der zulässigen Betriebsdrücke von Rohrleitungssystemen aus PEHD wird die Zeitstandfestigkeit als Berechnungsgrundlage herangezogen. Sie ist deshalb eine der wichtigsten Eigenschaften von Kunststoffrohren. Die Zeitstandfestigkeit beschreibt die Lebenserwartung eines Rohres, das unter Innendruck steht. Dabei hängt bei Thermoplasten die zum Bruch führende Spannung von der Temperatur und der Beanspruchungsdauer ab.

Für die schon lange Verwendung findenden PEHD-Typen war das Zeitstandverhalten bereits früh in technischen Regelwerken (DIN 8075 bzw. DVS 2205 Teil 1) beschrieben. In leicht abgeänderter Form sind diese Zeitstandkurven heute noch für PE 80 gültig (vgl. Fig. 1).

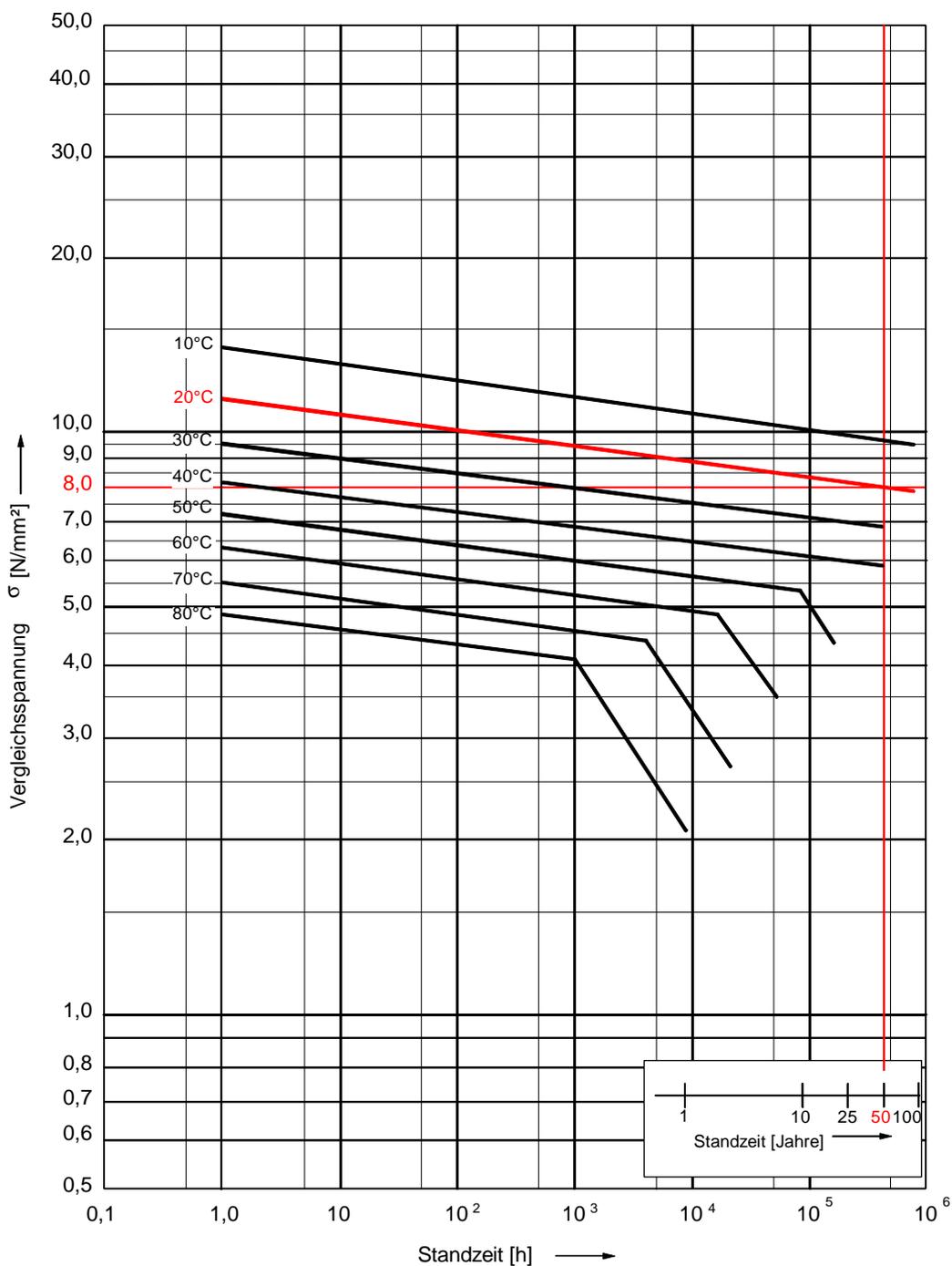


Fig. 1: Zeitstandverhalten von PE 80

Seit 1996 sind solche Zeitstandkurven auch für PE 100 in Normentwürfen (DIN 8075 / Entwurf 1996) und Richtlinien (DVS 2205-1 Beiblatt 8 / 7-1997) beschrieben. Dadurch ist eine Auslegung bei verschiedenen Standzeiten und Temperaturen auch für die PE 100-Rohstoffe möglich (vgl. Fig. 2).

