

# Close-Fit-Liner – Verfahrensbedingte Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften und des Rohrlangzeitverhaltens<sup>1)</sup>

## Close-Fit-Lining – Process-related changes of material properties and long-term failure behavior<sup>1)</sup>

Von A. Frank, M. Haager, A. Hofmann, G. Pinter

*Der Einsatz von Close-Fit-Linern aus Polyethylen stellt bereits seit vielen Jahren ein effizientes Verfahren zur raschen und kostengünstigen Sanierung von Altrohrsystemen dar. Im Rahmen der vorgestellten Arbeit erfolgte eine umfangreiche werkstoffkundliche Charakterisierung eines kommerziell erhältlichen PE 100-Close-Fit-Liners, wobei stets der Vergleich der Eigenschaften vor der Faltung zum Close-Fit-Liner mit jenen des Endproduktes des installierten Rohres im Mittelpunkt stand. Die präsentierten Ergebnisse zeigen durchweg, dass relevante Eigenschaften im Rohrmaterial durch die für das Close-Fit-Liner-Verfahren typischen Deformationsprozesse und zusätzlichen thermischen Belastungen nicht negativ beeinflusst werden. Die Verringerung des Eigenspannungszustandes im installierten Endzustand des Rohres bewirkt sogar eine Verbesserung im Widerstand des Materials gegenüber Rissinitiierung und langsamem Risswachstum, so dass insgesamt von einer verbesserten Langzeiteigenschaft des rückverformten Close-Fit-Liners ausgegangen werden kann.*

*For many years the Close-Fit-Relining technology with polyethylene pipes has been an established and efficient technology for a quick and cost-saving rehabilitation of old pipe systems. Within the current study a comprehensive material characterization of a commercially PE 100 Close-Fit-Liner was done, in which the main focus always was given on a correlation of the material properties of the pipe before the deformation to the Close-Fit-Liner and those of the final pipe. The presented results show, that the typical deformation processes and the additional thermal treatment have no negative effect on the relevant material properties. The reduction of the residual pipe stresses in the final pipe even results in an increase of the resistance of the pipe material against crack initiation and slow crack growth, so that all in all an improved long-term failure behavior can be expected.*

### Einleitung

Unterirdisch verlegte Rohrleitungen spielen eine unauffällige, jedoch sehr wichtige Rolle in der Sicherstellung unserer modernen Infrastruktur und unseres hohen Lebensstan-

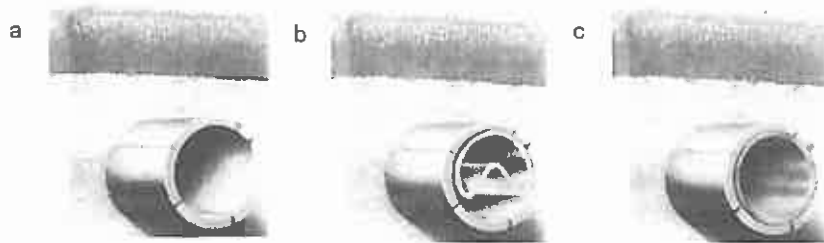
dards. In Abhängigkeit zu den auftretenden Belastungen und den zu transportierenden Medien kommen eine Reihe unterschiedliche Materialien zum Einsatz und speziell im Bereich der Gas- und Wasserversorgung sowie im Abwassertransport werden Rohre aus Polyethylen (PE) bereits seit mehr als 50 Jahren erfolgreich eingesetzt [1-4].

Aufgrund ihrer langen Betriebszeiten sowie der unmittelbaren Nähe zu stark bewohnten Regionen ist die Zuverlässigkeit der Rohrsysteme gegen relevante Versagensmechanismen

für alle verwendeten Werkstoffkategorien von wesentlicher Bedeutung. Viele seit Jahrzehnten verwendete Rohrleitungen nähern sich jedoch dem Ende ihres geplanten Einsatzes und müssen renoviert oder erneuert werden. Speziell in städtischen Regionen sind solche Sanierungs- oder Reparaturarbeiten alter Rohrsysteme mit enormem technischen Aufwand und beträchtlichen Kosten verbunden. Aus diesen Gründen entwickelten sich bereits in den späten Achtzigerjahren verschiedenste Methoden zur grabenlosen Rohrsanierung, die eine deutliche Einsparung von Zeit und Kosten bei der Sanierung von Altrohrsystemen ermöglichten [5]. Eine wichtige und etablierte Technologie stellt dabei das Close-Fit-Lining mit PE-Rohren dar. Dabei wird ein konventionell hergestelltes PE-Rohr nach dem Extrudieren zur Querschnittsreduktion gefaltet, in das zu sanierende Altrrohr eingezogen und anschließend durch Erwärmung und unter Nutzung des für Kunststoffe typischen Memory-Effektes und zusätzlichem Überdruck wieder rückdeformiert. Das installierte Rohr legt sich dabei spaltfrei an das Altrrohr an („close-fit“).

Im Gegensatz zu konventionell extrudierten und verlegten PE-Rohren stellen die fertigungstechnischen Schritte der Faltung des PE-Rohres zum Close-Fit-Liner und die spätere Rückdeformation zum Ursprungsquerschnitt beträchtliche zusätzliche thermische und mechanische Beanspruchungen des Rohrmaterials dar. Es ist davon auszugehen, dass sich Veränderungen in morphologischen Eigenschaften wie Kristallinität, Orientierungen, in der Stabilisierung des Materials hinsichtlich thermisch bedingter Alterung, in den mechanischen Eigenschaften und Eigenspannungen oder dem Widerstand gegen Rissinitiierung und langsames Risswachstum

1) Der Beitrag basiert auf einem Vortrag des Erstautors am Symposium Grabenlos 2009 der OGL (Österreichische Vereinigung für grabenloses Bauen und Instandhalten von Leitungen) am 20./21. Oktober 2009 in Loipersdorf (Österreich).



**Bild 1:** Schematische Darstellung der Installation eines CFL. a) Altrrohr b) Altrrohr mit eingezogenem CFL c) Altrrohr mit rückdeformiertem CFL [6]

**Fig. 1:** Schematically illustration of the installation of a CFL. a) Old pipe b) Old pipe with inserted CFL c) Old pipe with reformed CFL [6]

einstellen. Unter dem Aspekt, dass mit dem sanierten Rohr Betriebszeiten von 50 Jahren und mehr sichergestellt werden sollen, ist die Frage, wie sich der Rohrwerkstoff durch diese Verfahrensschritte verändert, daher mehr als berechtigt.

