

Prüfgrundlagen und Stand der Normung für Stahlleitungs- und Kunststoffrohre

- Regelwerk mit zweierlei Maß?

H-J. Kocks

Die Auslegung von Rohrleitungen aus Polyethylen in Bezug auf Innendruck und geplanter Nutzungsdauer wird heute vielfach als „Stand der Technik“ angesehen. In Versuchen unter Innendruck bei verschiedenen Temperaturen wurden dazu die Abhängigkeiten der Alterung und damit den thermischen Abbau des Werkstoffes von der Nutzungsdauer unter Laborbedingungen bestimmt. Definitionsgemäß sind derartige, auf Umgebungseinflüsse zurückzuführende Alterungs- bzw. Abbaureaktionen dem Oberbegriff „Werkstoffkorrosion“ zuzuordnen.

Seit Jahrzehnten suchen Generationen von Korrosionsfachleuten nach Verfahren, die auf der Basis von Kurzzeituntersuchungen Langzeitaussagen über die Wirksamkeit eines Korrosionsschutzes ermöglichen. Mit Blick auf die heute gültigen Normen und Richtlinien wurde dieses Ziel offensichtlich für Polyethylen und damit insbesondere für die Auslegung von Rohrleitungen auf dieser Werkstoffbasis realisiert. Speziell bei der Auslegung von Rohrleitungen ergeben sich daher konzeptionell deutliche Unterschiede für die üblicherweise alternativ eingesetzten Werkstoffe auf Eisen- und Kunststoffbasis. Diese Unterschiede werden in diesem Beitrag angesprochen und die universelle Anwendbarkeit einer Extrapolation von Labordaten auf die Praxisbedingungen speziell beim Polyethylen kritisch hinterfragt.

1. Einleitung

Für die Unternehmen der Gas- und Wasserversorgung gewinnt die Frage einer Aktivierung von Kostensenkungspotentialen im Zuge von Liberalisierung und Privatisierung in den letzten Jahren mehr und mehr an Bedeutung. Auch der DVGW als

Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Kocks,
Wirtschaftsvereinigung Stahlrohre e.V., Düsseldorf, Februar 2004

die Interessenvertretung der Gas- und Wasserversorgung hat sich diesem Thema in verstärktem Maße angenommen. Ein wesentliches Ergebnis dieser Aktivitäten sind verschiedene inzwischen auch publizierte Gutachten, die sich mit den Möglichkeiten der Kosteneinsparung insbesondere beim Bau und Betrieb von erdverlegten Rohrleitungen, aber auch mit der Auswahl von Rohrwerkstoffen auseinandersetzen. In der Folge wurde, alternativ zum bestehenden Regelwerk für den Rohrwerkstoff Stahl, das Regelwerk rund um die Produktzertifizierung und den Einsatz von Rohren aus Polyethylen in der konventionellen, aber auch der nicht konventionellen Verlegung ausgebaut.

Die Anforderungen in den Normen und Richtlinien für die Herstellung und Anwendung der Stahlrohre basieren auf jahrzehntelangen Erfahrungen und kennzeichnen damit einen bewährten „Stand der Technik“. Dies betrifft nicht nur die Herstellung, sondern auch die Anwendung bzw. die Verlegung und den Betrieb von Stahlleitungsnetzen. So existieren beispielsweise umfangreiche Regelwerke für das Verschweißen von Stahlrohren und insbesondere die zerstörungsfreie Prüfung von Rohrverbindungen an den Baustellen. Auch der kathodische Korrosionsschutz ist hier zu nennen. Der Begriff täuscht über den Umstand hinweg, dass der kathodische Korrosionsschutz eine Instandhaltungsmaßnahme ist, die dem Betriebsverantwortlichen zu jeder Zeit Informationen über den Zustand ggf. aber auch über Fehlstellen an der Rohrleitung zu liefern vermag. Solche Fehlstellen können unter Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes punktgenau lokalisiert und im Rahmen einer längerfristigen Planung repariert werden. In den DVGW-Regelwerken ist diese Überwachbarkeit für erdverlegte Gasleitungen ab 4 bar bei Stahlrohren vorgeschrieben /1/.

Rohre und Rohrverbindungen aus Polyethylen können weder zerstörungsfrei an der Baustelle geprüft werden, noch bieten Sie die Möglichkeit einer permanenten Überwachbarkeit während des Betriebes. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass Schäden an erdverlegten Rohrleitungen primär auf Fremdeinwirkungen und unzulässigen Punktlasten bzw. Punktlagerungen zurückzuführen sind, können mit Blick auf die weit geringeren mechanischen Festigkeiten unter sicherheitstechnischen Aspekten Rohre aus Kunststoff keinesfalls auf einem mit dem Stahlleitungsrohr vergleichbaren Sicherheitsniveau angesiedelt sein.

Das Regelwerk für diese Produkte basiert damit nicht auf einem einheitlichen „Stand der Technik“ und damit einem festgelegten Sicherheitsniveau, sondern orientiert sich insbesondere was die Überprüfbarkeit und Überwachbarkeit angeht an den technischen Möglichkeiten einer Rohrleitung aus Kunststoff.

