

Sicherheitstechnische Aspekte von Stahlrohrleitungen

Ergebnisse von Berstversuchen an Hoch-Frequenz-Induktiv (HFI) geschweißten Rohren

Von Hendrik Löbbe¹, Hans-Jürgen Kocks¹, Gerhard Knauf² und Steffen Zimmermann²

1 Einleitung

Die Sicherheit von Transportleitungen wird in hohem Maße durch das Festigkeits- und Verformungsvermögen der eingesetzten Rohrbauteile bestimmt. Insbesondere können angestrebte hohe Betriebsdrücke, besondere Verlegeverfahren und/oder schwierige Umweltbedingungen erhebliche Anforderungen an die genannten Bauteileigenschaften stellen. Dies trifft vor allen Dingen auf Gas- oder Öltransportleitungen zu, die fossile Rohstoffe aus entlegenen Lagerstätten durch klimatisch und geographisch schwierige Gebiete über Verdichterstationen zu den Aufbereitungsanlagen führen. Meist spielen hier neben dem Lastfall „Innendruck“ weitere Lastfälle eine entscheidende Rolle. Beispielhaft seien die Lastfälle „Axialkraft“ und „Biegemoment“ genannt, die sich aus Erdbewegungen (Setzungen, Frosthub, etc.) ergeben können und sich dem Lastfall Innendruck überlagern. Solche Fragestellungen können nur im Rahmen erweiterter Festigkeitsbetrachtungen, d. h. mit Hilfe geeigneter Festigkeitshypothesen behandelt werden.

Detaillierte Festigkeitsbetrachtungen werden auch dann erforderlich, wenn Wanddickenminderungen an Leitungen vorliegen. Da insbesondere in Stadtgebieten ein wesentlicher Teil der Versorgungsinfrastruktur (Telefonkabel, Leitungen für Kabelfernsehen, Kanalisation, etc.) unterhalb der Gasleitungen verlegt ist, ist die Gefahr besonders hoch, dass Gasleitungen durch Grabungsarbeiten beschädigt werden. Auch wenn nur die Korrosionsschutzbeschichtung der Stahlrohre verletzt wird, können sich bei fehlendem kathodischen Korrosionsschutz im Laufe der Jahre signifikante Wanddickenminderungen einstellen. Werden Rohre nach der Abnahme und Zertifizierung im Rohrwerk z. B. beim Transport, der Montage oder bei Grabungsarbeiten so beschädigt, dass Korrosion auftritt, ist, ungeachtet des Verursachers, nachzuweisen, dass der betroffene Leitungsabschnitt auch mit der vorhandenen (begrenzten) Wanddickenminderung sicher betrieben werden kann. Anderenfalls ist der Abschnitt durch ein unversehrtes neues Rohrstück zu ersetzen.

Besondere Anforderungen an Rohre verlangen eine optimale Gestaltung der Bauteil-Gebrauchseigenschaften, die nur durch die geeignete Wahl des Werkstoffes und eine bestmögliche Abstimmung der einzelnen Verfahrensschritte bei der Herstellung darstellbar sind. Das heißt, das Verformungsvermögen eines Rohrbauteils ist, vom inhärenten Stoffverhalten des gelieferten Ausgangsmaterials (Warmbreitband) abgesehen, in entscheidendem Maße durch kalt verformende Arbeitsschritte und die sich möglicherweise daran anschließenden

¹ Dr. Hendrik Löbbe, Mannesmann Fuchs Rohr, Hamm, Dr. Hans-Jürgen Kocks Mannesmann Fuchs Rohr GmbH, Siegen

² Dr. Gerhard Knauf, Dr. Steffen Zimmermann, Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Duisburg

Wärmebehandlungsschritte beeinflusst. Die Mannesmann Fuchs Rohr GmbH (MFR) betreibt seit einiger Zeit intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeit auf dem Gebiet zusätzlicher äußerer Beanspruchungen von Rohren, um sich einerseits auf die Herausforderungen fortschrittlicher Normengenerationen vorzubereiten. Andererseits ist MFR bestrebt, einen kontinuierlichen Beitrag zur technologischen Weiterentwicklung des Sicherheitspotenzials von Stahlrohren zu leisten.

