Langzeitverhalten von Heizwendelschweißverbindungen an Druckrohrleitungen aus Polyethylen

Die an Heizwendelmuffen-Schweißverbindungen im praktischen Betrieb und bei der Zeitstandinnendruckprüfung beobachteten Umfangsrisse in der Heizwendelmuffe sind auf Spannungsüberhöhungen beim Übergang von Rohr zu Muffe zurückzuführen. Es wird vorgeschlagen, bei der statischen Berechnungen von Rohrleitungen mit Heizwendelmuffen-Schweißverbindungen diese Spannungsüberhöhungen durch einen „Heizwendelmuffenschweißfaktor" von 0,4 zu berücksichtigen. Eine Kompensation des „Heizwendelmuffenschweißfaktors" ist bei Rohrleitungen aus PE 100 durch die Verwendung von Heizwendelmuffen aus PE 100-RC möglich.

Anwendungen von Heizwendelfittings - Bisher bekannte Schäden

Druckrohre aus Polyethylen, die mit Heizwendelmuffen verbunden sind, werden seit mehr als 60 Jahren eingesetzt [1]. In ***Bild 1*** ist ein aufgeschnittenes PE-Heizwendelformteil (T-Stück) nach 41 Jahren im Dauereinsatz für Wasserversorgung gezeigt.

Es sind bisher keine Schäden an Heizwendelmuffen, die im Gas- bzw. Wasserbereich eingesetzt waren, bekannt. Vereinzelte Undichtigkeiten an Heizwendelverbindungen im Gas-, Wasser- bzw. Abwasserbereich sind auf mangelhafte Vorbereitung der Rohroberflächen vor dem Schweißen zurück zu führen.

Im industriellen Einsatz wurden Undichtigkeiten durch die Auflösung des Heizwendeldrahtes bei diffundierenden korrosiven Medien (z. B. Salzsäure, Flusssäure) beobachtet.

Zeitstandbrüche in der Muffe sind unter dem Einfluss spannungsrissauslösender Betriebsmedien und Temperaturen > 25 °C aufgetreten.

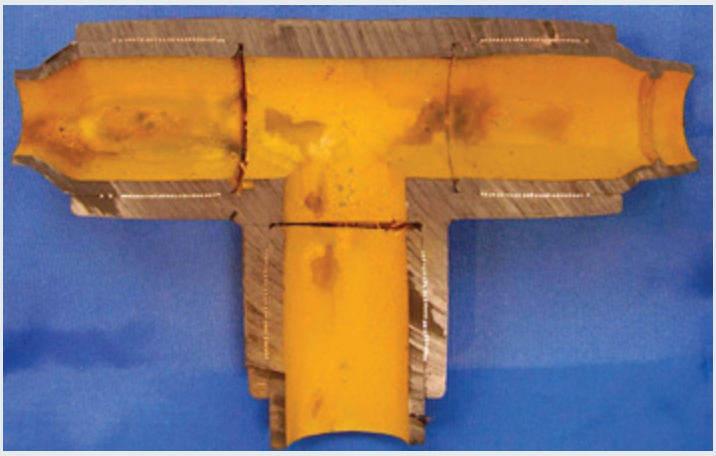

***Bild 1**: PE-Heizwendelformteil nach 41 Jahren im Dauereinsatz aus einem Rohrleitungssystem für Wasser im "Badehaus Hoechst"*

Verarbeitung

Die Verarbeitung von Heizwendelmuffen in einem Rohrleitungssystem ist in der Richtlinie DVS 2207-1 beschrieben. Die wesentlichen zu beachtenden Vorbereitungen zum sicheren Schweißen zwischen Rohr und Heizwendelmuffe sind demnach:

- Passgenauigkeit zwischen Rohr und Muffe (Toleranzen)
- spanende Bearbeitung der Rohroberfläche (Spandicke 0,2 mm)
- keine Verschmutzung von Muffeninnenseite bzw. bearbeiteter Rohraußenoberfläche
- Kontrolle der Rohreinstecktiefe

Dimensionierung von Heizwendelmuffen

Die Dimensionierung der Muffenwanddicke erfolgt bisher nach der in Umfangsrichtung wirkenden Spannung unter der Annahme, dass die „Kesselformel" gültig ist.