Trotz der unter Sicherheitsaspekten grundlegenden Einschränkungen bei Rohren aus Kunststoff sind Druckanwendungen bis 10 bar in den Normen und Regelwerken alternativ zum Stahlrohr vorgesehen. In der Entwicklung befinden sich Kunststoffrohrausführungen für Hochdruckanwendungen bis 16 oder gar 25 bar /2/3/. Es existieren offensichtlich auch Bestrebungen, die Wanddicken der Polyethylenrohre für Gasleitungen bis 10 bar von bisher SDR 11 (Sicherheitsbeiwert 2,0) auf SDR 17 (Sicherheitsbeiwert 1,25) zu reduzieren /4/. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Sicherheitsbeiwerte in Verbindung mit einer kalkulierten und damit theoretischen Festigkeit nach 50 Jahren angewendet werden, d.h. die Auslegung der Polyethylenrohre nach DIN 8074 bzw. 8075 erfolgt auf einen kalkulierten Versagensfall des Werkstoffes nach 50 Jahren (Abb. 1) /5/6/.

Der üblicherweise für Standardqualitäten eingesetzte Sicherheitsbeiwert beim Stahl bezieht sich hingegen auf die Mindeststreckgrenze. Unterhalb der Mindeststreckgrenze bleiben die mechanischen Eigenschaften der Stahlrohre während der gesamten, prinzipiell unbegrenzten Lebensdauer unverändert (Abb.2). Grundlage für die Betriebsdruckauslegung der Stahlrohre ist die DIN 2413 /7/.

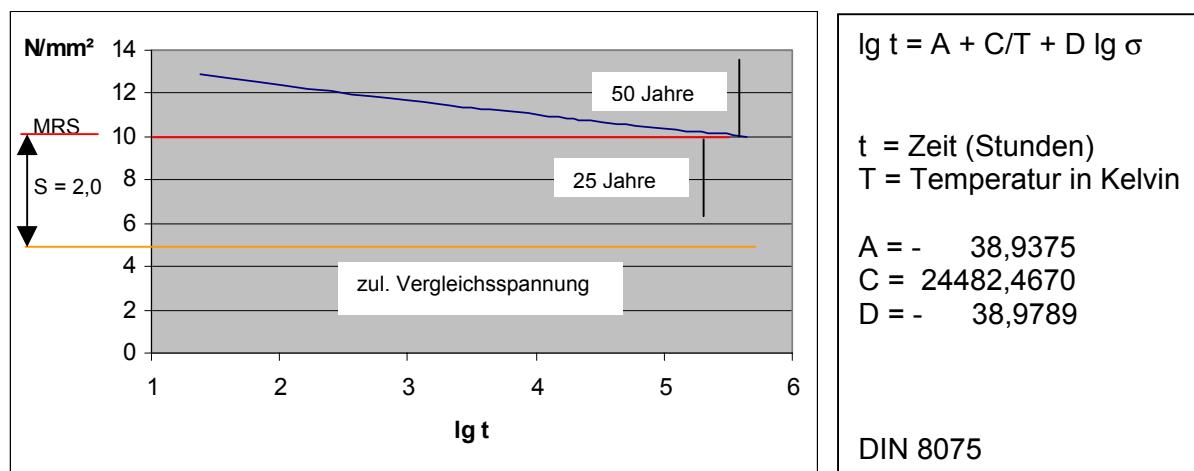


Abb.1: Ermittlung der Vergleichsspannung zur Betriebsdruckauslegung von Gasleitungen aus Polyethylen bei 20°C (PE 100)

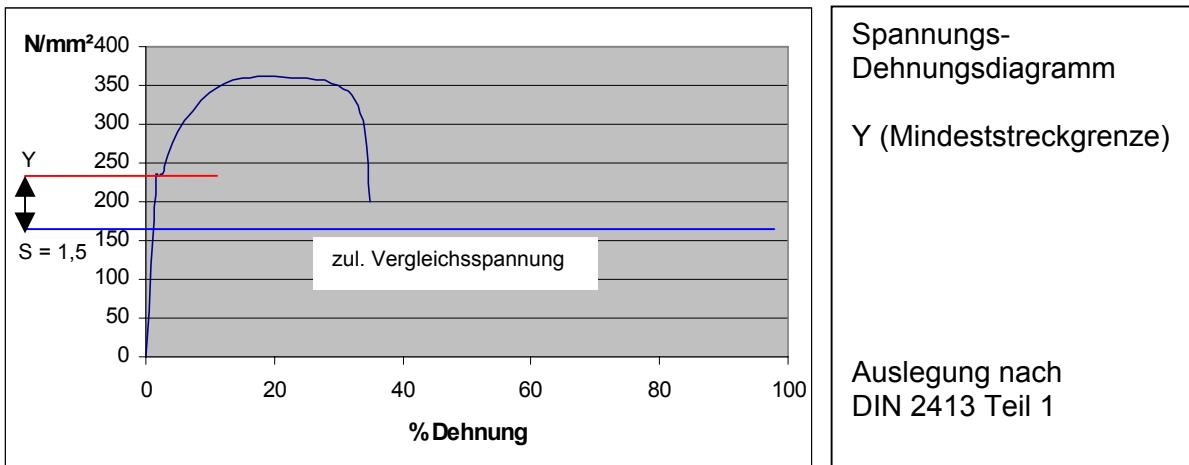


Abb. 2: Ermittlung der Vergleichsspannung zur Betriebsdruckauslegung von Gasleitungen aus Stahl nach DIN 2413 /7/ (St 37.0 bzw. L 235 GA)