Vor diesem Hintergrund werden von MFR zusammen mit dem Partner Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH (SZMF) systematische Untersuchungen zur Festigkeit und zum Verformungsverhalten von Hoch-Frequenz-Induktiv (HFI) geschweißten Rohren durchgeführt. Ausgangspunkt der Betrachtungen bilden „Limit State Design“ Bemessungskonzepte, wie sie in verschiedenen Normen bereits erfolgreich umgesetzt wurden [1], [2], [3]. Limit State Design Konzepte beruhen auf definierten „Grenzzuständen“ und schließen neben dem Lastfall „Innendruck“ zusätzliche Lastfälle zwingend in die Bemessung mit ein. Eine besondere Stellung nimmt der Lastfall „Bersten infolge von Wanddickenminderungen“ ein, da es sich hier weder um eine kraft- noch um eine verformungsgesteuerte Belastung handelt. Bei eingeeordneten Leitungen sollte dieser Lastfall stets bei der Bemessung durch geeignete Ansätze Berücksichtigung finden, da sich eingeeordnete Leitungen in der Regel einer kontinuierlichen Kontrolle entziehen [4], [5].

Mit Blick auf die fortschrittliche Auslegung von Transportleitungen wurde zunächst der Grenzzustand „Bersten infolge von Wanddickenminderungen“ thematisch aufgegriffen und im Rahmen eines begrenzten Versuchsprogramms untersucht. Der vorliegende Beitrag stellt die Ergebnisse von bereits erfolgten Versuchen, die sowohl an fehlerfreien als auch mit künstlichen Fehlern versehenen Bauteilen vorgenommen wurden, und beleuchtet die mit bestimmten Defektgattungen verbundenen Traglasteinbußen.

2 Sicherheitsrelevante Maßnahmen im Rohrwerk

Neben vielfältigen mechanisch-technologischen Prüfungen des Grundwerkstoffs und der Schweißnaht kommt der Wasserdruckprüfung im Werk eine besondere Bedeutung zu. Nur sie erfasst nach Abschluss aller maßgeblichen Fertigungsschritte das Rohr in seiner Gesamtheit und damit als Bauteil. Die Wasserdruckprüfung wird üblicherweise bei Beanspruchungen in der Höhe von etwa 95% der spezifizierten Mindeststreckgrenze des Rohrwerkstoffs durchgeführt. Die Beanspruchung des Rohres während der Wasserdruckprüfung ist damit deutlich höher als die zulässigen Beanspruchungen (nach DIN EN 1594 bis 72% der spezifizierten Mindeststreckgrenze) während des Betriebs einer Transportleitung. Folglich würde die Wasserdruckprüfung beim Vorliegen eines signifikanten Fehlers oder einer unbeabsichtigten Verwechslung von Materialien zwangsläufig zum Ausfall des betreffenden Rohres führen.

In Zusammenhang mit besonderen Fragestellungen werden neben den üblichen Prüfungen spezielle Bauteilversuche an Rohren durchgeführt, wie die im Folgenden beschriebenen Berstversuche.