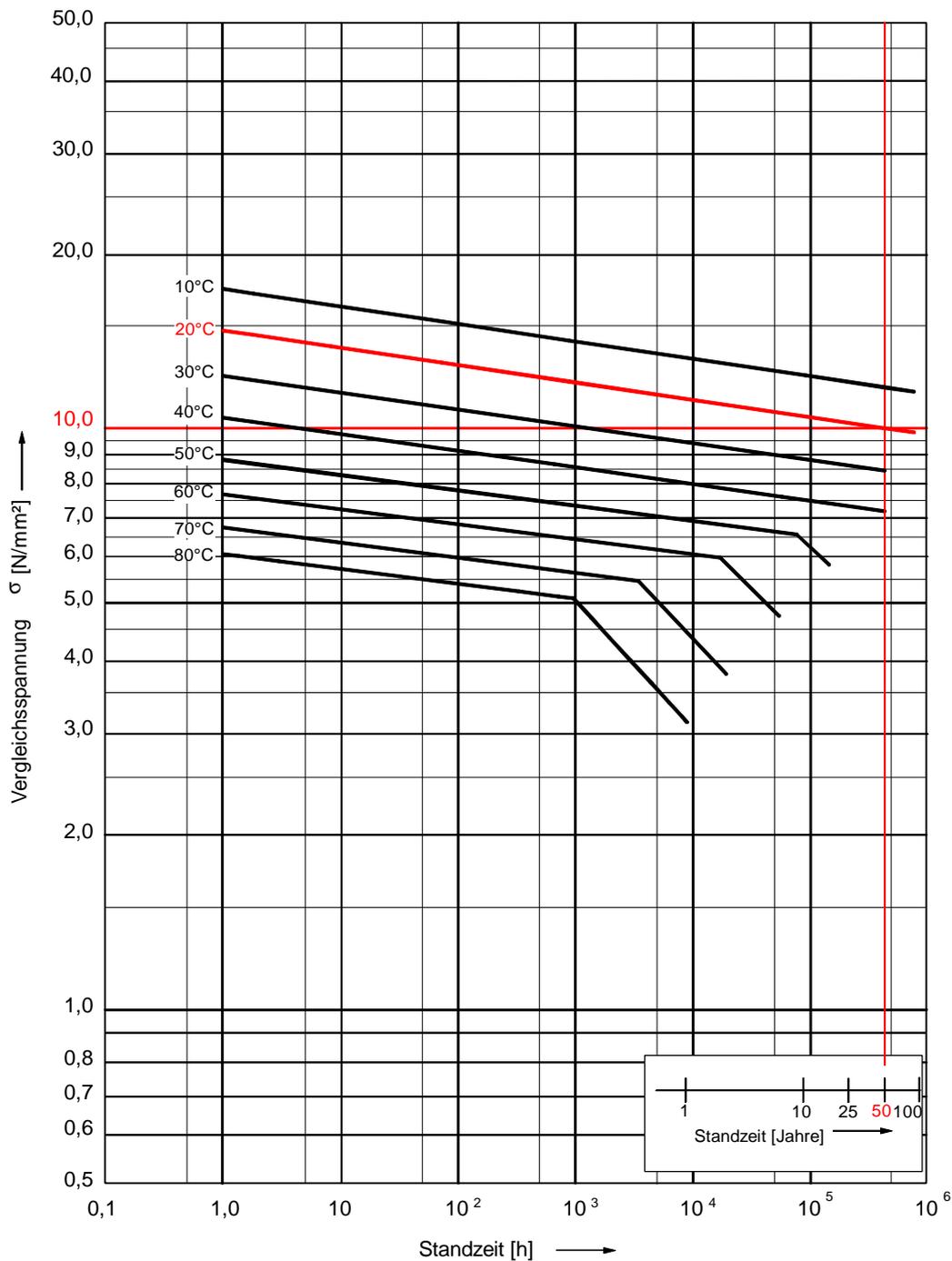


Fig. 2: Zeitstandverhalten von PE 100

Die Abbildung 3 zeigt das Zeitstandverhalten von PE 100 im Vergleich zu PE 80. An dieser Darstellung ist die bei gleicher Standzeit und Temperatur erhöhte Vergleichsspannung für PE 100 auffällig. Die Tatsache, daß die PE 100-Materialien erst bei größeren Standzeiten einen Knick im Langzeitverhalten aufweisen, ist in diese Normkurven nicht eingeflossen, gilt aber für die heute am Markt erhältlichen Formmassen als erwiesen.