Die Lebensdauer einer Stahlleitung wird primär durch die Güte des Korrosionsschutzes und die Sorgfalt bei der Verlegung bestimmt. Gleichermaßen gilt letztlich auch für Rohre aus Polyethylen. Es wäre falsch zu glauben, dass der Werkstoff Polyethylen keiner Korrosion unterliegt. Unabhängig von der Fragestellung, ob nun die Permeation von Kohlenwasserstoffen, die Licht- oder Wärmealterung oder eine Spannungsrißbildung insbesondere in Gegenwart von Netzmitteln diskutiert wird, es handelt sich in jedem Fall um Korrosionserscheinungen des Polyethylens. Der Einsatz von Stabilisatoren beispielsweise stellt einen Korrosionsschutz dar, der maßgeblich die Zeitstandsfestigkeit des Polyethylens beeinflusst /8/. Zeitstandsuntersuchungen sind Korrosionsuntersuchungen. Im Falle der Polyethylenrohre wird konzeptionell davon ausgegangen, dass mit Hilfe von Kurzzeituntersuchungen Langzeitaussagen für die Praxis des erdverlegten Rohrleitungsbau möglich sind. Es ist schon bemerkenswert, wenn heute die Auslegung der Kunststoffrohre auf der Basis von Labordaten eine derartige Bedeutung erlangt hat.

So werden auch die Anforderungen in den Regelwerken mehr und mehr auf diese Vorgehensweise abgestimmt. Dazu zählen beispielsweise Lebensdauerstatistiken zur Rehabilitationsplanung wie sie im Anhang zum DVGW-Arbeitsblatt G 401 aufgenommen wurden. Bei Rohren aus Eisenwerkstoffen basieren diese Statistiken maßgeblich auf vorhandene Erfahrungen, während beim Kunststoffrohr die erwartete Lebensdauer an der Zeitstandsuntersuchung nach DIN 8075 ausgerichtet ist /9/10/. Diese Vorgehensweise der

DIN 8075 wird heute auch auf die Untersuchung von Einflüssen äußerer Spannungen, wie sie bei der nicht konventionellen Rohrverlegung oder beim Abquetschen von Rohrleitungen auftreten, angewendet.

Der Vorteil der Untersuchungen bei 80°C ist darin zu sehen, dass Ergebnisse nach relativ kurzer Zeit vorliegen. Diese Ergebnisse werden durch Extrapolation auf den zukünftigen Anwendungstemperaturbereich von 0 bis 10°C übertragen. Die Literatur zeigt jedoch, dass für die Anwendung dieses Extrapolationsverfahrens bestimmte Randbedingungen erfüllt sein müssen. Zu diesen Randbedingungen zählt unter anderem auch ein gleichbleibendes Spannungs- und Dehnungsverhalten des Polyethylen im betrachteten Temperaturintervall /11/. Die Gültigkeit dieser sehr wesentlichen Bedingung wird auf der Basis folgender Untersuchungsergebnisse diskutiert.

2. Die Beziehung von Temperatur und Spannung beim Polyethylen

Für diese Untersuchungen stand ein Polyethylenrohr der Materialgüte PE 100 der Dimension DN 200 (Da 225 mm) in der Wanddickenklasse SDR 11 zur Verfügung. Das Rohr hatte etwa 1,5 Jahre im Außenlager gelegen (Abb. 3). Aus der Mitte des Rohres wurden Segmente mit einer Breite von 10 cm herausgetrennt. Eines der Segmente wurde in der Rohrlängsachse geschnitten.



Abb. 3: Proberohr, PE 100, DN 200, SDR 11, Lagerungsdauer im Außenlager 1,5 Jahre

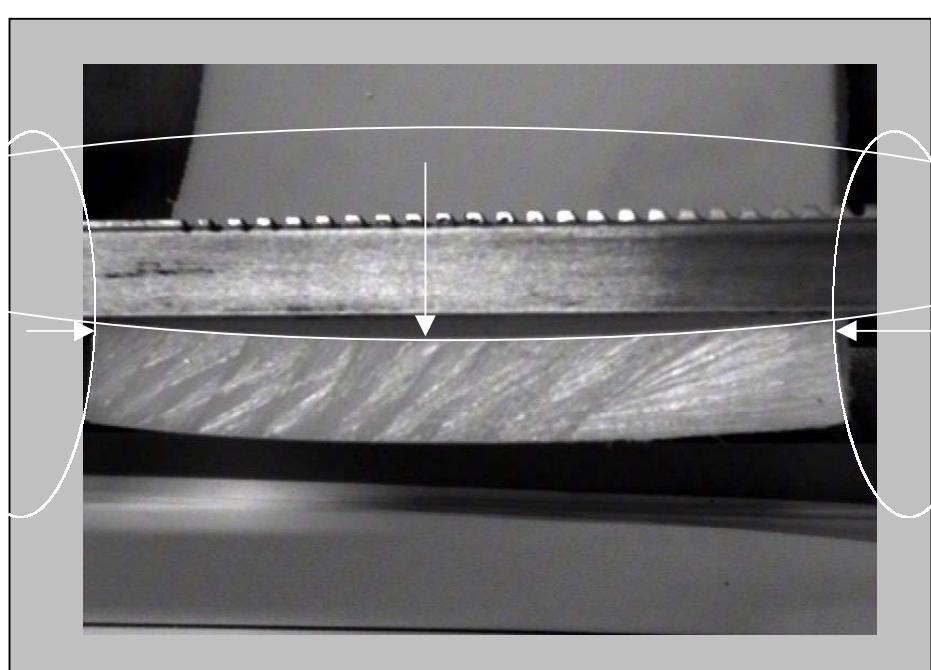
Der rechteckige Querschnitt der Rohrwand ist in Abb. 4 dokumentiert.