3 Bauteilversuche

3.1 Allgemeines

Im Rahmen des begrenzten Versuchsprogramms sollte zunächst sondiert werden, welche Tragweite Wanddickenminderungen mit Blick auf das mechanische Verhalten und damit auf die Sicherheit von druckführenden Rohrleitungen haben können. Insbesondere sollte deren Einfluss auf den Berstdruck, die Umfangsdehnung und die Art des Versagens (duktiler/spröder Bruch) untersucht werden. Zu diesem Zweck wurden insgesamt vier Hoch-Frequenz-Induktiv (HFI) geschweißte Rohre der laufenden Produktion entnommen und einem Berstversuch unterzogen. Die vier Rohre (Rohre I-IV) entstammten einem Produktionslos und waren daher aus dem gleichen Werkstoff (Güte X52 gemäß API 5L) hergestellt. Ein Rohr (RI) wurde im Lieferzustand (rohschwarz) geprüft. Ein weiteres Rohr wurde mit einem volumenartigen Defekt (RII) versehen. In die beiden verbleibenden Rohre (RIII, RIV) wurde jeweils ein scharfkantiger Defekt eingebracht. Alle Bauteilversuche an den oben beschriebenen Rohren wurden durch geeignete Werkstoffuntersuchungen begleitet.

3.2 Bauteil- und Defektgeometrien

Der Durchmesser und die Wanddicke der Rohre RI – RIV betragen $D_o = 406,4$ mm bzw. $t = 12,7$ mm. Die Geometrie möglicher Bauteildefekte kann zwischen zwei Grenzzuständen variieren. Der erste Grenzzustand ist ein volumenartiger, flach auslaufender Defekt ohne scharfkantige Begrenzungslinien, wie er im Allgemeinen bei auftretender Korrosion nach vorausgegangener Beschädigung der Schutzschicht angetroffen wird. Der zweite Grenzzustand entspricht einem rissartigen scharfkantigen Defekt im Sinne der Bruchmechanik. Rissartige Defekte können die Folge unsachgemäßer Baggerarbeiten oder anderer den Boden bearbeitender Vorgänge, z. B. mit landwirtschaftlichen Geräten, sein.

Die Abmessungen der Defekte wurden so gewählt, dass sie eine signifikante Schwächung der Rohrquerschnitte bewirkten. Darüber hinaus sollten sich die Geometrien des volumenartigen Defekts (RII) und diejenigen der in die Bauteile RIII und RIV eingebrachten Risse weitgehend entsprechen. Die Defektlängen und -tiefen der Bauteile RII - RIV waren daher gleich groß gewählt worden. Die in die Bauteile eingebrachten künstlichen Fehler können Bild 1 und Bild 2 entnommen werden.

Alle künstlich eingebrachten Fehler wurden auf die Lage der Schweißnaht bezogen um 90° versetzt angebracht. Die rissartigen Fehler der Bauteile RIII und RIV wurden in zwei Arbeitsschritten gefertigt. Dem ersten 3,0 mm tiefen Schnitt mit einem Sägeblatt der Breite $B_1 = 1,0$ mm folgte ein weiterer Schnitt mit einem Sägeblatt der Breite $B_2 = 0,2$ mm. Aufnahmen der Defekte vor der Berstdruckprüfung sind in Bild 3 zu sehen. Den Rohren wurden vor der Innendruckprüfung geeignete Verschlusskappen (Halbkugelschalen) aufgeschweißt. Die Bauteile stellten somit Behälter dar. Durch die Ausbildung der Verschlusskappen als Halbkugelböden wurde einer ausgeprägten Einflussnahme auf die Verformung der zu prüfenden Rohre vorgebeugt.