Um die Anforderungen bezüglich Materialeigenschaften und vor allem Rissbeständigkeit sicherzustellen, kommen heute in erster Linie moderne PE-Rohrmaterialien mit bimodaler Molmassenverteilung zum Einsatz. Obwohl eine Vielzahl an Studien über die morphologischen und thermomechanischen Eigenschaften von PE für Rohranwendungen existiert, gibt es keine Informationen über die Auswirkungen der beim Close-Fit-Liner-Verfahren typischen Deformationsvorgänge auf die entsprechenden Materialeigenschaften, weshalb das Hauptziel der vorliegenden Arbeit in einer ausführlichen Charakterisierung des Einflusses der Deformation und der späteren Rückdeformation eines Rohres auf die Eigenschaften des Close-Fit-Liners lag. Dabei wurden morphologische Veränderungen wie Kristallinitätsgrad und Orientierungen ebenso untersucht, wie Veränderungen im Eigenspannungszustand der Rohre oder in der Stabilisierung gegen oxidative Alterung sowie im, für die Lebenszeitabschätzung kritischen, Langzeit-Versagensverhalten der Rohre.

## Grundlagen

Für die Herstellung des Close-Fit-Liners (CFL) wird ein konventionelles Rohr üblicherweise direkt in der Extrusionslinie unter kontrollierten Temperatur- und Belastungsbedingungen gefaltet, wodurch eine Querschnittsreduktion von etwa 30 % erreicht wird. Die gefalteten Rohre werden dann auf Haspeln gerollt, wo sie bis zur Installation zwischengelagert werden.

Bei der Installation des CFL werden nach dem Einziehen in das Altrrohr beide Enden verschlossen und am Rohranfang (A-Station) Wasserdampf mit einer Temperatur von ca. 110 °C eingeleitet. Ziel ist es, eine Rohraußenwandtemperatur am Rohrende (B-Station) von ca. 80 °C zu erreichen und

diese für ca. 2 Stunden lang aufrecht zu halten. Um eine gleichmäßige Temperierung der gesamten Rohrstrecke sicherzustellen, wird während der gesamten Prozedur die Temperatur an der B-Station gemessen und an der A-Station geregelt. Aufgrund der im Material eingefrorenen Orientierungseigenspannungen relaxiert der CFL und erhält annähernd seinen kreisrunden Querschnitt zurück (Memory-Effekt). Anschließend erfolgt ein dimensionsabhängiger Druckaufbau, wodurch eine eng anliegende Passung an das stützende Altrrohr gewährleistet wird. Nachdem ein dimensions- und temperaturspezifische Druck erreicht wurde, wird mit der schrittweisen Kühlung begonnen. Dazu wird Kompressorluft in die Haltung eingeleitet und der Druck, in Abhängigkeit von der Temperatur, bis zu einem dimensionsabhängigem Maximalwert gesteigert. Unter diesem Druck wird der Liner weiter abgekühlt [6].

Basierend auf den beschriebenen zusätzlichen Deformationsprozessen muss mit Änderungen in verschiedenen Materialeigenschaften gerechnet werden. Speziell an den Umfaltungspunkten treten beim Falten des konventionellen Rohres hohe mechanische Kräfte auf, die in Abhängigkeit des Deformationsgrades zu unterschiedlich ausgeprägten Orientierungseffekten führen können. Die lange thermische Belastung von 80 °C über mehrere Stunden [6] stellt im weitesten Sinn einen Tempervorgang dar, der einerseits Orientierungen ebenso abbauen lässt wie produktionsbedingte Rohreigenspannungen [7]. Andererseits verändert ein nachträgliches Tempern in der Regel die Kristallinität im Material und wegen der langen thermischen Belastung weit oberhalb der eigentlichen Anwendungstemperatur muss auch die Stabilisierung gegen thermo-oxidative Materialalterung berücksichtigt werden. Alle Eigenschaften spielen in weiterer Folge eine wesentliche Rolle im Langzeiteinsatz der Rohrleitungen und im Widerstand gegenüber den kritischen Versagensmechanismen der Rissinitiation und des langsamen Risswachstums.

## Experimentelles

Um den Einfluss der Deformationsprozesse auf die untersuchten Eigenschaften zu ermitteln wurden unterschiedliche Zwischenzustände des CFL hergestellt. Ein Rohr, das in seinem konventionellen Zustand belassen wurde, diente als Referenz sowohl für den Zwischenzustand eines deformierten CFL, als auch für den Endzustand des rückdeformierten CFL. Die Rohre, die aus einem handelsüblichen PE 100-Rohrmaterial mit einer erforderlichen Mindestfestigkeit („minimum required strength“, MRS) von 10 MPa hergestellt wurden, wiesen eine Dimension von DN 180 mm, SDR 17 auf. Die Herstellung der Rohre und die Deformation zum CFL erfolgte durch AGRU Kunststofftechnik GmbH (Bad Hall, A). Die installationsgerechte Rückdeformation erfolgte durch RABMER Bau- und Installations GesmbH & Co.KG (Altenberg, A).

Unter Berücksichtigung der während des Faltungsprozesses am meisten beanspruchten Positionen wurden entsprechend **Bild 1** fünf charakteristische Punkte zur Prüfkörperentnahme definiert. Position 1 ist demnach der Bereich, an dem die Rohrwand bei der Faltung quasi nach außen umgeklappt wird und wo somit die stärksten geometrischen Änderungen auftreten. Die symmetrischen Positionen 2 und 3 stellen Scheitelpunkte dar, bei denen sich der Rohrradius während der Faltung stark verringert. Die ebenfalls symmetrischen Positionen 4 und 5 hingegen sind von den mechanischen Faltvorgängen nahezu unbeeinflusst. Aus den definierten Positionen wurden durch temperaturschonendes Fräsen Quader entnommen, aus denen in weiterer Folge je nach Charakterisierungsmethode die Prüfkörperfertigung erfolgte.