Abb. 4: Rechteckig geformter Rohrwandquerschnitt des in der Längsachse geschnittenen Rohrsegmentes



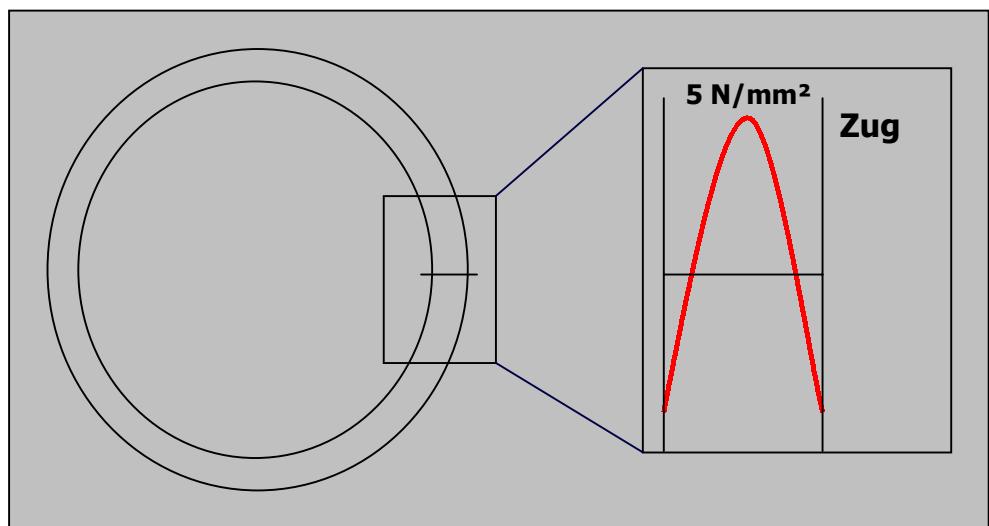
Ein weiteres Rohrsegment wurde daraufhin bei 65°C im Wärmeschrank 24 Stunden ausgelagert. Bereit nach 3 Stunden hatte sich das Rohrsegment soweit verformt, dass im Verlaufe der folgenden Stunden keine Veränderungen mehr festgestellt werden konnten. Den Querschnitt über die Rohrwand in der Längsachse zeigt Abbildung 5. Die aufgelegte gezähnte Leiste verdeutlicht die Krümmung der Rohrwandung.

Abb. 5: Rohrwandquerschnitt nach 24stündiger Auslagerung bei 65 °C



Die beiden Enden des Segmentes weisen Verformungen auf, wie sie von neu gelieferten Polyethylenrohren bekannt sind. Ursache dieser Verformung sind Eigenspannungen, wie sie schon früher für Rohre aus PE 63 in der Literatur beschrieben wurden /12/. Potente et al. berichtete über Eigenspannungen in Längs- und Umfangsrichtung. Bei der Untersuchung der Eigenspannungen in Umfangsrichtung wurden dabei Werte von bis zu 5 N/mm^2 gefunden (Abb. 6). Diese Eigenspannungen entsprechen lokal bereits etwa 80 % der geforderten Mindestfestigkeit dieses Rohrwerkstoffes. Diese Eigenspannungen sind damit zwar auf einen engen Bereich begrenzt, müssten jedoch im Falle einer Innendruckbeanspruchung Berücksichtigung finden.

Abb. 6: Untersuchung von Eigenspannungen in Rohren aus PE 63 nach Potente /12/



Die im folgenden beschriebenen Untersuchungen dienten jedoch nicht der Frage einer Quantifizierung der Eigenspannungen von Polyethylenrohren. Die Eigenspannungen wurden nur dazu genutzt, die Wirkung von Spannungen bei unterschiedlichen Temperaturen zu untersuchen. Die Auslagerung der Proben erfolgte jeweils bei 25°C , 40°C , 65° , 80°C und 100°C , bis keine weitere Verformung mehr festzustellen war. Durch das Anlegen der Tangente wurde die sich ergebende Krümmung des Rohrsegmentes (H) ermittelt (Abb. 7).