Die Länge der Schweißzone ist als Mindestwert in DIN EN 1555-3 bzw. DIN EN 12201-3 festgelegt, um die Schubbelastung aus der Axialspannung abzusichern.

Als Grundlage für die Festigkeitswerte werden die entsprechenden Zeitstandkurven für Rohre herangezogen. Diese Vorgehensweise unterstellt, dass die für glatte Rohre ermittelten Zeitstandkurven (z. B. für PE 100) auch für Heizwendelmuffen gelten.

Unberücksichtigt bleiben dabei Spannungsspitzen, die sich aus dem Querschnittsübergang von Rohr zu Muffe bei gleichzeitiger Kerbwirkung der Heizwendeldrähte ergeben.

Prüfung des Langzeitverhaltens von Schweißverbindungen

Zur Prüfung des Langzeitverhaltens der Schweißverbindungen von PE-Rohren stehen die Richtlinien des Deutschen Verbandes für Schweißtechnik e.V. (DVS) [3] sowie Europäische Normen zur Verfügung.

In den Richtlinien DVS 2203-4 bzw. EN 12814-3 sind die grundlegenden Bedingungen für den Zeitstandzugversuch festgelegt. Im Beiblatt 3 zu DVS 2203-4 ist darüber hinaus ein Verfahren beschrieben, das es erlaubt, die Min-