Für die Bestimmung des Kristallinitätsgrades [8] wurden an unterschiedlichen Wandtiefenpositionen mit einem Mikrotom (R. Jung, D) Schichten von ca. 30 µm Dicke von der Rohraußenseite, der Rohrmitte und der Rohrinnenseite entnommen. Der Kristallinitätsgrad  $\alpha$  wurde mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) mit einem Messgerät vom Typ DCC822 (Mettler Toledo GmbH, CH) in einem Temperaturbereich von 25 bis 180 °C und einer Aufheizrate von 10 K/min gemessen, wobei die Berechnung von  $\alpha$  mit einem Literaturwert für die Enthalpie eines PE mit einer theoretischen Kristallinität von 100 % von  $\Delta H_{m0}=293 \text{ J/g}$  [8, 9] erfolgte.

Die Bestimmung von Orientierungseffekten erfolgte über die Messung der linearen thermischen Wärmeausdehnung  $\Delta l$ , wofür ein Dilatometer vom Typ TMA/SDTA840 (Mettler Toledo GmbH, CH) verwendet wurde. Hierfür wurden durch temperaturschonendes Fräsen an der Außen- und der Innenseite der Rohre Quader von 4 x 4 x 6 mm entnommen, wobei die lange Dimension in Umfangsrichtung lag, in der die Messung von  $\Delta l(T)$  in einem Tem-

peraturbereich von 25 bis 120 °C bei einer Aufheizrate von 2 K/min erfolgte [10].

Die thermo-oxidative Materialalterung bzw. die Charakterisierung des Stabilisierungszustandes des Rohrmaterials erfolgte über die Messung der Oxidations-Induktionszeit (OIT) und Infrarot (IR)-Spektroskopie. Die Prüfkörperherstellung erfolgte analog zu jener der DSC. Die Bestimmung der OIT erfolgte bei einer Temperatur von 210 °C in Luft mit dem oben erwähnten DSC-Prüfgerät [11]. Die IR-Spektroskopie wurde an einem Gerät vom Typ Spektrum GX (Perkin Elmer, D) im ATR-Verfahren („attenuated total reflection“, abgeschwächte Totalreflexion) durchgeführt.

Die Bestimmung der Rohreigenspannungen in Umfangsrichtung  $\sigma_{E,u}$  erfolgte über das Ringschlitzverfahren [2, 7, 12]. Hierfür wurden Rohrsegmente mit einer Länge von 80 mm freigeschnitten und aus der unbehinderten Deformation die Eigenspannung berechnet. Die Messung der Rohreigenspannungen in Axialrichtung  $\sigma_{E,a}$  wurde mit dem Streifenkrümmungsverfahren [12, 13] durchgeführt, wofür Streifen von 250 mm Länge und 5 mm Breite durch temperaturschonendes Frasen aus der Rohrwand entnommen wurden. Der für beide Verfahren notwendige zeitabhängige Biegekrümmmodul wurde aus dem Werkstoffdatenblatt entnommen.

Die Charakterisierung des Widerstandes gegen langsames Risswachstum erfolgte mit zyklischen Ermüdungsversuchen an zylindrisch gekerbten Prüfkörpern („cracked round bar“, CRB), die temperaturschonend zu einer Dimension von  $\phi 10 \times 80$  mm gedreht wurden. Die Kerbe in Umfangsrichtung von 1 mm Tiefe wurde mit einer Rasierklinge eingebracht. Die Ermüdungsversuche wurden auf einer servohydraulischen Prüfmaschine vom Typ MTS Table Top 858 (MTS Systems, D) bei Raumtemperatur von 23 °C mit einer Prüffrequenz von 10 Hz durchgeführt. Für eine zuverlässige bruchmechanische Bewertung musste sichergestellt sein, dass die globalen Belastungen am Prüfkörper die Kriterien der linear-elastischen Bruchmechanik erfüllen [14, 15]. Die Belastungsamplitude, die durch das R-Verhältnis (minimale/maximale Belastung) definiert wird, betrug für alle Versuche  $R = 0,1$ .

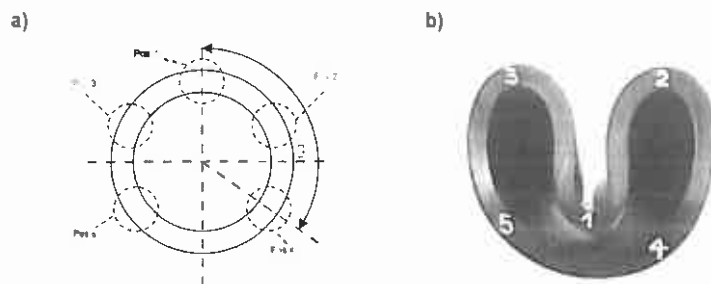
## Ergebnisse und Diskussion

Die Charakterisierung von Orientierungseffekten erfolgte über die Messung der linearen Wärmeausdehnung in Umfangsrichtung der Rohre. Molekulantorientierungen sind wegen der bei der Verarbeitung von thermoplastischen Werkstoffen vorhandenen Scherströmung und raschen Abkühlung in nahezu jedem Bauteil eingefroren. Bei einer nachträglichen Erwärmung des Materials erhöht sich die Beweglichkeit der Molekülketten, die dann danach streben, den Zustand der günstigsten Entropie bzw. höchsten Unordnung einzuneh-

men (Entropieelastizität). Erhöhte Orientierungen bewirken eine Verringerung der linearen Wärmeausdehnung in Orientierungsrichtung, die bei sehr starker Ausprägung sogar negativ sein kann [16].

Wird ein fertiges Bauteil bei einer definierten Temperatur deformiert und die auftretenden Molekulantorientierungen eingefroren, so bewirkt die Entropieelastizität bei einer

neuerlichen Erwärmung auf diese Temperatur eine Rückbildung zur ursprünglichen geometrischen Form (Memory-Effekt). In **Bild 2** sind die linearen Wärmeausdehnungen  $\Delta l$  in Umfangsrichtung der Position 1 für das konventionelle undeformierte Rohr, den Zwischenzustand des deformierten CFL und den rückdeformierten CFL dargestellt. Im Vergleich zum undeformierten Rohr ist im deformierten CFL an der Rohraußenseite ein



**Bild 2:** Definition der Positionen 1 bis 5 für die Prüfkörperentnahme a) Schematische Darstellung b) Gefalteter Zwischenzustand des deformierten CFL

**Fig. 2:** Definition of positions 1 to 5 for the specimen preparation a) Schematically illustration b) Folded intermediate state of the deformed CFL

**WILHELM EWE GmbH & CO. KG**  
Telefon: 05 31 - 37 00 50 · www.ewe-armaturen.de

## EWE-Armaturen aus bleifreiem Silicium-Messing

– entwickelt für die Zukunft

Ausschreibungstexte für alle Si-Armaturen erhältlich auf unserer Web-Seite oder auf Anfrage.