Das Ergebnis dieser Untersuchungsreihe zeigt Abbildung 8. Oberhalb einer Temperatur von 65°C wurde immer die gleiche Krümmung des Rohrsegmentes festgestellt. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die hier untersuchten Eigenspannungen primär auf lokal unterschiedliche Abkühlungsgeschwindigkeiten bei der Rohrherstellung zurückzu-

führen sind, wären aufgrund des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten auch oberhalb von 65°C noch deutliche Formänderungen zu erwarten. Offensichtlich ist jedoch PE 100 oberhalb von 65°C in der Lage, Spannungen durch Fließvorgänge vollständig abzubauen. Bei Temperaturen unterhalb von 65°C nimmt diese Fähigkeit des Werkstoffes drastisch ab. Die Ergebnisse lassen erwarten, dass bei den Temperaturen der Rohrleitungspraxis unterhalb von 10°C einmal initiierte Spannungen im Werkstoff verbleiben.

Abb. 7: Ermittlung
der Rohrkrümmung
 H (mm)

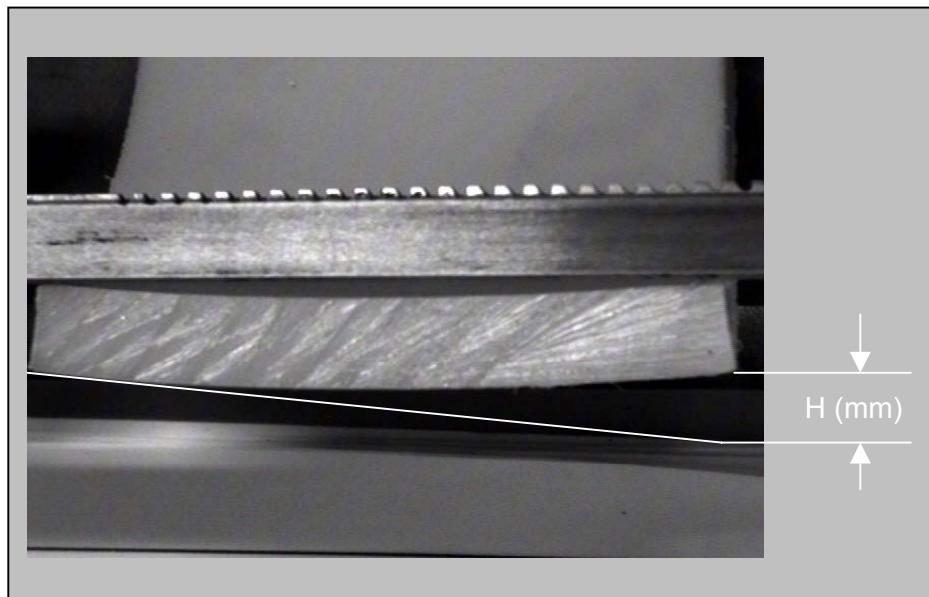
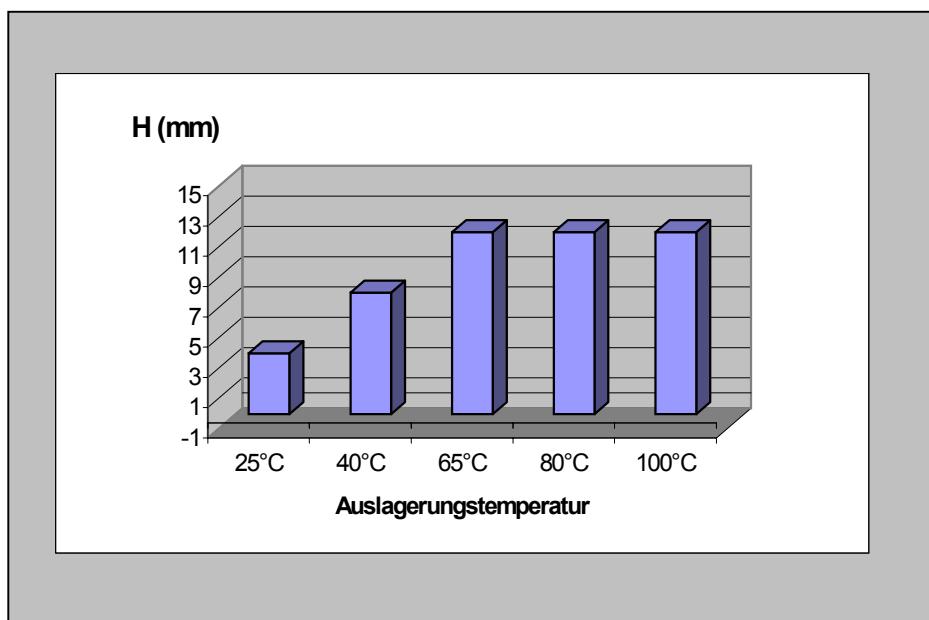