Dieser Knick stellt den Übergang vom duktilen (flacher Ast der Kurve, Versagen durch Zähbruch) zum spröden Werkstoffverhalten (steiler Ast der Kurve, Versagen durch Sprödbuch)

dar. Durch die Verschiebung des Übergangsbereiches zu höheren Beanspruchungszeiten hin kann bei den modernen PEHD-Formmassen bei den in der Praxis auftretenden Beanspruchungen ein zähes Werkstoffverhalten angenommen werden.

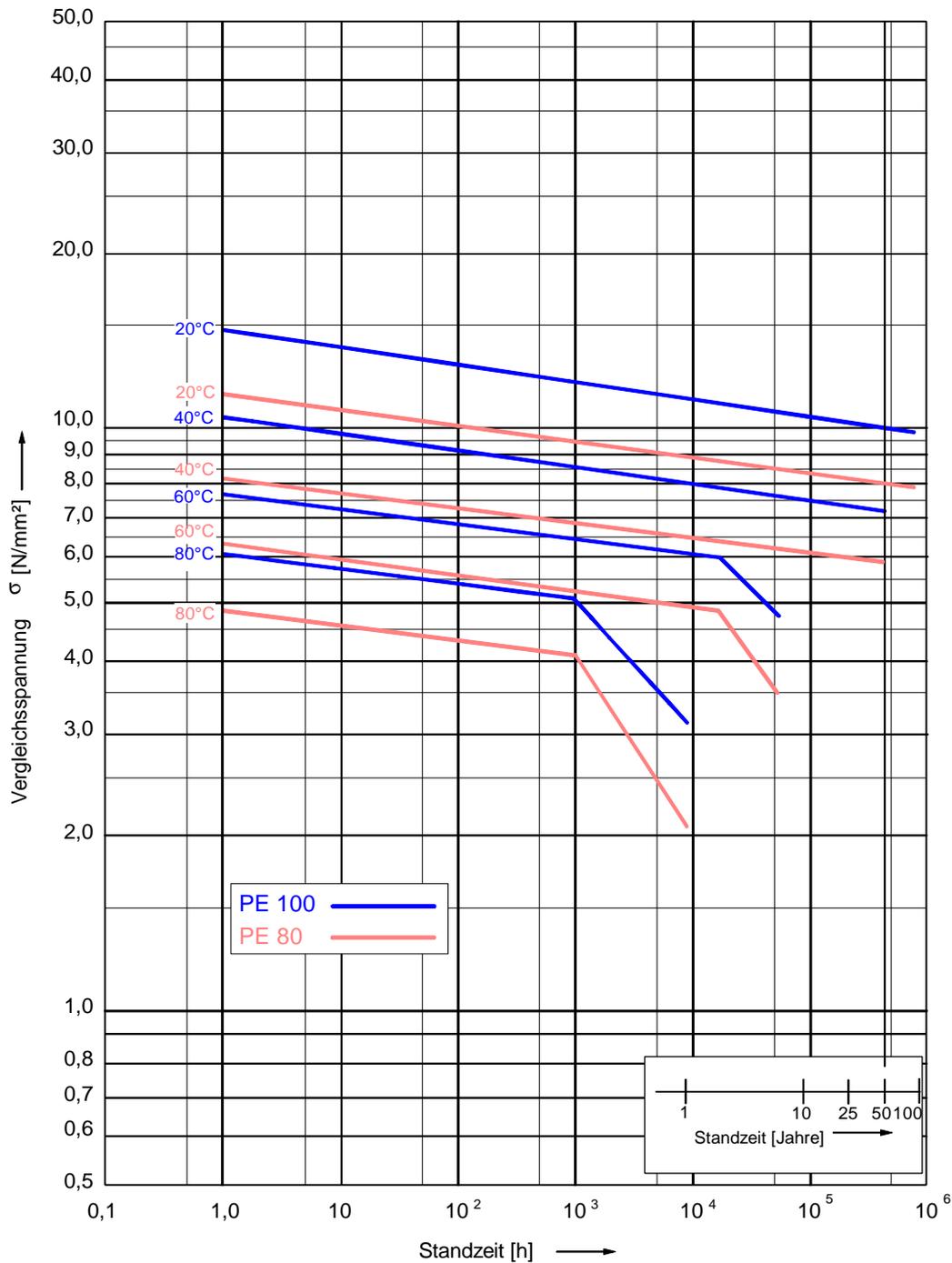


Fig. 3: Zeitstandverhalten von PE 80 und PE 100 im Vergleich

Ein an einer Rohrleitung aufgebrachter Innendruck erzeugt einen dreiachsigen Spannungszustand, wobei die Spannung in Umfangsrichtung σ_u die größte der drei Einzelspannungen darstellt. Diese wird (nach der Hauptspannungshypothese) für die Dimensionierung von

Druckrohrleitungen zugrunde gelegt. Die maximal zulässige Spannung σ_{zul} kann aus den Zeitstanddiagrammen (Fig. 1 bis 3) entnommen werden. Wobei der dort für eine Temperatur und Belastungsdauer angegebene Wert mit dem erforderlichen Sicherheitsfaktor abgemindert werden muß.