... bewährt bis ins Detail!

starker Anstieg in  $\Delta l$  und an der Rohrrinnenseite hingegen eine deutliche Verringerung zu negativen Werten für  $\Delta l$  erkennbar. Im Endzustand des rückdeformierten CFL sind diese starken Wärmeausdehnungen wieder verschwunden. Die Wärmeausdehnungen sind im Endzustand deutlich geringer als im konventionellen undeformierten Rohr, was eine allgemeine Entspannung im Orientierungszustand des Materials widerspiegelt.

Für die Position 1 des deformierten CFL bedeutet dies, dass bei Erwärmung das Material

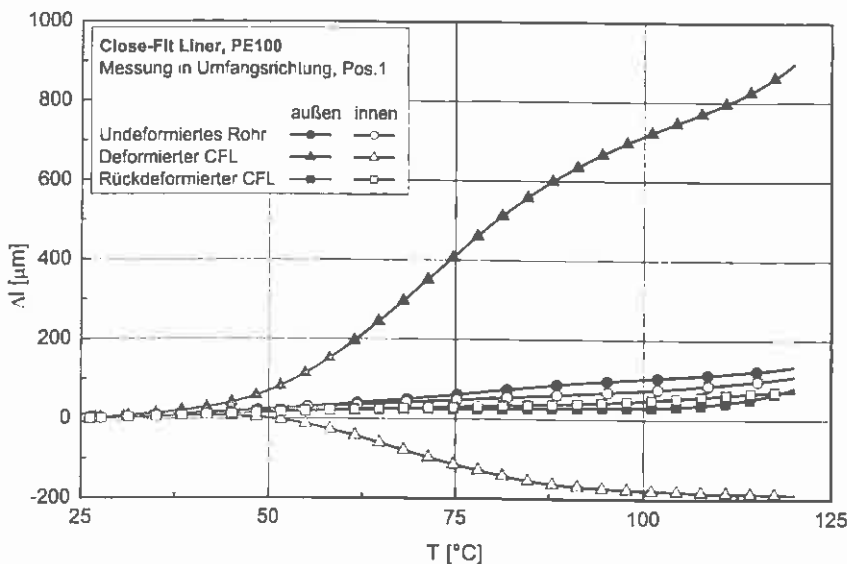
an der Rohraußenseite bestrebt ist, sich auszudehnen, während an der Rohrrinnenseite eine gegenteilige Tendenz des Zusammenziehens auftritt. Die gefaltete Position 1 strebt also dazu, seine ursprüngliche geometrische Form einzunehmen und bildet die Faltung zurück. An den Positionen 2 und 3 wurde ein analoger Verlauf der linearen Wärmeausdehnungen beobachtet, wobei der Memory-Effekt eine Rückbildung der zusätzlich aufgebrachten Deformation zum ursprünglichen Radius bewirkte.

In **Bild 3** sind die Resultate für den Kristallinitätsgrad  $\alpha$  zusammengefasst. Dabei ist zu erkennen, dass an der Rohraußenseite eine deutlich niedrigere Kristallinität besteht als in der Mitte und der Rohrrinnenseite. Dieser Effekt ist auf den Herstellungsprozess bei der Extrusion zurückzuführen, bei dem das Rohr von außen gekühlt wird und dem Material an der Oberfläche weniger Zeit zur Kristallisation gegeben wird als im Inneren der Rohrwand.

Im undeformierten Rohr betrug die Kristallinität an der Rohraußenseite ca. 53 %, in der Rohrmitte und an der Rohrrinnenseite wurden etwa 4 % höhere Werte für  $\alpha$  gemessen. Im rückdeformierten CFL ergaben sich über die gesamte Wandtiefe um ca. 4–5 % gleichmäßig erhöhte Werte für  $\alpha$ . Dies ist ein Hinweis dafür, dass durch die zusätzliche Temperierung bei der Deformation zum CFL bzw. der Rückdeformation bei der Installation eine Nachkristallisation auftrat, die zu Kristallisationsgraden von bis zu 62 % führte. Eine Abhängigkeit von  $\alpha$  von den unterschiedlichen Umformgraden an den Positionen 1 bis 5 wurde nicht festgestellt.

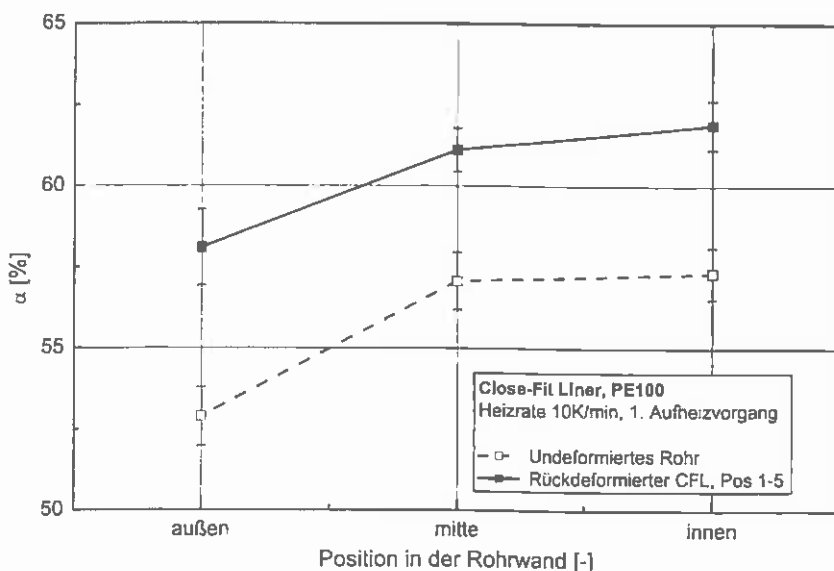
Eine Erhöhung der Kristallisation bedeutet im Allgemeinen einerseits eine Zunahme des E-Moduls und der Steifigkeit des Materials sowie eine höhere Härte. Andererseits kann die verringerte Zähigkeit der Werkstoffes den Widerstand gegen Rissinitiation und langsames Risswachstum beeinflussen.