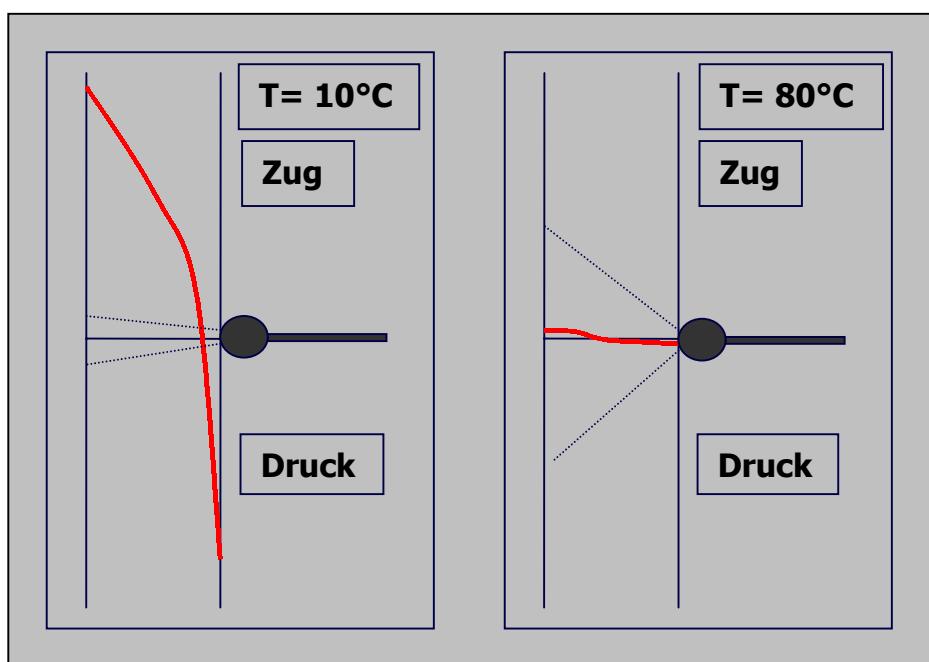
Abb. 8: Verformung
der Rohrsegmente
in Abhängigkeit von
der Auslagerungs-
temperatur.



3. Diskussion der Ergebnisse

Aus den hier beschriebenen Untersuchungen ergeben sich grundsätzlich Zweifel, ob die Wirkung äußerer Spannungen, wie beispielsweise Quetschungen oder Punktlasten bei Temperaturen von 80°C in Zeitstandsuntersuchungen überhaupt erfasst und damit beurteilt werden können. Die beispielsweise aus einer Punktlast resultierende Spannung führt demnach bei 10°C zu erheblichen Zugspannungen an der Rohrinnenseite und entsprechenden Druckspannungen an der Rohraußenseite. Diese Spannungen würden bei einer Versuchstemperatur von 80°C vollständig abgebaut (Abb. 9).

Abb. 9: Spannungsverteilung über die Rohrwandung im Falle einer Punktlast



Diese Erkenntnis steht im Widerspruch zu den bisher publizierten Aussagen über die Mindestlebensdauer von Polyethylenrohren unter Einwirkung von Punktlasten /13/14/. Eine genauere Betrachtung zeigt jedoch, dass die dort publizierten Untersuchungsergebnisse auch eine Deutung im Sinne der hier beschriebenen Phänomene zulassen. So wurde in den bereits publizierten Untersuchungen die Punktlast nicht bei 80°C, sondern bei 20°C aufgebracht. Es ist nicht ausgeschlossen, dass Mikrorisse bei 80°C unter den dort gewählten Bedingungen gar nicht initiiert werden. Werden die unter Punktlast bei 20°C erzeugten Spannungen bei der anschließenden Erhöhung der Temperatur abgebaut, verbleibt bei der Zeitstandsuntersuchung unter

Innendruck bei 80°C in Wasser mit 2%igem Arkopalzusatz eine Spannung von 4 N/mm². Eine Änderung der Zeitstandsfestigkeit in Abhängigkeit von den wesentlichen Einflussgrößen einer Punktlast wie die Stempelradien oder die Eindringtiefe ist unter solchen Voraussetzungen nicht zu erwarten und wurde letztlich auch nicht beobachtet /14/. Eine Korrelation der Punktlastergebnisse mit dem FNC-Test ist naheliegend, da sich die Testverfahren praktisch nur durch die Geometrie der Vorschädigung unterscheiden (Tab. 1).

Tab. 1: Vergleich der Versuchsparameter von FNC-Test und
Punktlastuntersuchung nach /13/14/

Versuchsparameter	FNC-Test	Punktlastuntersuchung
Temperatur		80°C
Vergleichsspannung		4 N/mm ²
Medium		Wasser/2% Arcopal
Vorschädigung	Kerbe	Mikrorisse durch die Punktlast bei 20°C

Die publizierten Untersuchungsverfahren sind aus heutiger Sicht sicher geeignet, vergleichende Aussagen über verschiedene Produktionschargen eines Polyethylentyps zu ermöglichen. Eine Korrelation mit den Bedingungen der Praxis verbunden mit einer Nutzungsdauerprognose ist jedoch fragwürdig.

