Berechnung und Bewertung von Wanddickenverschwächungen in Gashochdruckleitungen

Calculation and evaluation of wall-thickness erosion in high-pressure gas pipes

G. Bode, M. Dornhege, F. Schlemm und M. Veenker

Zusammenfassung

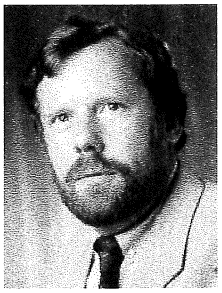
Gashochdruckleitungen ist unter dem Aspekt der Standsicherheit besondere Beachtung zu schenken, da bei unsachgemäßem Betreiben erhebliche Gefahren von den Leitungen ausgehen können. Trotz der damit verbundenen hohen Anforderungen an die Sicherheit sind die Leitungen – wie alle Wirtschaftsgüter – unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit zu betrachten. Insbesondere die Sanierung von Wanddikkenverschwächungen kann sehr kostspielig sein, und es müssen die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten so genutzt werden, daß Kosten gesenkt werden und der wirtschaftliche Betrieb ohne Sicherheitsrisiken gewährleistet ist.

Es wird ein Berechnungs- und Bemessungsverfahren vorgestellt, das eine genaue Untersuchung einer aufgefundenen Leitungsverschwächung erlaubt und in vielen Fällen trotz signifikanter Verschwächungen den uneingeschränkten Weiterbetrieb der Leitung ermöglicht. Dadurch wird das häufig praktizierte Austauschen von Leitungsteilen vermieden und eine hohe Kosteneinsparung erreicht. Die vorgestellte Methode ist theoretisch, meßtechnisch und durch Großversuche abgesichert und damit auch für das besondere Tragwerk „Gashochdruckleitung" zuverlässig.

Summary

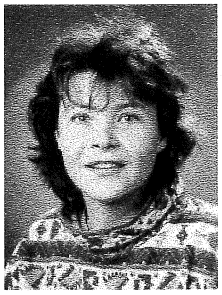
Particular attention must be devoted to the strength and stability of high-pressure gas pipes since significant dangers can arise in case of incorrect operation. Despite the high safety requirements, such pipes, like all capital goods, are also subject to economic forces. The repair of wall-thickness erosion, in particular, can be extremely expensive and the potentials available must be exploited in such a way that costs are minimized and cost-effective operation guaranteed with no loss of safety.

A calculation and dimensioning method which permits precise assessment of any detected reduction of wall-thickness and in many cases makes it possible to continue operating the pipe without restriction despite significant erosion is presented. This method thus makes it possible to avoid the frequently practiced replacement of sections of piping and achieves high cost-savings. The method presented here has been substantiated both by theory, measurements and large- scale tests and is therefore known to be reliable for the special engineering systems commonly known as high-pressure gas pipes.



Dipl.-Ing. Gerd Bode
* 29. Juni 1952 in Salzgitter

BEB Erdgas und Erdöl GmbH, Hannover; Tel. (9 59 26) 81-2 56. – Leiter der Betrieblichen Planung; Aufgabenbereich Anpassung, Aktualisierung und Optimierung von betrieblichen Abläufen und Systemen für den Bereich Transportleitungen und Verdichter.

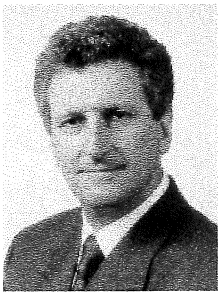


Dipl.-Ing. Marita Dornhege

Ingenieurbüro Dr. Veenker, Hannover; Tel. (05 11) 2 84 99-0. – Aufgabenbereich Planung, Berechung und Bewertung von Rohrleitungen und Anlagen.

Dipl.-Ing. Friedrich Schlemm
* 22. Januar 1937 in Pattensen

BEB Ergas und Erdöl GmbH, Hannover; Tel. (05 11) 64 12-3 22. – Direktor der Hauptabteilung Betriebe. – Mitglied in WEG/TBW, DVGW, DGMK sowie DIN/NÖG.



Dr.-Ing. Manfred Veenker
* 7. Mai 1947 in Meppen

Ingenieurbüro Dr. Veenker, Hannover; Tel. (05 11) 2 84 99-0. – Planung, Beratung und Berechung auf den Gebieten Rohrleitungs- und Anlagenbau, Bauwesen und Maschinenbau. – Vereidigter Sachverständiger für Statik im Ingenieurbau.