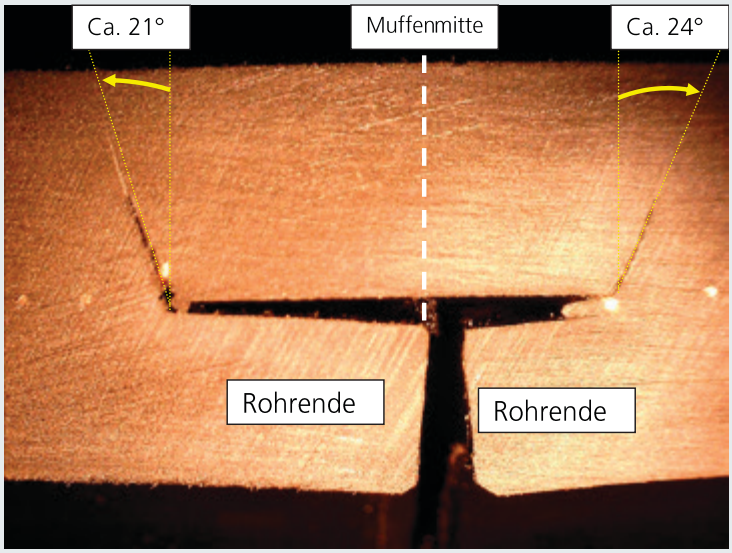

***Bild 2**: Rissverlauf an einer Heizwendelmuffenschweißverbindung unter Innendruck*

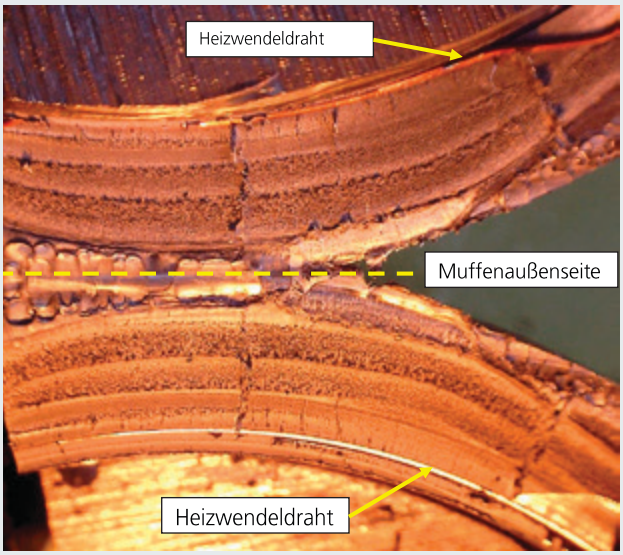

***Bild 3**: Aufgeklappte Bruchflächen einer Heizwendelmuffenschweißverbindung nach dem Bruch*

destlebensdauer einer Schweißverbindung prüftechnisch abzusichern.
Im Anhang B der EN 12814-3: 2014 ist der „Zeitstand-Zugversuch am ganzen Rohr (inkl. Schweißverbindung)" genormt.
Die Innendruckprüfungen von Heizwendelschweißverbindungen an Rohren sind u. a. in
DIN EN 12201-3 und DIN EN 1555-3 beschrieben.
Eine Aussage über das zu erwartende reale Langzeitbruchverhalten ist mit den in DIN EN 12201-3 bzw. DIN EN 1555-3 beschriebenen Anforderungen an die Mindestprüfdauer nicht zu erhalten.
Die „165 h-Prüfung" ist unbedeutend für das Langzeitverhalten und beschreibt lediglich das Kurzzeitbruchverhalten von Muffenverbindungen.
Die alternativ vorgesehene „1000 h-Prüfung" führt bei den für die Muffenherstellung verwendeten
PE 100-Werkstoffen erfahrungsgemäß nicht zum Zeitstandbruch.
Es gibt Hinweise darauf, dass die für die Dimensionierung der Muffenwanddicke üblicherweise verwendeten Zeitstandinnendruckkurve für glatte Rohre im Langzeitbereich zu optimistische Annahmen darstellen, weil die Homogenität der Spannungen im Muffenquerschnitt durch die Heizwendeldrähte gestört wird.
Um zu Erkenntnissen über die tatsächliche langzeitige Leistungsfähigkeit von Heizwendelschweißverbindungen unter Innendruck zu gelangen, ist eine Beschleunigung des Langzeit-Bruchs sowohl durch die Prüfung bei höheren Temperaturen als auch die Verwendung von geeigneten Netzmitteln zwingend notwendig.
Die Beschleunigung des Langzeitbruchs ist unabdingbar, wenn moderne PE 100-RC Werkstoffe verwendet werden.

Experimentelle Untersuchungen zum Bruchverhalten von Heizwendelmuffen

Es wurden Zeitstandinnendruckversuche an heizwendelgeschweißten Rohren mit Heizwendelmuffen folgender Hersteller bis zum Bruch durchgeführt:

» AGRU Kunststofftechnik GmbH,
» Georg Fischer Piping Systems GmbH,
» NUPIGECO S.p.A. und
» PLASTITALIA S.p.A.

Dabei traten an allen Heizwendelmuffen Risse in Umfangsrichtung der Muffen auf. Der Riss ging bei allen Muffen von