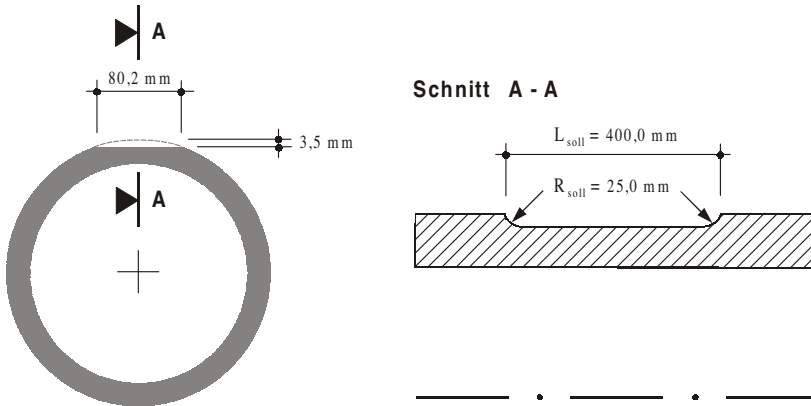


Bild 1: Geometrie des volumenartigen Defekts – Bauteil RII

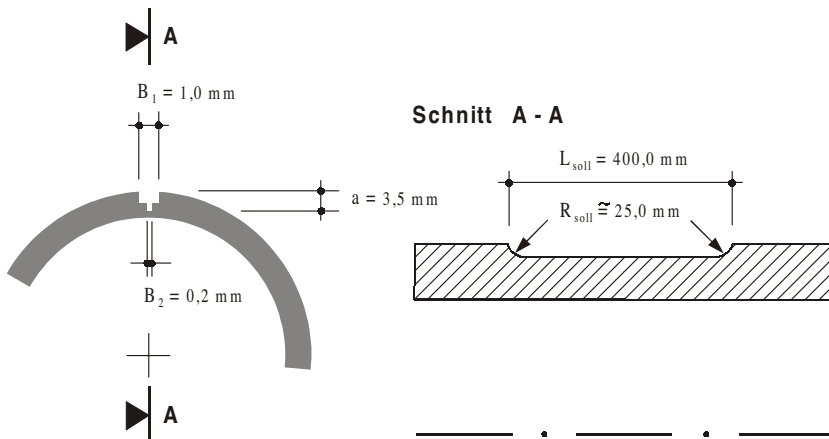


Bild 2: Geometrie der planaren Defekte (Risse) – Bauteile RIII und RIV

3.3 Prüfung am Behälter vs. eingedete Leitung

Bei der Interpretation von Versuchsergebnissen stellt sich grundsätzlich die Frage nach der Übertragbarkeit der erhaltenen Ergebnisse auf die spezifische Anwendung, so auch im vorliegenden Fall. Warum bei der Prüfung eines Behälters die Situation einer eingedeten Leitung repräsentativ wiedergegeben werden kann und welche Abweichungen sich dabei ergeben ist im Folgenden dargestellt.



Bild 3: Eingebrachte Fehler: Rissartiger Defekt (links), volumenhafter Defekt (rechts)

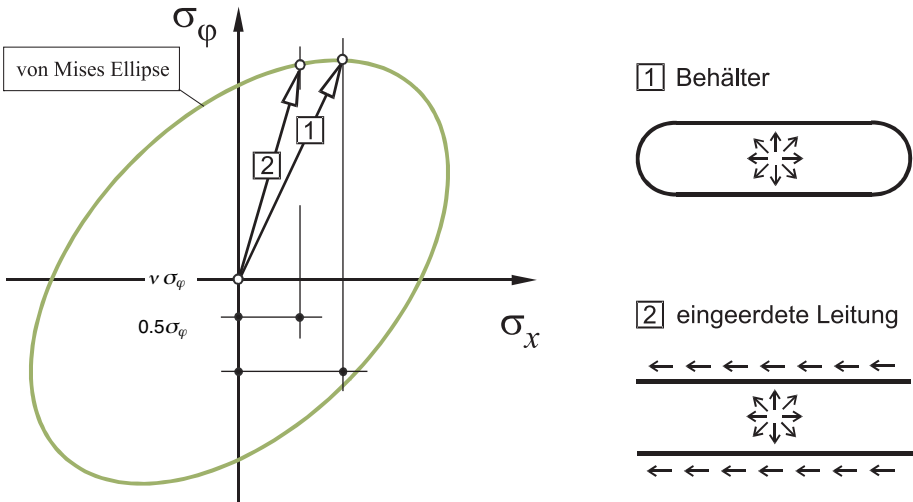


Bild 4: Vergleich der Beanspruchungen des Behälters und der Beanspruchungen der eingedeten Leitung anhand der Festigkeitshypothese nach von Mises [6]