Die Mindestsicherheitsbeiwerte hängen von der Anwendung und dem Gefährdungspotential ab. Die in Kürze erscheinende DIN 8074 schlägt drei verschiedene Sicherheitsbeiwerte vor (1.25, 1.6 und 2.0) und überläßt damit dem planenden Ingenieur die endgültige Festlegung. Die nachfolgende Tabelle zeigt für verschiedene SDR-Klassen (SDR bedeutet das Verhältnis von Durchmesser zu Wanddicke des Rohres) bei unterschiedlichen Sicherheitsfaktoren die zulässigen Betriebsüberdrücke bei einer Beanspruchungsdauer von 50 Jahren und einer Temperatur von 20 °C.

SDR	Sicherheitsbeiwert S = 1.25		Sicherheitsbeiwert S = 1.6		Sicherheitsbeiwert S = 2.0	
	PE 80	PE 100	PE 80	PE 100	PE 80	PE 100
7,4	20	25	15,3	19,2	12,3	15,3
11	12,5	16	10	12,5	8	10
17	8	10	6,2	7,8	5	6,2
17,6	7,5	9,4	6	7,5	4,8	6

Tab. 2: Zulässige Betriebsüberdrücke in bar für PEHD-Rohre in Abhängigkeit des Sicherheitswertes

In den europäischen Normentwürfen für Gas- und Wassertransportleitungen sind folgende Sicherheitsfaktoren vorgeschrieben:

Gas (prEN 1555) C_{min} = 2.0
Wasser (prEN 12201) C_{min} = 1.25

Diese Sicherheitsfaktoren werden auch vom Deutschen Verein für das Gas- und Wasserfach (DVGW) als Mindestsicherheitsfaktoren für die jeweiligen Anwendungen vorgegeben (siehe aktuellste Versionen von VP 608, G 472). Die für Trinkwasserleitungen zulässigen Betriebsüberdrücke sind in Tabelle 2 hinterlegt. Die heute immer noch Verwendung findenden Druckstufenbezeichnungen nach der DIN 8074 von 1987 sind mit einem Sicherheitsfaktor von 1.6 berechnet worden und können in Tabelle 2 der PE 80-Spalte bei S = 1.6 entnommen werden. Der Bezug zwischen der alten und der neuen Druckstufenbezeichnung ist in Abbildung 4 dargestellt.

Erdverlegte Gasleitungen können nach DVGW mit folgenden Überdrücken betrieben werden:

SDR	PE 80	PE 100
11	4 bar	10 bar
17	1 bar	4 bar

Tab. 3: Zulässige Betriebsüberdrücke für PEHD-Rohre in der Gasversorgung

Dieser Tabelle ist zu entnehmen, daß Systeme aus PE 80 mit einem höheren Sicherheitsfaktor beaufschlagt werden. Die Ursachen dafür werden in den Abschnitten 4 und 5 erläutert.

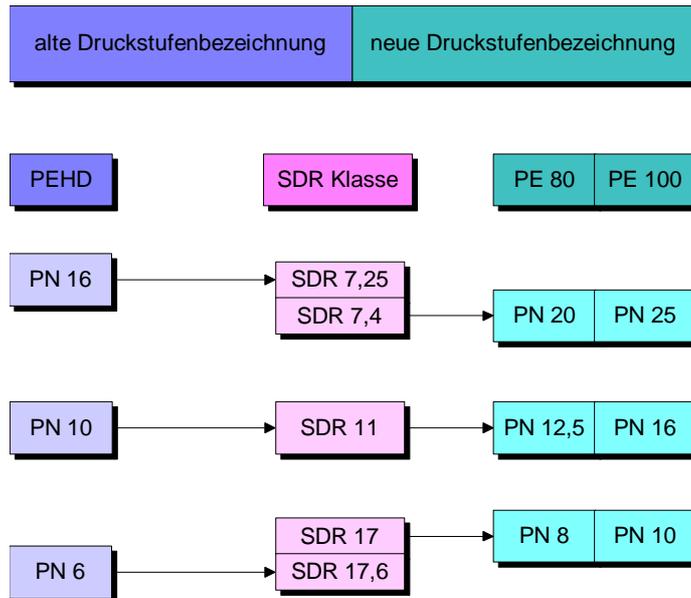


Fig. 4: Gegenüberstellung der Druckstufen und SDR-Klassen

Die zuvor angegebenen Drücke gelten alle für eine Auslegungstemperatur von 20 °C. Im industriellen Rohrleitungsbau sind häufig höhere Temperaturen anzutreffen. Auch bei diesen Applikationen bietet der Werkstoff PE 100 Vorteile in der Belastbarkeit. Dieser Zusammenhang ist bereits den Zeitstanddiagrammen (Fig. 1 bis 3) zu entnehmen und für eine Betriebsdauer von 50 Jahren in Figur 5 dargestellt:

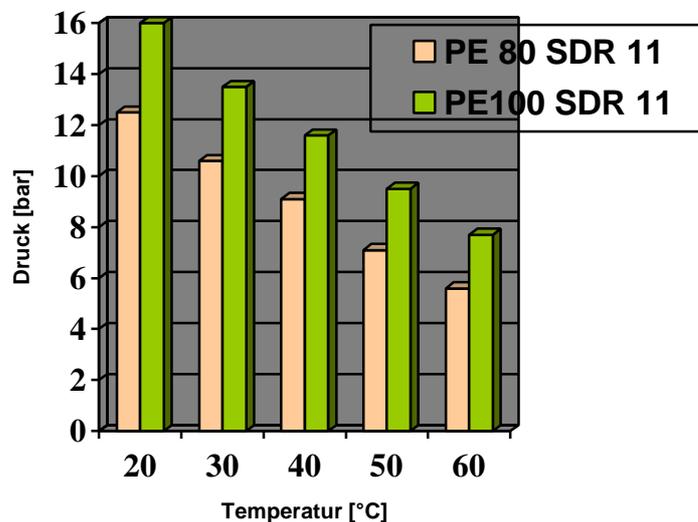


Fig. 5: Zulässiger Betriebsüberdruck von PE 80 und PE 100 in Abhängigkeit von der Temperatur

4,6 N/mm². Moderne PE 100-Werkstoffe bestehen diese Prüfung ohne weiteres, deshalb wird zur genaueren Differenzierung häufig der *Full Notch Creep Test* oder *FNCT* eingesetzt.

Beim **FNCT** werden an Probestäben mit einer definierten umlaufenden Kerbe Zeitstandzugversuche unter Netzmitteleinfluß bei erhöhter Temperatur (80 oder 95 °C) durchgeführt. Dieses Prüfverfahren erlaubt bei relativ kurzen Prüfzeiten eine deutliche Differenzierung einzelner Formmassen. Naturgemäß erreichen zähe Werkstoffe in diesem Test die deutlich höheren Standzeiten, wobei sehr gute PE 80-Formmassen (Werkstoffe der 3. Generation) durchaus höhere Standzeiten als einige PE 100-Formmassen erzielen können. Generell stellt aber auch für diese Werkstoffeigenschaft das PE 100 eine wesentliche Weiterentwicklung dar.