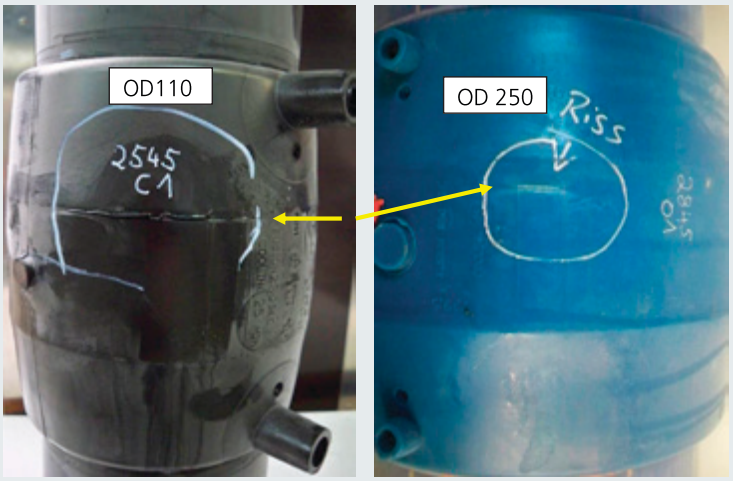

***Bild 4**: Außenansicht von Heizwendelmuffenschweißverbindungen nach dem Bruch*

***Tabelle 1**: Unabhängige Einflussgrößen für Umfangsrisse in Heizwendelmuffen-Schweißverbindungen*

Lfd. Nr.	Einflussgröße	Untersuchter Bereich
1	Heizwendelmuffenhersteller	AGRU; +GF+; NUPIGECO; PLASTITALIA
2	Art der Muffenherstellung	Gespritzt; aus Rohren hergestellt
3	Medium	Wasser; Netzmittel; Betriebsmedium „Kühlflüssigkeit“
4	Temperatur	90; 80; 60; 35 °C
5	Innendruck	9,2; 4,6; 2,5 bar
6	Rohraußendurchmesser	110; 250; 400 mm
7	Axialverformungsunterdrückung	Starre Einspannung rechts und links der Muffe
8	Rohstoffqualität	PE 100; PE 100-RC

den beiden Heizwendeldrähten rechts und links von der Muffenmitte aus (***Bild 2***).
Eine typische Bruchfläche (aufgeklappt) ist in ***Bild 3*** gezeigt. Der stufenweise radiale Rissfortschritt ist typisch für den Rissfortschritt bei Zeitstandbeanspruchung. Die Stufen stellen die Wachstumsphasen bei stabiler Rissausbreitung dar [4]. Der Rissfortschritt in radialer Richtung ausgehend von den Heizwendeldrähten bzw. die Auswirkung des dort auftretenden Steifigkeitssprungs zeigt sich nach dem Bruch im Innendruckversuch als Umfangsriss auf der Muffenaußenseite (***Bild 4***).
Die im Bild 4 gezeigten Umfangsrisse an Heizwendelmuffen, die bis zu ihrer Belastungsgrenze in der Praxis bzw. im Zeitstandinnendruckversuch beansprucht worden waren, sind unabhängig von den in ***Tabelle 1*** genannten Einflussgrößen.

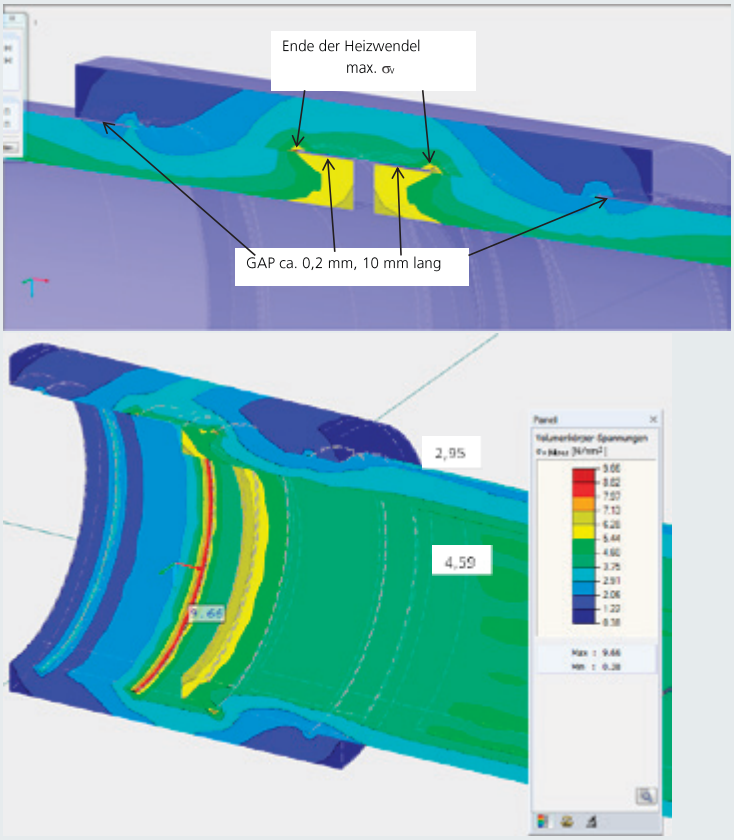

***Bild 5**: Querschnitt Rohr – Muffe – Rohr in FEM-Darstellung*

Berechnung einer Rohr-Muffenverbindung

Für eine im Rahmen dieser Untersuchungen geschweißte Rohr-Muffenverbindung sind vergleichende Berechnungen durchgeführt worden, um den Einfluss der Heizwendelschweißung auf das Tragverhalten der Muffe beurteilen zu können. Für die Nachweise ist ein Druck von p = 9,2 bar und ein E-Modul von 200 N/mm² angesetzt worden, wobei der E-Modul für diese ersten Betrachtungen (lineares Werkstoffgesetz) nicht von entscheidender Bedeutung ist. Die Berechnungen wurden nach den Gleichungen für „Kesselformel“, „von Mises“, „Schubspannungshypothese“ und „Dickwandiges Rohr“ durchgeführt.
Kesselformel:

$$\sigma_x = p * \frac{(D_i + t)}{4 * t} \qquad \sigma_y = p * \frac{(D_i + t)}{2 * t} \tag{1}$$

Vergleichsspannung nach von Mises (Gestaltänderungsenergiehypothese):

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x * \sigma_y + 3 * \tau_{xy}^2} \tag{2}$$

Schubspannungshypothese:

$$\sigma_v = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 * \tau_{xy}^2} \tag{3}$$

Dickwandiges Rohr:

$$\sigma_x = p * \frac{r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \quad \sigma_y = p * \frac{r_i^2 (r_a^2 - r^2)}{r^2 (r_a^2 - r_i^2)} \tag{4}$$

Die in den ***Bildern 5*** und ***7*** gezeigten Strukturen sind in einem Finiten Element Programm, hier RFEM 5.05 der Fa. Dlubal Software GmbH, als Volumenmodell abgebildet worden. Die Berechnungen erfolgten mit einem linearen Werkstoffgesetz nach der Theorie II. Ordnung. Die Netzgröße war 5 mm und es wurden 3D-Volumenelemente, Hexaeder, verwendet.
Die Muffenverbindung wurde mit den entsprechenden GAPs, also keinem Kontakt zwischen dem Rohr und der Muffe außerhalb der Heizwendel, modelliert.
Der Druck ist auf allen Flächen, die vom Medium benetzt werden können, angesetzt worden. Die Ergebnisse sind in den ***Tabellen 2*** und ***3*** dargestellt.
Bei den Werten der Muffen handelt es sich um die Spannungen σx und σy im Bereich zwischen den beiden Rohrenden. Die Vergleichsspannungen sowohl nach von Mises als auch nach der Schubspannungshypothese sind an der Stelle des Bruchausgangs (letzter Heizwendeldraht; s. Bild 2) berechnet.