Setzt man den gleichen Innendruck voraus, so stellt sich abseits des Einflussbereiches der Behälterböden ($\approx 1.0 \times D_a$) in Umfangsrichtung eine Umfangsspannung σ_ϕ ein, die der Umfangsspannung der eingedeten Leitung genau entspricht. In Bauteillängsrichtung unterscheiden sich jedoch die Werte der Axialspannung. Im Fall des Behälters ergibt sich die Längsspannung zu $\sigma_x = 0.5\sigma_\phi$ und im Falle der eingedeten Leitung zu $\sigma_x = v\sigma_\phi$, wobei $v = 0.3$ die Querdehnzahl von Stahl ist. Berechnet man mit den jeweils geltenden Spannungswerten die zugehörige Vergleichsspannung σ_V entsprechend der Festigkeitshypothese nach von Mises [5], so erhält man für den Fall des Behälters $\sigma_V = 0.866\sigma_\phi$ und für den Fall der eingedeten Leitung $\sigma_V = 0.889\sigma_\phi$. Die effektive Beanspruchung des Behälters weicht, bezogen auf den Fall der eingedeten Leitung, somit um weniger als 2.6% ab. Dieser hier beschriebene Sachverhalt ist in Bild 4 dargestellt.

3.4 Ergebnisse

Der bei der Druckprüfung des fehlerfreien Rohres erreichte Höchstdruck lag bei 371 bar. Die nach dem Bersten gemessene und über die Rohrlängsachse gemittelte plastische Umfangsdehnung ε_{φ} des Behälters betrug 6.0%. Die mit scharfkantigen Defekten versehenen Bauteile III und IV konnten bis zu einem maximalen Innendruck von 306 bzw. 297 bar belastet werden. Der am Bauteil II (volumenhafter Defekt) gemessene Höchstdruck betrug 312 bar. Die Berstdrücke der mit künstlichen Fehlern versehenen Rohre lagen somit erwartungsgemäß unterhalb des Höchstdrucks des ungeschädigten Rohres. Die durch künstliche Risse vorgeschädigten Rohre zeigten ausgeprägt duktiles Verhalten im Bereich der Bruchstelle, so dass der jeweilige Berstdruck nicht signifikant von jenem des durch einen Volumendefekt vorgeschädigten Rohres abwich. Einer Wanddickenreduktion von 28% stand ein Verlust an Tragfähigkeit von 19% (Risse) bzw. 16% (Volumendefekt) gegenüber.

Die jeweiligen Werte der integralen plastischen Umfangsdehnung der mit künstlichen Fehlern versehenen Rohre betragen 0.24% (Bauteil II), 0.24% (Bauteil III) bzw. 0.12% (Bauteil IV). Die Versuchsbedingungen und ein Profil der integralen plastischen Umfangsdehnung über die Bauteillänge (21 Messquerschnitte) sind für die Bauteile I, II und IV in den Bildern 5-7 gezeigt.

Im ungeschädigten Rohr trat der Bruch in einem Winkel von 78° bezogen auf die Lage der Schweißnaht auf. Im Falle der vorgeschädigten Bauteile versagte das Bauteil jeweils im Bereich der Wanddickenminderung.