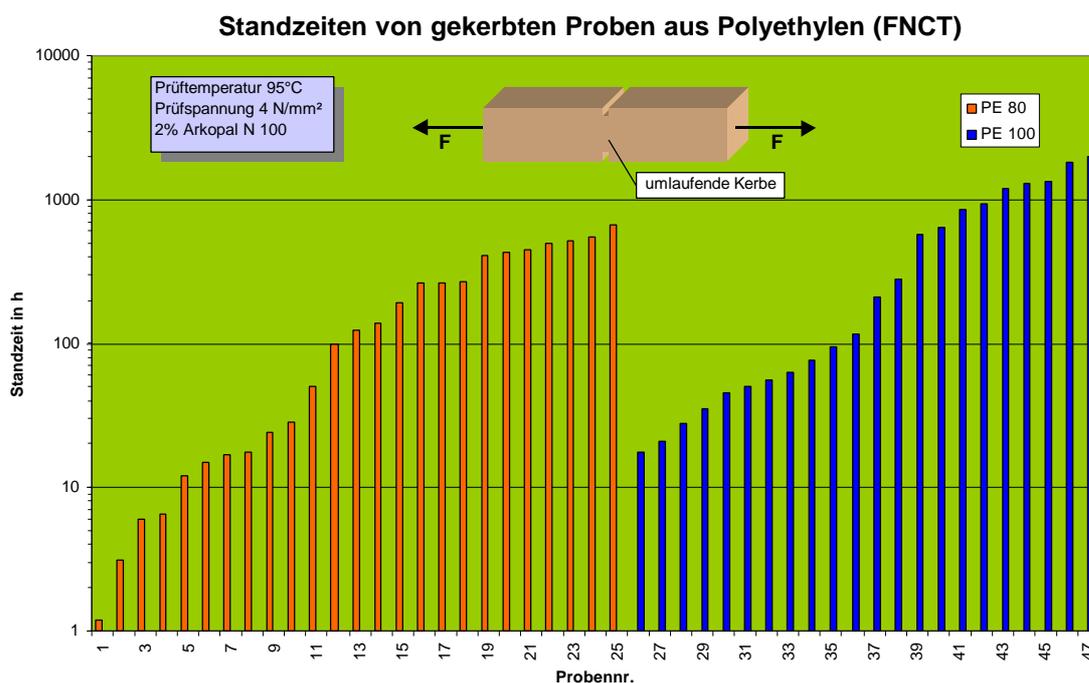


Fig. 7: FNCT-Ergebnisse einiger PE 80 und PE 100 Formmassen

5 Widerstand gegen schnelle Rißfortpflanzung

Unter schneller Rißfortpflanzung versteht man den Sachverhalt, daß bei kompressiblen Medien (Gase), die unter hohem Druck stehen, sich eine Beschädigung (Riß) - verursacht durch die im Gas gespeicherte Energie - mit nahezu Schallgeschwindigkeit über längere Strecken durch die Rohrwand fortpflanzt. Dieses auch als RCP (Rapid Crack Propagation) bezeichnete Phänomen kann nur dann auftreten, wenn die Rißfortschritungsgeschwindigkeit höher ist als der Abfall des Druckgradienten im Medium. Bekannt ist dieses Phänomen auch durch einige in Verbindung mit Stahlleitungen aufgetretene Schadensfälle.

Die bei der Verwendung von Polyethylen bisher zugelassenen Betriebsüberdrücke (siehe Tabelle 3) schlossen ein RCP-Risiko völlig aus. Durch die Erhöhung dieser Drücke auf z.B. 10 bar bei der Rohrklasse SDR 11 muß nun weiterhin sichergestellt werden können, daß eine Beschädigung (durch äußere Gewalteinwirkung) der Rohrleitung nicht zu schnellem Rißwachstum führt. Um dies zu gewährleisten, werden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Neben dem *Full Scale Test* nach ISO 13478 (quasi ein 1:1-Versuch), der mit einem extremen Prüfaufwand verbunden ist, hat sich der **S4-Test** (*Small Scale Steady State*

Test) nach ISO DIS 13477 zur Prüfung der Werkstoffeigenschaft „Widerstand gegenüber schneller Rißfortpflanzung“ etabliert.

Bei diesem Test wird ein Rohr normierter Länge mit konstantem Gasinnendruck beaufschlagt und an einem Ende durch eine an einem Fallbolzen befestigte Schneide durchschlagt. Dadurch wird ein axialer Riß in das Rohr eingebracht, der entweder abrupt zum Stillstand kommt oder über die gesamte Rohrlänge weiterläuft. Wie in Abbildung 8 für drei ausgewählte Rohrwerkstoffe anschaulich dargestellt, ergibt sich in der Regel ein sprunghafter Übergang zwischen einem Ristillstand und der stationären Rißfortpflanzung. Der im *S4-Test* ermittelte kritische Druck ist dabei der höchste Druck, bei dem der Riß zum Stillstand kommt.

Dieses Verfahren, bei dem durch einen den Prüfkörper umgebenden Käfig der Druckabfall infolge der Rißfortpflanzung verzögert wird, ermöglicht die Realisierung der schnellen Rißfortpflanzung an einem kleinen Probekörper. Dabei ergibt sich - bedingt durch den Versuchsaufbau - ein wesentlich niedriger kritischer Druck als im *Full Scale Test*. In der Praxis hat sich gezeigt, daß zwischen den in diesen Versuchen ermittelten kritischen Drücken der Faktor 3,6 liegt. Unter Berücksichtigung eines entsprechenden Sicherheitsfaktors gilt deshalb für den zulässigen Betriebsüberdruck für gasförmige Medien $P_{max} = P_c \times 2,4$.