Zur Beurteilung der Stabilität des Materials gegen thermo-oxidativen Materialabbau wurden Messungen der OIT und des IR-Spektrums durchgeführt. In **Bild 4** sind die OIT-Werte für das undeformierte Rohr und den rückdeformierten CFL bei unterschiedlichen Wandtiefen dargestellt. Im undeformierten Rohr betragen die Zeiten zwischen 25 und 37 min, wobei an der Rohrrinnenseite die kürzesten Zeiten auftraten. Eine Abhängigkeit von der Umfangsposition wurde nicht festgestellt. Interessanterweise stiegen im rückdeformierten Rohr die OIT-Werte gleichmäßig um durchschnittlich 50 % auf Zeiten zwischen 42 und 53 min an. Die Erhöhung der OIT-Werte lässt sich einerseits damit erklären, dass die Beweglichkeit der in den amorphen Phasen des PE eingebetteten Stabilisatorsysteme nach der zusätzlichen Temperierung während der Deformationsprozesse deutlich verbessert wurde. Andererseits spiegelt dieses Resultat den relativ lokalen Charakter dieser Messmethode wider. Die Messungen zeigen jedenfalls, dass während der Umformvorgänge keine Stabilisatoren verbraucht werden bzw. nach der Rückdeformation mehr aktiver Stabilisator zur Verfügung steht. Der Vollständigkeit halber wird darauf hingewiesen, dass die OIT nicht dazu geeignet ist, verschieden stabilisierte Werkstoffe hinsichtlich ihrer Langzeitstabilität zu verglei-



**Bild 3:** Lineare thermische Längenänderung  $\Delta l$  an der Pos 1 im undeformierten Rohr, im deformierten CFL und im rückdeformierten CFL

**Fig. 3:** Linear thermal expansion  $\Delta l$  at Pos 1 in the undeformed pipe, the deformed CFL and the reddeformed CFL



**Bild 4:** Kristallisationsgrad  $\alpha$  in verschiedenen Rohrwandtiefern im undeformierten Rohr und im rückdeformierten CFL

**Fig. 4:** Crystallinity  $\alpha$  at different pipe wall positions in the undeformed pipe and the reddeformed CFL

chen oder gar eine Lebenszeitabschätzung durchzuführen [17, 18].

Die Ergebnisse der IR-Spektroskopie für das undeformierte Rohr und den fünf definierten Umfangspositionen des rückdeformierten CFL sind in Bild 5 dargestellt, wobei die Transmission T als Funktion der Wellenzahl  $\nu$  dargestellt wird. Da die längste und größte Temperaturbeanspruchung während der Installation im Inneren des Rohres auftritt, wurde speziell die Rohrinne-seite untersucht. Die auftretenden Absorptionspeaks bei  $\nu$  zwischen 2925 und 2850  $\text{cm}^{-1}$ , bei 1470  $\text{cm}^{-1}$  und zwischen 725 und 720  $\text{cm}^{-1}$  sind charakteristisch für PE und werden von CH-Banden und  $(\text{CH}_2)_4$ -Banden verursacht. Auf ein intaktes Stabilisatorsystem weisen die Signale im Wellenzahlbereich zwischen 3000 und 3500  $\text{cm}^{-1}$  (OH-Banden) und zwischen 1500 und 1700  $\text{cm}^{-1}$  (phenolische Antioxidantien) hin [19-21].

Im Vergleich zum undeformierten Rohr sind die Signale für das Stabilisatorsystem im rückdeformierten Rohr deutlich stärker ausgeprägt. Auffallend ist, dass die Signale umso stärker sind, je geringer das Material an den Deformationsprozessen beteiligt war (Pos. 4 und Pos. 5). Dies kann - analog zur OIT - wiederum auf eine Erhöhung der Beweglichkeit der für die Materialstabilisierung verantwortlichen Moleküle durch den Tempervorgang erklärt werden. Bei thermo-oxidativer Materialalterung werden Carbonylgruppen in den Molekülketten gebildet, die Infrarotwellen im Wellenzahlbereich zwischen 1700 und 1740  $\text{cm}^{-1}$  absorbieren. Nachdem in diesem Bereich keine Peaks auftreten, ist davon auszugehen, dass die thermische Belastung der Deformationsprozesse keine Schädigung hinsichtlich vorzeitiger Alterung verursacht. Eine quantitative Beurteilung der Wirksamkeit von Stabilisatorsystemen lässt sich aus der IR-Spektroskopie nicht ableiten, jedoch zeigte sich, dass das Stabilisatorpaket noch intakt ist.

Eigenspannungen in Kunststoffrohren haben ihren Ursprung im Extrusionsprozess, wo die Rohraußenseite relativ rasch abgekühlt wird, während die Temperaturen an der Rohrinne-seite aufgrund der schlechten Wärmeleitung nur langsam abnehmen. Als Faustregel gilt, dass an der zuerst gekühlten Seite Druck- und an der zuletzt gekühlten Seite Zug-Eigenspannungen auftreten. In PE-Rohren können in Abhängigkeit von den Prozessparametern bei der Verarbeitung durchaus Eigenspannungswerte von 4 MPa in Umfangsrichtung und 6 MPa in Axialrichtung auftreten [12]. Für ein PE 100-Rohrmaterial mit einem MRS-Wert von 10 MPa bedeutet dies, dass Eigenspannungen bei der Auslegung der Betriebsbelastung von Rohrssystemen durchaus beachtet werden müssen.