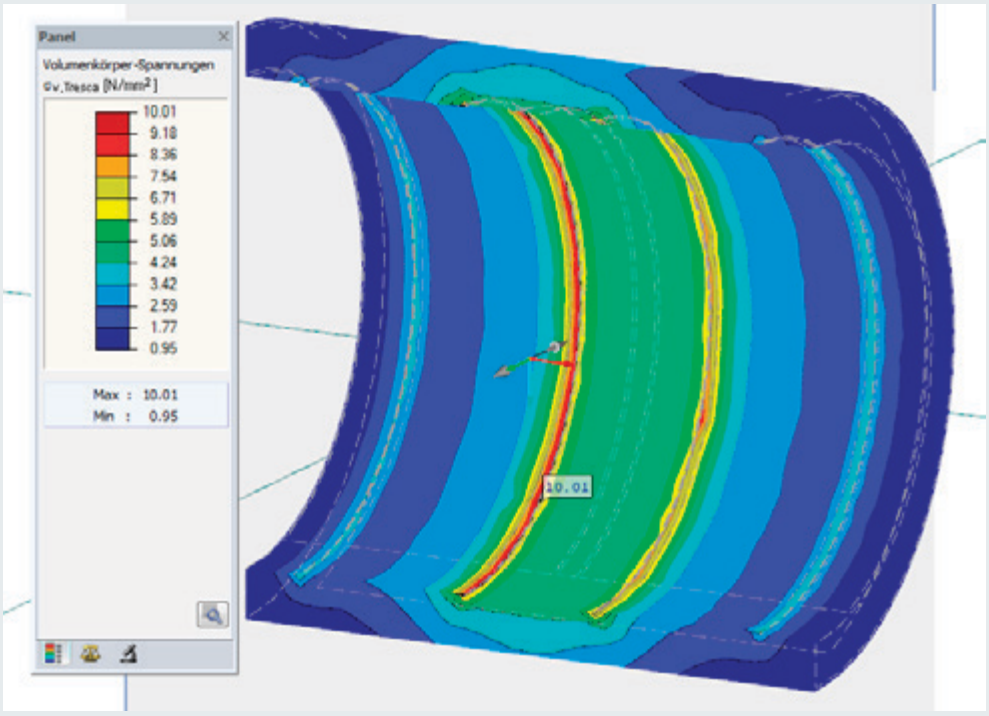

***Bild 6**: Rohr – Muffe – Rohr in FEM-Darstellung mit Spannungen nach von Mises*

Im ersten Fall ergibt sich an den Stellen des Bruchausgangs ein Spannungserhöhungsfaktor $\alpha_{K,\,Muffe}$ von

$$\alpha_{k,Muffe} = \frac{\sigma_{v.Mises,,Schweiß}}{\sigma_{v.Mises,Muffe}} = \frac{9{,}66}{4{,}05} = 2{,}39 \qquad (5)$$

Wird die Schubspannungshypothese angesetzt, so beträgt der Spannungserhöhungsfaktor

$$\alpha_{k,Muffe} = \frac{\sigma_{v.\nexists\tau-Hypoth.,Schweiß}}{\sigma_{v.Mises,Muffe}} = \frac{10{,}00}{4{,}05} = 2{,}47 \qquad (6)$$

***Tabelle 2**: Spannungen im Rohr (ungestörter Bereich)*

	Rohr			
	Kesselformel			
	σ_x	σ_y	$\sigma_{v.Mises}$	$\sigma_{\tau\text{-Hypoth.}}$
	N/mm²	N/mm²	N/mm²	N/mm²
	2,30	4,60	3,98	2,30
	dickwandiges Rohr			
	σ_x	σ_y	$\sigma_{v.Mises}$	$\sigma_{\tau\text{-Hypoth.}}$
	N/mm²	N/mm²	N/mm²	N/mm²
innen	1,86	4,65	4,05	
außen	1,86	3,73	3,23	
	FEM-Berechnung			
	σ_x	σ_y	$\sigma_{v.Mises}$	$\sigma_{\tau\text{-Hypoth.}}$
	N/mm²	N/mm²	N/mm²	N/mm²
innen	1,70	4,70	4,60	5,30
außen	1,70	3,50	2,90	3,40

***Tabelle 3**: Spannungen in der Muffe*

	Muffe			
	Kesselformel			
	σ_x	σ_y	$\sigma_{v.Mises}$	$\sigma_{\tau\text{-Hypoth.}}$
	N/mm²	N/mm²	N/mm²	N/mm²
innen	2,34	4,68	4,05	2,34
	dickwandiges Rohr			
	σ_x	σ_y	$\sigma_{v.Mises}$	$\sigma_{\tau\text{-Hypoth.}}$
	N/mm²	N/mm²	N/mm²	N/mm²
innen	1,9	4,72	4,11	
außen	1,9	3,8	3,29	
	FEM-Berechnung			
	σ_x	σ_y	$\sigma_{v.Mises}$	$\sigma_{\tau\text{-Hypoth.}}$
	N/mm²	N/mm²	N/mm²	N/mm²
innen	1,40	4,00	9,66	10,00
außen	2,50	3,40	3,00	3,40

Für die Bemessung sollte ein Spannungserhöhungsfaktor von

$$\alpha_{k,Muffe} \geq 2{,}5 \qquad (7)$$

angesetzt werden.