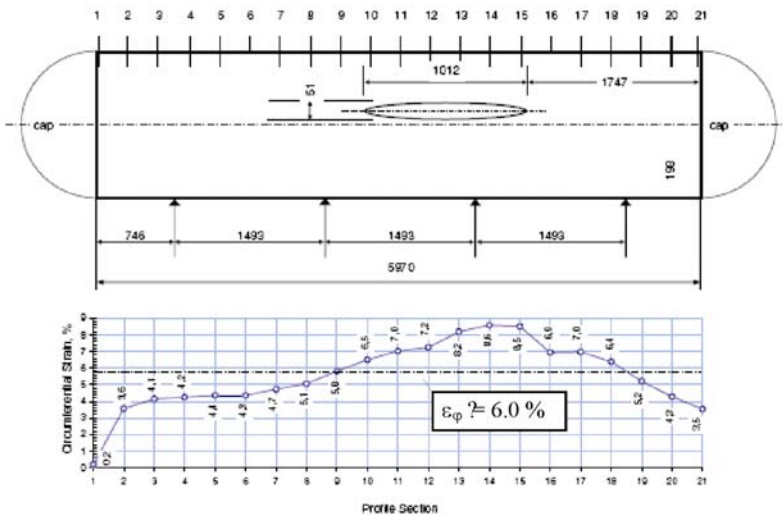


Bild 5: Versuchsbedingungen, Bruchlage und Werte der integralen plastischen Umfangsdehnung bei Bruch (Bauteil I)

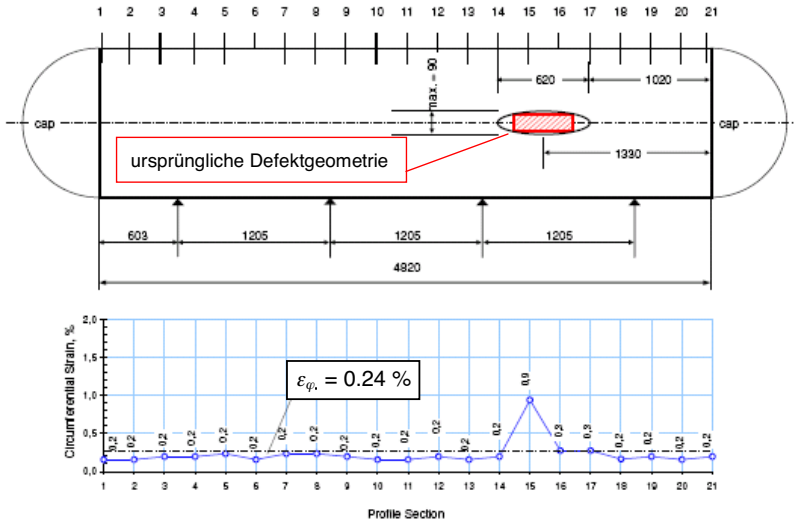


Bild 6: Versuchsbedingungen und Werte der integralen plastischen Umfangsdehnung bei Bruch (Bauteil II)

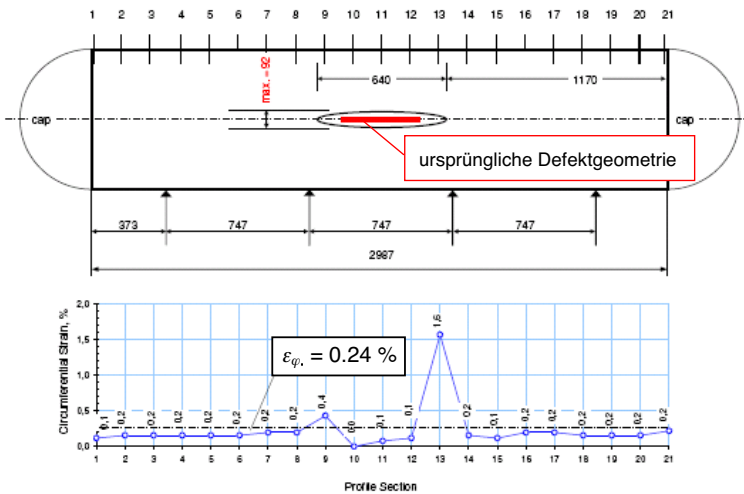


Bild 7: Versuchsbedingungen und Werte der integralen plastischen Umfangsdehnung bei Bruch (Bauteil III)

Die mit den betrachteten Defekten verbundenen überproportionalen Einbußen an plastischer Umfangsdehnung sind auf einen ausgeprägten Lokalisierungsprozess der Verformungen im Bereich der Wanddickenminderungen zurückzuführen. Das heißt, das globale Bauteilverhalten wird im Wesentlichen nur vom Defekt kontrolliert.