In Bild 6 sind die Eigenspannungen in Umfangsrichtung  $\sigma_{E,u}$  und in Axialrichtung  $\sigma_{E,a}$  für das undeformierte Rohr und den rückdeformierten CFL zusammengefasst und mit

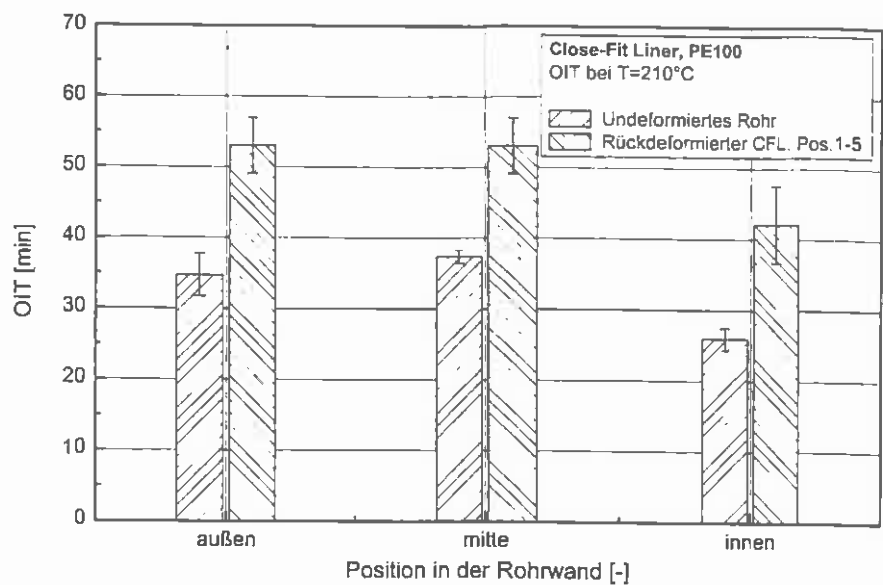


Bild 5: Oxidations-Induktionszeit OIT bei T = 210 °C in verschiedenen Rohrwandtiefern im undeformierten Rohr und im rückdeformierten CFL

Fig. 5: Oxidation-induction time OIT at T=210°C at different pipe wall positions in the undeformed pipe and the redeformed CFL

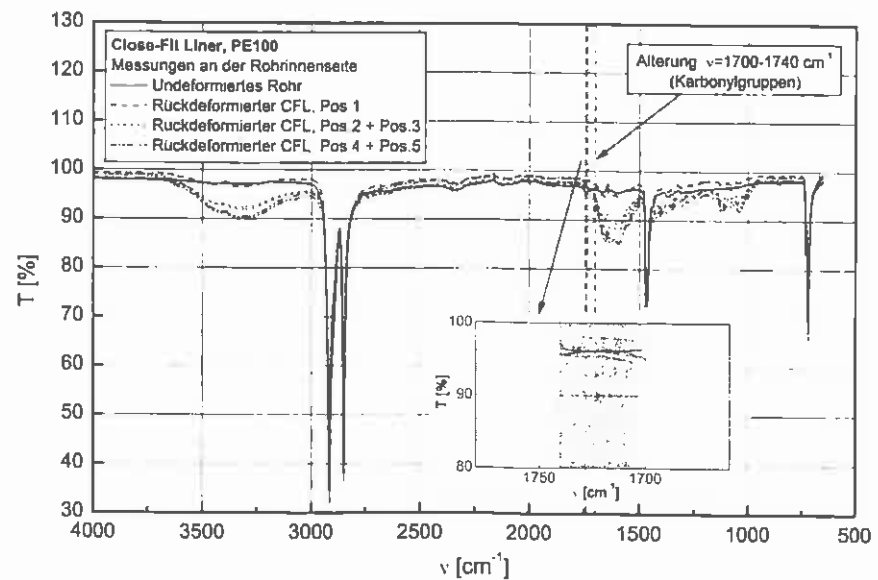


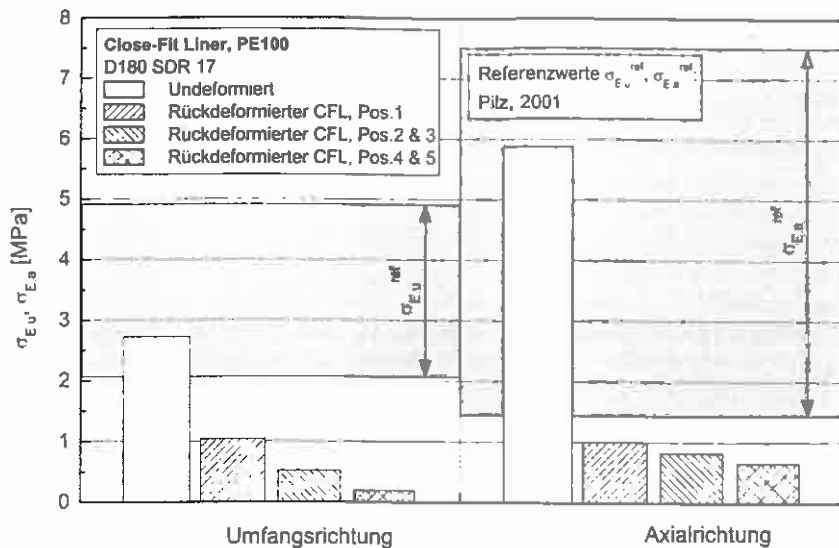
Bild 6: IR-Spektroskopie an der Rohrinne-seite des undeformierten Rohres und des rückdeformierten CFL

Fig. 6: IR-spectroscopy at the inner pipe wall position of the undeformed pipe and the redeformed CFL

typischen Eigenspannungswerten  $\sigma_{E,a}^{rel}$  und  $\sigma_{E,u}^{rel}$  gegenübergestellt [12]. Das undeformierte Rohr liegt mit Werten von ca. 2,7 MPa für  $\sigma_{E,u}$  und 5,9 MPa für  $\sigma_{E,a}$  im Bereich vergleichbarer Messungen. Für das rückdeformierte Rohr wurde hingegen in Abhängigkeit der Position des Freischneidens eine deutliche Verringerung der Rohreigenspannungen aufgrund der zusätzlichen Temperaturbelastungen gemessen. Für die Position 1 (d.h. Ringsegment bzw. Streifen wurde an der