Der Spannungserhöhungsfaktor kann auch als Kehrwert im Sinne eines Schweißfaktors (analog zum Heizelementstumpfschweißen) angegeben werden. Er beträgt demnach 0,4.
Die Einflussfaktoren auf die Standzeit von Heizwendelmuffen sind konstruktiv bedingt (Heizwendeldrähte) und können nur mit hohem Aufwand geändert werden (Spritzgussformen).
Des Weiteren sind die Spannungsüberhöhungen beim Übergang Rohr – Muffe – Rohr systembedingt und ebenfalls nicht zu beeinflussen.
Die Erhöhung der Standzeiten von Heizwendelschweißverbindungen lässt sich am ehesten durch die Verwendung hochspannungsrissbeständiger Rohstoffe erzielen.
Den höchsten Widerstand gegenüber Spannungsrissbildung zeigen diejenigen PE-Rohstoffe, welche die Anforderungen nach PAS 1075 [5] an ein PE 100-RC erfüllen.
Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass der Zeitfaktor (f_{RC}) für die Standzeiten bis zur Spannungsrissbildung zwischen einem PE 100-RC und einem PE 100 unter identischen Prüfbedingungen zwischen 10 und 50 liegen können.

Lösungsvorschlag

Da die nach DIN 8075: 2011-12 genormten Zeitstandkurven für Rohre aus PE 100 den für Spannungsrisse (d. h. Sprödbrüche) maßgebenden zweiten Ast nicht mehr ausweisen, sollten die Zeitstandkurven im Beiblatt 1 zur Richtlinie DVS 2205-1 herangezogen und dahingehend überprüft werden, ob diese Zeitstandkurven auch für Heizwendelschweißverbindungen gelten.
Nach Verifizierung der Zeitstandkurven für Heizwendelschweißverbindungen im Sprödbruchbereich kann mit Hilfe der Steigung des zweiten Astes der Spannungsfaktor ($f\sigma$) in einen äquivalenten Zeitfaktor (f_t) umgerechnet werden. Der Zeitfaktor f_t kann kompensiert werden, wenn als Rohstoff für die Muffenherstellung ein PE 100-RC mit entsprechend längeren Standzeiten gegenüber PE 100 verwendet wird.

Fazit

Bei der Berechnung von Rohrleitungssystemen aus Polyethylen, die sowohl Heizelementstumpfschweißverbindungen als auch Heizwendelschweißverbindungen enthalten, müssen „Heizwendelmuffenschweißfaktoren" (analog zu den Langzeitschweißfaktoren für Heizelementstumpfschweißungen) berücksichtigt werden.
Die Heizwendelmuffenschweißfaktoren liegen bei 0,4.
Eine Kompensation ist bei PE 100 Rohrsystemen möglich, wenn Heizwendelmuffen aus PE 100-RC verwendet werden.

Literatur

[1] [1] U. Schulte, J. Hessel, Restlebensdauer von Kunststoffrohren nach einer Betriebszeit von 41 Jahren, in: 3R international (45) Heft 9/2006

[2] [2] J. Hessel, 100 Jahre Nutzungsdauer von Rohren aus Polyethylen - Rückblick und Perspektive, in: 3R international (46) Heft 4/2007

[3] [3] DVS-Taschenbuch Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 68/IV, 15. Auflage, 2014, Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf

[4] [4] J. Grieser, Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Versagensverhalten von Schweißverbindungen an Polyethylen unter Berücksichtigung der Grundmaterial-Kerbempfindlichkeit bei langzeitiger Beanspruchung, Diplomarbeit an der Fachhochschule Aachen, Fachbereich 6, Luft- und Raumfahrt (Prof. Dr.-Ing. G. Nonhoff), Januar 2003

[5] [5] PAS 1075 (2009): Rohre aus Polyethylen für alternative Verlegetechniken, Abmessungen, Technische Anforderungen und Prüfung

AUTOREN

Dr.-Ing. **JOACHIM HESSEL**
HESSEL Ingenieurtechnik GmbH, Roetgen
Tel. +49 2471 920 2211
joachim.hessel@hessel-ingtech.de

Prof. Dr.-Ing. **GOTTFRIED NONHOFF**
Fachhochschule Aachen, Aachen
Tel. +49 2471 4038
gottfried.nonhoff@t-online.de

DAMIR VOJNIC
HESSEL Ingenieurtechnik GmbH, Roetgen
Tel. +49 2471 920 2212
damir.vojnic@hessel-ingtech.de