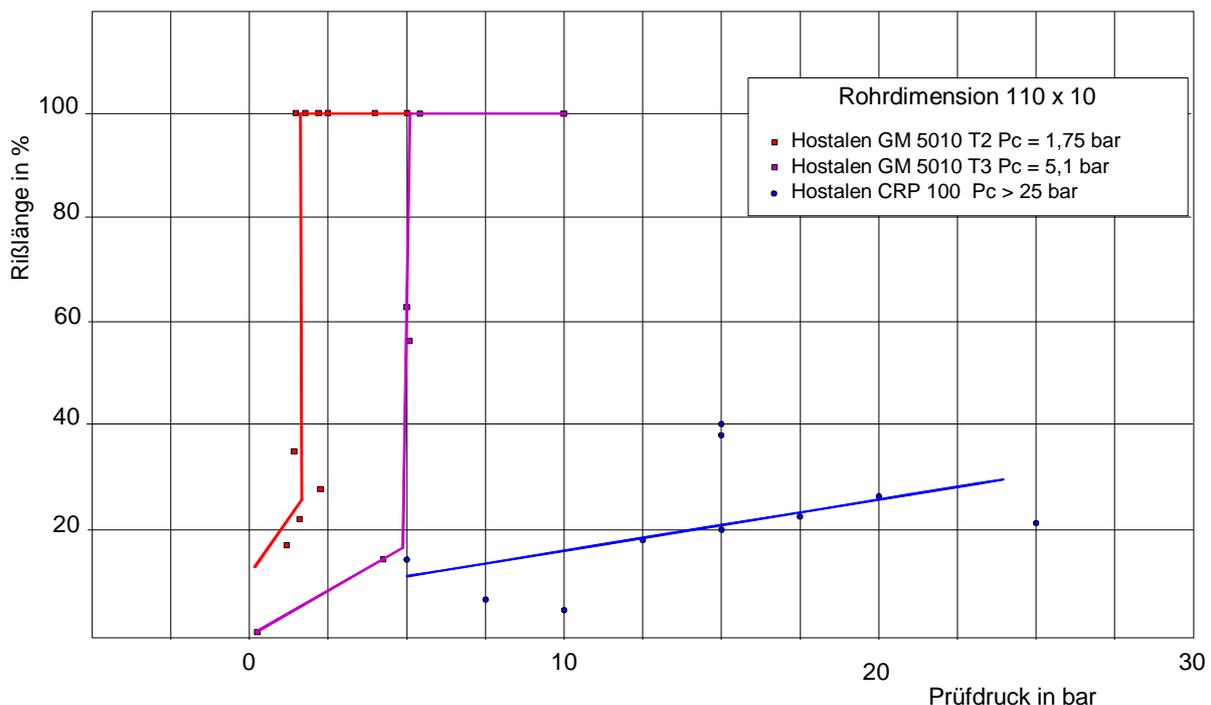


Fig. 8: S4-Test, kritische Drücke einiger Formmassen

Die Temperatur des Prüfkörpers hat selbstverständlich Auswirkungen auf den kritischen Druck. Der *S4-Test* wird normgemäß bei 0 °C durchgeführt. Bei tieferen Temperaturen ergeben sich geringe Abweichungen hin zu niedrigeren kritischen Drücken, die jedoch bei den in der Praxis relevanten Temperaturen (bis -20 °C) mit der im Umrechnungsfaktor enthaltenen Sicherheit abgedeckt sind.

Ein weiteres Phänomen ist die Abhängigkeit des kritischen Druckes von der Wanddicke des beanspruchten Rohres. Dies gilt sowohl für die Laborprüfungen als auch für die praktische Anwendung. Figur 9 zeigt diesen Zusammenhang beispielhaft.