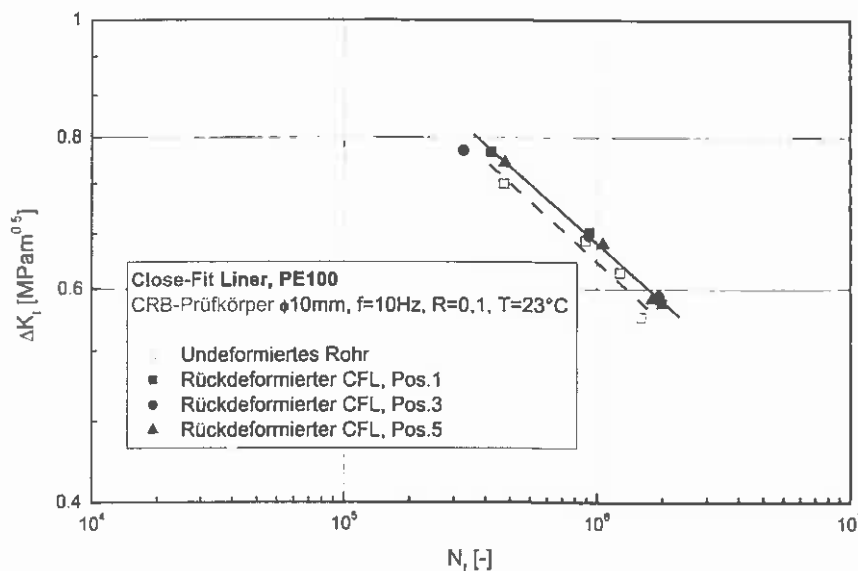
Position 1 freigeschnitten bzw. entnommen) sanken sowohl  $\sigma_{E,u}$  als auch  $\sigma_{E,a}$  auf etwa 1 MPa und nahmen an den weiteren Umfangspositionen noch weiter ab.

Die für das CFL-Verfahren notwendigen zusätzlichen Verfahrensschritte stellen somit einen Tempervorgang dar, der vor allem eine signifikante Reduktion der im Rohr vorhandenen Eigenspannungen bewirkt. Dadurch erhöht sich einerseits die Sicherheitsreserve des Materials zum jeweiligen MRS-Wert, an-



**Bild 7:** Rohrreignspannungen  $\sigma_{Eu}$  und  $\sigma_{Ea}$  in Umfangs- und Axialrichtung im undeformierten Rohr und im rückdeformierten CFL

**Fig. 7:** Residual pipe stresses  $\sigma_{Eu}$  and  $\sigma_{Ea}$  in circumferential and axial direction of the undeformed pipe and the redeformed CFL



**Bild 8:** Zyklenzahlen bis zum Versagen  $N_f$  von CRB Prüfkörper als Funktion des Spannungsintensitätsfaktors  $\Delta K_I$  bei einer Temperatur von  $23^\circ\text{C}$  für das undeformierte Rohr und die Positionen 1, 3 und 5 des rückdeformierten CFL

**Fig. 8:** Failure cycle number  $N_f$  of CRB specimens as a function of the stress intensity factor  $\Delta K_I$  at a temperature of  $23^\circ\text{C}$  for the undeformed pipe and the positions 1, 3 and 5 of the redeformed CFL

dererseits ist mit einer deutlichen Verbesserung des Langzeit-Versagensverhaltens beim rückdeformierten CFL zu rechnen [7].

Zur Charakterisierung des Langzeit-Versagensverhaltens wurden Ermüdungsversuche an CRB-Prüfkörpern durchgeführt. Die Zyklenzahlen  $N_f$  bis zum Versagen durch Rissinitiation und sprödem Risswachstum sind in **Bild 7** als Funktion der Differenz des minimalen und maximalen Spannungsintensitätsfaktors  $\Delta K_I$  dargestellt. In doppelt-log-

arithmischer Darstellung ergibt sich sowohl für das undeformierte Rohr als auch den rückdeformierten CFL ein typischer linearer Zusammenhang, wobei mit Verringerung von  $\Delta K_I$  ein Anstieg von  $N_f$  auftritt.

Die CRB-Prüfkörper aus dem rückdeformierten CFL versagten bei etwas höheren Zyklenzahlen als jene aus dem undeformierten Rohr. Dies kann vor allem auf die deutlich verringerten Eigenspannungen in den CRB-Prüfkörpern aus dem rückdeformierten CFL

zurückgeführt werden, die einen maßgeblichen Einfluss auf das Langzeit-Versagensverhalten haben. Eine Abhängigkeit von der Umfangsposition wurde nicht festgestellt. Die mit der DSC festgestellte geringfügige Erhöhung der Kristallinität, die zu einer Verringerung der Zähigkeit des Materials führen kann, wirkt sich nicht negativ auf das Langzeit-Versagensverhalten aus.

### Zusammenfassung

Im Rahmen der gegenständlichen Arbeit erfolgte eine umfangreiche Studie über den Einfluss der prozessbedingten Deformationsprozesse auf Materialeigenschaften bei der Installation von Close-Fit-Liner (CFL)-Rohren. Dabei stand jeweils der Vergleich der untersuchten Eigenschaften im konventionell extrudierten, undeformierten Rohr mit jenen des Endzustandes des rückdeformierten CFL im Vordergrund. Die Charakterisierung von Orientierungseffekten mittels linearer thermischer Längenänderung vertiefte das Verständnis über den bei diesem Verfahren typischen Memory-Effekt. Dabei wurde gezeigt, dass die bei der temperaturbegleiteten Faltung künstlich eingebrachten Molekülorientierungen so stark ausgeprägt sind, dass sie bei neuerlicher Erwärmung der Deformation entgegenwirken und somit maßgeblich an der Rückführung des CFL in seine ursprüngliche Rohrgeometrie beteiligt sind.

Diese, im Vergleich zum undeformierten Rohr, zusätzlichen Temperaturbelastungen bewirken dabei einen gleichmäßigen Anstieg des Kristallisationsgrades im Material von ca. 4 bis 5 %, der im Allgemeinen eine geringe Erhöhung in der Steifigkeit bewirkt. Die Ergebnisse der Oxidations-Induktionszeit und der Infrarotspektroskopie ergaben keinerlei Hinweise auf eine vorzeitige, thermisch bedingte oxidative Materialalterung.