Das Streckgrenzenverhältnis des bei den Bauteilen I – IV eingesetzten Stahls beträgt auf der Grundlage der an Rundzugproben B 6 x 30 gemäß DIN 50 125 ermittelten Streckgrenzen $R_{10,5}$ und Zugfestigkeiten R_m $R_{10,5}/R_m = 0.73$. Aus an der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH durchgeführten früheren Untersuchungen liegen zahlreiche Ergebnisse zur integralen irreversiblen Umfangsdehnung ε_φ vor. Diese sind in Bild 8 über dem Streckgrenzenverhältnis der zugehörigen Rohrstähle aufgetragen. In Bild 8 ist darüber hinaus die am Bauteil I gemessene bleibende Umfangsdehnung dargestellt. Er wird deutlich, dass das sich das unversehrte HFI-Rohr gut in die Gesamtheit der vorhandenen Datenpunkte einfügt.

3.5 Vergleich mit den bei der Bemessung geltenden Anforderungen

Bei der Bemessung von Rohrleitungen wird im Allgemeinen auf die Kesselformel zurückgegriffen, so auch in DIN EN 1594 [1]. Als Werkstoffeigabeparameter ist die spezifizierete Mindeststreckgrenze $SMYS$ einzugeben, die durch den geltenden Nutzungsgrad f_0 abzumindern ist. Aufgelöst nach dem zulässigen Druck p_{zul} lautet die Bemessungsgleichung:

$$p_{zul} = f_0 SMYS \frac{2t}{D_a} . \quad (1)$$

Darin wird die Geometrie des Rohres durch den Rohraußendurchmesser D_a und die Wanddicke t berücksichtigt. Aus physikalischer Sicht ist es sinnvoller den Druck, bei dem Fließen eintritt, mit dem mittleren Rohrdurchmesser D_m (anstelle des Außendurchmessers D_a) und ohne

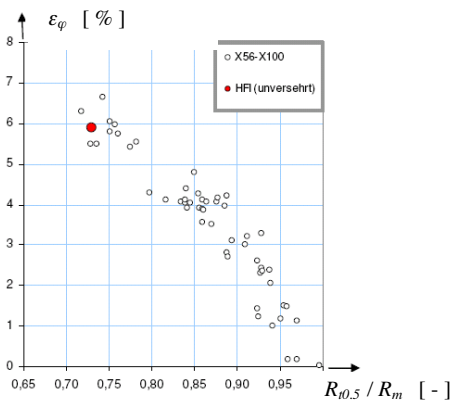


Bild 8: Wete der integralen plastischen Umfangsdehnung

Berücksichtigung des Nutzungsgrades f_0 zu berechnen. Daher soll im Folgenden zunächst, entgegen der in DIN EN 1594 vorgeschlagenen Gleichung (1), Gleichung (2) zur Anwendung kommen:

$$p_{zul} = SMYS \frac{2t}{D_m} \quad (2)$$

Mit der für den Rohrwerkstoff X52 festgelegten spezifizierten Mindeststreckgrenze $SMYS = 359 \text{ MPa}$ ergibt sich somit ein kritischer Druck $p_{zul} = 231 \text{ bar}$. Durch einen Vergleich mit den an den vorgeschädigten Bauteilen (II, III, IV) ermittelten Berstdrücken (312, 306 bzw. 297 bar) wird ersichtlich, dass selbst bei Vorhandensein signifikanter Wanddickenminderungen Fließen erst bei Drücken erfolgt, die um minimal 30% (Risse) bzw. 35% (volumenhafte Defekte) höher liegen als der Druck bei Erreichen der spezifizierten Mindeststreckgrenze.