5. Schlussfolgerungen - Konsequenzen für das Regelwerk

Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte am Beispiel der Eigenspannungen in Rohren aus PE 100 gezeigt werden, dass je nach Temperatur ein unterschiedliches Spannungs-Dehnungsverhalten des Werkstoffes zu berücksichtigen ist. Während bei den Temperaturen der Praxis die Eigenspannungen erhalten bleiben, werden diese bei Temperaturen über 65°C offensichtlich abgebaut. In Bezug auf die vorliegenden Eigenspannungen in den Rohren stellt sich die Frage, ob eine Betriebsdruckauslegung entsprechend DIN 8074 ohne Einschränkungen überhaupt zulässig ist. Bei Temperaturen unterhalb von 65°C sind keine Eigenspannungen, geschweige denn Spannungen, wie sie

sich in der Praxis aufgrund von Biegungen oder Verformungen ergeben, berücksichtigt. Hier könnte auch die wesentliche Ursache für die Diskussionen rund um den Prüfdruck von Wasserrohren aus PE 100 speziell in der Wanddickenklasse SDR 17 zu sehen sein /15/. So bestehen deutliche Widerstände gegen die bisher übliche Praxis im Falle des standardmäßig vorgesehenen Systembetriebsdrucks in der Wasserverteilung von 10 bar, einen Baustellenprüfdruck von 15 bar vorzusehen. Angesichts der Festigkeitsreserven beim PE 100 sind die offensichtlichen Bedenken kaum verständlich, mit Blick auf vorhandene Eigenspannungen in den Rohren aber erklärbar.

Im Falle äußerer Spannungen ist die Zulässigkeit einer Extrapolation aus Daten der Zeitstandsuntersuchungen nicht nur bei Punktlasten, sondern beispielsweise auch beim Abquetschen von Rohrleitungen kritisch zu hinterfragen. So wurde in Zeitstandsuntersuchungen bei 80°C nachgewiesen, dass ein Abquetschen von Rohren keinen Einfluss auf die Zeitstandsfestigkeit hat /16/. Auf der Basis solcher Untersuchungen wurde das Abquetschen von Rohren aus Polyethylen in das DVGW-Regelwerk aufgenommen und damit zum „Stand der Technik“ erhoben /17/. Verbleiben jedoch unter den Praxisbedingungen die Spannungen im Quetschbereich, haben die dem Arbeitsblatt zugrunde gelegten Zeitstandsuntersuchungen bei 80°C keine Aussagekraft.

Ein vergleichbares Bild liefert die Anforderung an Stumpfschweißverbindungen der Polyethylenrohre lt. DVGW-Arbeitsblatt G 472 /18/. Danach sind Stumpfschweißnähte von Polyethylenrohren möglichst spannungsfrei auszuführen. Angesichts der Tatsache, dass Stumpfschweißverbindungen lt. DVS-Vorschrift bei 80°C im Zeitstandsversuch letztlich spannungsfrei bewertet werden, ist diese Forderung zwar verständlich, doch mit Blick auf Eigenspannungen und/oder Spannungen aus Verformungen und Biegungen in der Praxis kaum zu realisieren /19/. So wurde beispielsweise aktuell ein Schweißverfahren anhand dieser DVS-Vorschrift bei 95°C geprüft /20/. Auch hier wäre zu berücksichtigen, dass die je nach Schweißverfahren eingebrachten und mit Blick auf die Qualität einer Schweißnaht bedeutenden Spannungen bei Temperaturen über 65°C während der Prüfung abgebaut und nicht erfasst werden. Ob ein Schweißverfahren auf der Basis dieser DVS-Vorschrift beurteilt werden kann, ist in Frage zu stellen.

Die bereits diskutierten Ergebnisse der Punktlastuntersuchungen sind inzwischen in verschiedene Arbeitsblattentwürfe des DVGW eingeflossen. Dazu zählt beispielsweise das DVGW-Arbeitsblatt GW 323 /21/. Eines der dort beschriebenen Verfahren behandelt das Bersten vorhandener Graugussleitungen, wobei die Scherben im Trassenbereich verbleiben. In das mit Scherben durchsetzte Erdreich werden Kunststoffrohre, z.T. mit äußerem Schutzmantel eingezogen. Dieser äußere Schutzmantel verhindert sicher die Riefenbildung am Kernrohr beim Einzug. Da jedoch Risse unter Punktlast an der Rohrinnenseite entstehen, kann der äußere Schutzmantel die Rohre langfristig nicht vor Schäden bewahren. Das Arbeitsblatt verweist zur Rechtfertigung dieser Vorgehensweise auf die Erkenntnisse der bereits in Frage gestellten Punktlastuntersuchungen. Wie die Frage der Punktlasten bei Kunststoffrohren mit Blick auf andere grabenlose Bauverfahren zu bewerten ist, müsste in diesem Zusammenhang ebenfalls geklärt werden.

Gleiches gilt für die derzeit geführten Diskussionen rund um die Einsparung einer Sandbettung bei Rohren aus Polyethylen /14/15/. Dabei wird gern übersehen, dass eine Sandbettung nicht nur zur Vermeidung von Punktlasten vorgeschrieben ist. Eine Bettung hat auch statische Aufgaben. Dazu muss zwangsläufig eine einheitliche Verdichtung vorliegen. Dies erfordert entweder das Unterstopfen der Rohre oder, wenn ein Unterstopfen mangels Rohreigengewicht nicht möglich ist, den Einsatz von Bettungsmaterialien, die der Silotheorie gehorchen. Nur so kann nach einer Verfüllung bis oberhalb des Rohrscheitels bei der Verdichtung das Bettungsmaterial bis in den Zwickelbereich der Rohre gelangen.