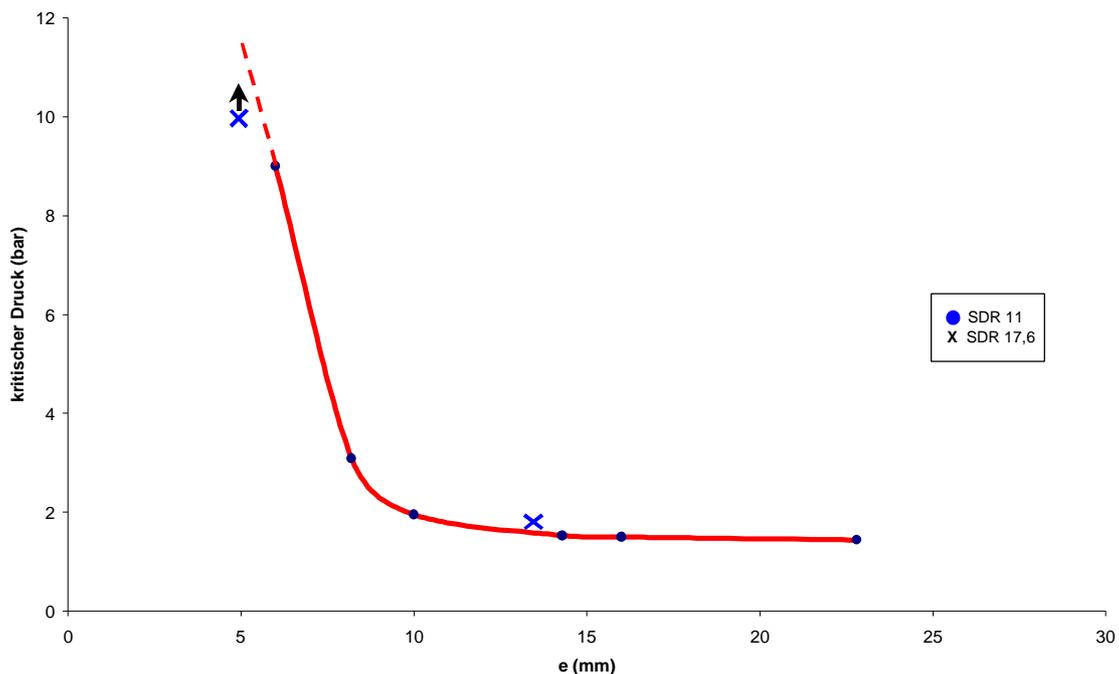


Fig. 9: Abhängigkeit des kritischen Druckes von der Rohrwanddicke

6 Schweißbarkeit von PE 100

Für die Heizelementstumpfschweißung von PE 80 sind durch die DVS-Richtlinie 2207 Teil 1 die Parameter festgelegt und seit über 10 Jahren in der Praxis erprobt.

Auf dem Gasversorgungssektor hat sich mittlerweile die Heizwendelschweißung etabliert. Die heutzutage handelsüblichen Schweißgeräte sind – bis auf wenige Ausnahmen – universell einsetzbar, d.h., die Formteile sämtlicher Hersteller können mit diesen Geräten verschweißt werden.

Eine Heizwendelschweißung zwischen PE 80-Formteilen und PE 100-Rohr bzw. umgekehrt ist ohne weiteres möglich und Stand der Technik.

Größere Probleme bereitete zunächst die Heizelementstumpfschweißung, wobei die Schweißung zwischen PE 100 und PE 80 genauso bewertet werden kann wie die Schweißung von PE 100-Materialien mit Werkstoffen der gleichen PEHD-Type. Hier wurde anfangs – besonders bei größeren Wanddicken – bemängelt, daß der Schweißwulst nicht wie gewohnt eine abgerundete Form annimmt, sondern eher spitze Enden besitzt.

Die in Zeitstandzugversuchen nach DVS 2203 Teil 4 ermittelten Langzeitschweißfaktoren lagen bei Markteinführung von PE 100 teilweise unter den allgemein geforderten Mindestwerten für eine HS-Schweißung von 0,8. Die heute verfügbaren Formmassen sind jedoch alle über diese anfänglichen Schwierigkeiten hinweg und erfüllen die Anforderungen ohne Einschränkung. Als Nachweis wurden durch die Rohstoffhersteller umfangreiche Untersuchungen mit verschiedenen Schweißpartnern veranlaßt, die alle eine Schweißreignung von PE 100 ergaben.

Eine Variation der Schweißzeiten nach DVS 2207 Teil 1 – insbesondere eine Verkürzung des Druckaufbaus – liefert jedoch bei den Typ 3-Formmassen (also auch für die bimodalen

PE 80 Typen) deutlich bessere Ergebnisse hinsichtlich Schweißnahtform. Hierbei handelt es sich vorwiegend um ein optisches Phänomen, da ein Einfluß der Schweißnahtform auf das Zeitstandverhalten nicht einwandfrei nachgewiesen ist. Mittlerweile wird aber auch immer mehr der „PE 100-typische Schweißwulst“ in der Praxis akzeptiert. Diese Wulstform wird zukünftig auch als Abbildung in die entsprechenden Richtlinien aufgenommen werden.

7 Zusammenfassung

Die Rohrwerkstoffe der Festigkeitsklasse PE 100 besitzen neben dem verbesserten Zeitstandverhalten gegenüber PE 80 einen höheren Widerstand gegen langsames und schnelles Rißwachstum. Dadurch werden neue Anwendungsgebiete in der Gas- und Wasserversorgung erschlossen. Das betrifft vor allem Leitungen großer Nennweite bei gleichzeitig hohen Betriebsdrücken. Damit findet weniger eine Substitution der bisher gebräuchlichen Polyethylentypen, sondern vielmehr von metallischen Werkstoffen wie Stahl und Guß statt. Unterstützt wird dieses Vordringen in neue Märkte durch die rasche Einbindung der neuen Werkstoffgeneration in die gängigen Normen und Richtlinien.

Die bekannten Eigenschaften von Polyethylen wie Chemikalienbeständigkeit, Abriebfestigkeit, Schweißbarkeit Flexibilität, geringes Gewicht und vieles mehr sind bei PE 100 ebenfalls vorhanden. Sie führen in Verbindung mit den oben genannten Verbesserungen dazu, daß PE 100 zukünftig immer mehr als Standard auch für industrielle Anwendungen oder im Abwasserdruckbereich eingesetzt wird. Unser Formteilprogramm für die Heizelementstumpfschweißung ist bereits heute komplett in PE 100 ausgeführt.