Legt man zu Vergleichszwecken der Betrachtung Gleichung (1) mit einem fiktiven Nutzungsgrad $f_0 = 1.0$ zugrunde, so ergibt sich der Fließdruck zu $p_{zul} = 224 \text{ bar}$. D. h. durch Berücksichtigung des Rohraußen- anstelle des Rohrinneindurchmessers vergrößern sich oben genannte Sicherheitsabstände um weitere 4% auf 34 bzw. 39%. Die Berücksichtigung des nach DIN EN 1594 maximal zulässigen Nutzungsgrades $f_0 = 0.72$ (dieser darf im realen Betrieb auf keinen Fall überschritten werden) würde eine Steigerung der vorhandenen Sicherheiten um zusätzliche 39% bedingen.

4 Schlussbemerkungen

Zielsetzung der durchgeführten Untersuchung war es, den Einfluss von Wanddickenminderungen hinsichtlich der (Rest-)Tragfähigkeit und des Verformungsvermögens von HFI-Rohren zu charakterisieren. Aufgrund des ausgeprägt duktilen Verhaltens des bei den Versuchen eingesetzten Rohrstahts und der vorliegenden Fehlertiefen-/Wanddickenverhältnisse wurden bei Vorhandensein rissartiger Fehler nur geringfügig geringere Berstdrücke erreicht als bei einem durch einen geometrisch vergleichbaren Volumendefekt geschädigtes Rohr. Insbesondere wurde der bei der Bemessung nach DIN EN 1594 ermittelte zulässige Betriebsdruck des ungeschädigten Rohres auch im Falle der mit künstlichen Fehlern versehenen Rohre weit übertroffen.

Zur Bewertung rissartiger wie auch volumenhafter Defekte liegen zahlreiche Rechenverfahren vor. Die Anwendung und Evaluierung solcher Verfahren ist Gegenstand eines aktuellen Forschungsvorhabens der Mannesmann Fuchs Rohr GmbH, dessen Ergebnisse zu einem späteren Zeitpunkt veröffentlicht werden sollen.

Liegen noch ungünstigere Fehlertiefen-/Wanddickenverhältnisse vor, so sollten neben dem Lastfall Innendruck in jedem Fall auch weitere Aspekte bei der Festigkeitsbetrachtung Berücksichtigung finden. In diesem Zusammenhang sei beispielhaft auf die Auswirkungen verschleißungsinduzierter Einwirkungen oder punktförmiger Verkehrsauflasten hingewiesen.

Die Verformungsfähigkeit des unversehrten HFI-Rohres entspricht den an Transportleitungen im Allgemeinen gestellten Anforderungen. Der gemessene Wert der integralen plastischen Umfangsdehnung bei Bruch entspricht der Größenordnung, die aufgrund des Streckgrenzenverhältnisses zu erwarten ist. Die integrale bleibende Umfangsdehnung der vorgeschädigten Rohre fiel erwartungsgemäß deutlich geringer aus. Ausgeprägte Defekte führen zu einer stark ausgeprägten Lokalisierung der Verformungen und damit grundsätzlich zu geringen integralen Werten der Dehnung.

Durch strenge Prozesskontrolle und Qualitätssicherungsmaßnahmen stellen HFI geschweißte Rohre hochwertige Produkte dar.

5 Literaturhinweise

- [1] Deutsches Institut für Normung, DIN EN 1594 Rohrleitungen für einen maximal zulässigen Betriebsdruck über 16 bar. Funktionale Anforderungen, 2000
- [2] Deutsches Institut für Normung, DIN V ENV 1993-4-3 (Eurocode 3) Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 4-3: Silos, Tanks und Rohrleitungen, 1999
- [3] Det Norske Veritas, DNV OS-F101 Submarine Pipeline Systems, 2000
- [4] Nessim M., Zhou W., Zimmerman T. "A design to depend on", World Pipelines, February 2006
- [5] McNealy R., Vinjamuri G. "Inspective integrity management incorporates tool performance", Oil and Gas Journal, April 2006
- [6] Von Mises R. „Mechanik der plastischen Formänderung von Kristallen“, Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik 8 (1928), pp. 161-185