Angesichts der hier angesprochenen Beispiele wird deutlich, dass derzeit beim Kunststoffrohr für den erdverlegten Rohrleitungsbau mit der „Regel der Technik“ ein „Stand der Technik“ formuliert wird, der zumindest fragwürdig ist. Neben den oft nur unzureichend berücksichtigten Randbedingungen der Praxis werden diesen Regeln der Technik extrapolierte Labordaten aus Zeitstandsuntersuchungen zugrunde gelegt, die unter Berücksichtigung eines je nach Temperatur sehr unterschiedlichen Spannungs- bzw. Dehnungsverhaltens für das Polyethylen unter Umständen gar nicht zulässig sind.

6. Ausblick

Auf der Basis der hier vorgestellten Voruntersuchungen werden die beschriebenen Phänomene in Forschungsvorhaben verschiedener Institute weiter verfolgt. Die schon vor Jahrzehnten publizierten Erkenntnisse in Bezug auf Eigenspannungen und Abhängigkeiten des Zeitstandsverhaltens von den Spannungszuständen der Probekörper und damit das Spannungs- bzw. Dehnungsverhalten bei den verschiedenen Temperaturen wird dazu an den heute gängigen Rohrmaterialien überprüft. Dabei werden auch neue Messverfahren zum Einsatz kommen, um die hier beschriebenen Beobachtungen wissenschaftlich zu untermauern.

7. Literatur

1. DVGW-Arbeitsblatt G 462 Entwurf; „Gasleitungen aus Stahlrohren bis 16 bar Betriebsdruck – Errichtung“, Ausgabe 4/2003
2. Veenker, M.; Lührsen, H.; „Der Einsatz von Armierten Kunststoffrohren großen Durchmessers im Hochdruckbereich von 100 bar“, 39 3r international (2000) 170f
3. Wessing, W.; „„Dickhäuter“ machen Gastransport wirtschaftlicher“ Gasette, April/2003 Seite 40f
4. Grass, K.; „Erfahrungen eines Gasversorgers mit Rohrsystemen aus Polyethylen“, gwf Gas-Erdgas 144 (2003) 359f
5. DIN 8074; „Rohre aus Polyethylen – PE63, PE 80, PE 100, PE-HD – Maße“, Ausgabe 8/1999
6. DIN 8075; „Rohre aus Polyethylen – PE63, PE 80, PE 100, PE-HD – Allgemeine Güteanforderungen, Prüfung“, Ausgabe 8/1999
7. DIN 2413 Teil 1; „Stahlrohre – Berechnung der Wanddicke von Stahlrohren gegen Innendruck“, Ausgabe 10/1993
8. Dörner, G.; Lang, R.W.; „Stabilisatoreinflüsse auf das Alterungs- und Zeitstandsverhalten von Rohren aus PE-MD“, 3r international 36 (1997) 672f
9. DVGW-Arbeitsblatt G 401; „Entscheidungshilfen für die Rehabilitation von Gasverteilungsnetzen“, Ausgabe 09/1999

10. Kittl, M.; „Rehabilitationskonzepte für Erdgas- und Trinkwasserversorgungsnetze“, gwf Gas – Erdgas 141 (2000) 388f
11. Fischer, F.; „Zeitstand- und Spannungsrißverhalten von Polyethylen, Polypropylen, Polystyrol, Polyvinylchlorid und Polyamid“, Gummi Asbest Kunststoffe 21 (1968) 112f
12. Potente, H.; de Zeeuw, K.; Braches, E.; „Eigenspannungen in Rohren aus Polyethylen hoher Dichte“, Schweißen und Schneiden 31 (1979) 101f
13. Hessel, J.; „Mindestlebensdauer von erdverlegten Rohren aus Polyethylen ohne Sandbettung - Teil 1 –“, 3r international 40 (2001) 178f
14. Hessel, J.; „Mindestlebensdauer von erdverlegten Rohren aus Polyethylen ohne Sandbettung - Teil 2 –“, 3r international 40 (2001) 360f
15. Jahresbericht des KRV 2002, Seite 21 „Druckprüfungen“
16. van Ingen, W. M.; Kittl, M.; „Errichtung von 10 bar Gashochdruckleitungen aus PE 100 nach dem überarbeiteten DVGW-Arbeitsblatt G 472“, gwf Gas-Erdgas 140 (1999) 104f
17. DVGW-Merkblatt GW 332; „Abquetschen von Rohrleitungen aus Polyethylen in der Gas- und Wasserverteilung“, Ausgabe 9/2001
18. DVGW-Arbeitsblatt G 472; „Gasleitungen bis 10 bar Betriebsdruck aus Polyethylen (PE 80, PE 100 und PE-Xa) – Errichtung“, Ausgabe 8/2000
19. DVS 2203-4; „Prüfen von Schweißverbindungen an Tafeln und Rohren aus thermoplastische Kunststoffen – Zeitstand-Zugversuch –“, Ausgabe 7/1997
20. Scholten, F.L.; Oesterholt, D.; „Neues kostengünstiges Verfahren für das Stumpfschweißen von PE-Rohren“, 3r international 42 (2003) 620f
21. DVGW-Arbeitsblatt GW 323 Entwurf; „Grabenlose Erneuerung von Gas- und Wasserversorgungsleitungen durch Berstlining; Anforderungen, Gütesicherung und Prüfung“, Ausgabe 8/2003