Eine wesentliche Veränderung wurde hingegen im Eigenspannungszustand des rückdeformierten CFL festgestellt. Sowohl in Umfangs- als auch in Axialrichtung bewirkten die zusätzlichen Temperaturbelastungen während der Deformationsprozesse eine Verringerung der Eigenspannungen auf etwa 1 MPa und darunter. Da an der Rohrinneenseite stets von Zug-Eigenspannungen auszugehen ist, die an eventuell vorhandenen Defekten eine rissöffnende Wirkung haben, ist dies als deutliche Verbesserung des Rohrzustandes anzusehen. Ein weiterer Folgeeffekt von reduzierten Eigenspannungen ist die Erhöhung des Widerstandes gegen Rissinitiation und langsames Risswachstum, was durch zyklische Ermüdungsversuche an CRB-Prüfkörpern nachgewiesen wurde. Eine Beeinflussung des Versagensverhaltens durch den geringfügig erhöhten Kristallinitätsgrad wurde hingegen nicht beobachtet.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit den angewandten Charakterisierungsmethoden keinerlei negative Auswirkungen auf das Rohrmaterial festgestellt wurden, die auf die für das Close-Fit-Liner-Verfahren typischen Deformations- und Rückdeformationsprozesse zurückzuführen sind. Der deutliche Abbau der Eigenspannungen und folglich die Erhöhung des Widerstandes gegen Rissinitiation und langsamem Risswachstum stellen sogar eine deutliche Verbesserung gegenüber dem konventionellen Rohr dar und unterstreichen die Zuverlässigkeit von derart installierten Rohrleitungen.

## Danksagung

Die vorliegende Forschungsarbeit wurde an der Polymer Competence Center Leoben GmbH im Rahmen des Kompetenzzentren-Programms  $K_{plus}$  des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie unter Beteiligung der Montanuniversität Leoben, AGRU Kunststofftechnik GmbH und Rabmer Rohrtechnik GmbH & Co. KG durchgeführt und mit Mitteln des Bundes und der Länder Steiermark und Oberösterreich gefördert.

## Literatur

- [1] Brömstrup, H. (2004). PE 100 Pipe Systems, Vulkan Verlag, Essen, Germany
- [2] Janson, L.E. (1999). Plastics Pipes for Water Supply and Sewage Disposal, Borealis, Sven Axelsson AB/ Faldts Grafiska AB, Stockholm, Sweden
- [3] Richard, K.; Gaube, E.; Diedrich, G. (1959). Trinkwasserrohre aus Niederdruckpolyäthylen. Kunststoffe 49 (10): 516-525
- [4] Hesse, J. (2006): 50 Jahre Rohre aus PE, 3R International 45 (2006) Nr. 3-4, S. 128-133
- [5] Glanert, R.; Schulze, S. (2002). U-Liner – Der Klassiker für die Sanierung von Reuckrohren, Rohrbau congress 2002, Weimar, Germany
- [6] Rabmer Bautechnologie GesmbH & Co. KG (2009). „Arbeitsanweisung, Heizanleitung Close Fit Rohr“, Altenberg, A.
- [7] Choi, S., Broutman, L. J. (1997): Residual Stresses in Plastic Pipes and Fitting - IV. Effect of Annealing on Deformation and Fracture Properties. Polymer (Korea) 21(1): 93-102
- [8] ISO 11357-3:1999 (E) „Plastics-Differential scanning calorimetry (DSC), Part 3: Determination of temperature and enthalpy of melting and crystallization“
- [9] Lohmeyer, S. (1984): Die speziellen Eigenschaften der Kunststoffe, Expert Verlag, Grafenau, Germany
- [10] ISO 11359-2:1999 (E) "Plastics-Thermomechanical analysis, Part 2: Determination of coefficient of linear thermal expansion and glass transition temperature"
- [11] ISO 11357-6:2002 (E) „Plastics-Differential scanning calorimetry (DSC), Part 6: Determination of oxidation induction time“
- [12] Pilz, G. (2001): Viscoelastic Properties of Polymeric Materials for Pipe Applications, Dissertation, Institute of Materials Science and Testing of Plastics, University of Leoben, Austria
- [13] König, G. (1989): Stand der Technik auf dem Gebiet der Eigenspannungsmessungen, Seminar über Eigenspannungsmessungen, Miskolc, H.
- [14] Haager, M.; Pinter, G.; Lang, R.W. (2006): Ranking of PE Pipe Grades by Cyclic Crack Growth Tests with Cracked Round Bar Specimen, Proceedings of ANTEC 2006, Charlotte, North Carolina, USA, Society of Plastics Engineers, 2475-2479
- [15] Pinter, G.; Haager, M.; Balika, W.; Lang, R.W. (2007): Cyclic crack growth tests with CRB specimens for the evaluation of the long-term performance of PE pipe grades, Polymer Testing 26 (2), 180-188
- [16] Menges, G., et al. (2002). Werkstoffkunde Kunststoffe, Hanser, München, Germany
- [17] Grob, M. (2005): Moderne Additivierung - ein effektiver Alterungsschutz für Kunststoffe. Korrosion von Kunststoffen, Frankfurt, Deutschland, Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V.
- [18] Schulte, U. (2004): HDPE Pipes are More Resistant to Oxidation than the OIT Indicates. Plastics Pipes XII, Baveno, Italien
- [19] Allen, N.S.; Hoang, E.; Liaw, C.M.; Edge, M.; Fontan, E. (2001): Influence of processing aids on the thermal and photostabilisation of HDPE with antioxidant blends, Polymer Degradation and Stability 72, 367
- [20] Gulmine, J.V.; Janissek, P.R.; Heise, H.M.; Akcelrud, L. (2003): Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering, Polymer Degradation and Stability 79, 385
- [21] Mendes, L.C.; Rufino, E.S.; de Paula, F.O.C.; Torres Jr, A.C. (2002): Mechanical, thermal and microstructure evaluation of HDPE after weathering in Rio de Janeiro City, Polymer Degradation and Stability 79, 371

## Autoren:

### A. Frank

Polymer Competence Center  
Leoben, Leoben, Österreich



### M. Haager

AGRU Kunststofftechnik GmbH,  
Bad Hall, Österreich



### A. Hofmann

Rabmer Rohrtechnik GmbH &  
Co KG, Altenberg, Österreich



### G. Pinter

Institut für Werkstoffkunde und  
Prüfung der Kunststoffe, Montan-  
universität Leoben, Österreich