Einleitung

Der Gasmarkt Europa wird in Zukunft durch zunehmende Konkurrenz gekennzeichnet sein. Eine vorrangige Aufgabe besteht deshalb darin, erhöhte Anstrengung für die Kostensenkung zu machen, damit man im Wettbewerb bestehen kann. Wesentliche „Kostentreiber" beim Betrieb von Gashochdruck-Leitungsnetzen sind die Instandhaltungsmaßnahmen, die sich aus den Elementen Wartung, Inspektion und Reparatur zusammensetzen. Für diese Instandhaltungsmaßnahmen ist ein Optimum ohne erhöhte Aufwendungen im Investitionsbereich zu finden. Das führt zwangsläufig zu der Frage, wo Grenzen der Belastbarkeit von Leitungen liegen, die aus verschiedensten Gründen in Teilbereichen geschwächt sind. Die weiteren Ausführungen beschäftigen sich damit, fundierte Entscheidungshilfen für eine Bewertung der jeweiligen Wanddickenverschwächung zu finden.

Trotz ausgereifter Schutztechniken können eingeerdete Gashochdruckleitungen aus dem Werkstoff Stahl nicht vollstän-

dig vor lokalen Wanddickenverschwächungen geschützt werden. Die Gründe dafür liegen in defekter Umhüllung, mangelnder örtlicher Ausbildung des kathodischen Korrosionsschutzes, wechselstrominduzierter Korrosion oder dem Auftreten sulfatreduzierender Bakterien (SRB) als Hauptursachen. Aber auch mechanische Beschädigungen durch Grabenfräsen, Tiefpflüge und ähnliche Geräte führen zu Verschwächungen. Das häufige Auftreten der Verschwächungen in den letzten Jahren ist keineswegs ein Hinweis darauf, daß die Leitungen in dieser Hinsicht „schlechter" oder gefährdeter geworden sind, sondern ist darin begründet, daß die Detektionsmethoden (Intensivmessung, Einsatz intelligenter Molche usw.) erheblich verbessert worden sind.

Das Deutsche Regelwerk für Gashochdruckleitungen verlangt grundsätzlich, daß die nach der „Kesselformel" unter Berücksichtigung der vorgegebenen Sicherheitszahlen ermittelte Wanddicke nicht oder nur in sehr engen Toleranzen unterschritten wird. DIN 17172, 6.8.2.2 und DIN 2413, 5.3.2 lassen Wanddickenverschwächungen und damit verbundene Spannungserhöhungen theoretisch zu, geben aber keine praktischen Hinweise, die dem ausführenden Ingenieur einen sicheren Rahmen für seine Berechnungen geben würden.

Diese Situation hat dazu geführt, daß nach dem Auffinden signifikanter Wanddickenverschwächungen im allgemeinen die entsprechenden Rohrstücke ausgetauscht oder die Verschwächungen durch Flicken oder gar Auftragsschweißungen „verstärkt" werden. Das Austauschen von Rohrleitungen ist neben der temporären Versorgungsunterbrechung mit erheblichen Kosten verbunden. Das Anordnen von Auftragsschweißungen oder Flicken ist wegen der dabei örtlich eingetragenen Eigenspannungen abzulehnen, da es die Situation im allgemeinen eher verschlechtert. Die Montage von Reparaturschellen ist möglich, wird aber im allgemeinen nicht als Dauerlösung angesehen.

In der Amerikanischen Norm ASME Code for Pressure Piping B31G, 1991 [1] ist ein halbempirisches Verfahren angegeben, das eine Bewertung von Wanddickenverschwächungen zuläßt. Dieses Verfahren ist sehr anwenderfreundlich, hat aber den Nachteil, daß alle irgendwie gearteten Verschwächungen durch einfache mathematische Funktionen angenähert und nur durch ihre Länge in Rohrachsrichtung und durch ihre Tiefe beschrieben werden. Die Ergebnisse müssen zwangsläufig – auch wenn sie in der Nähe der wirklichen Lösung liegen – unwirtschaftlich oder unsicher sein. Eine große Anzahl von Veröffentlichungen im Nachgang zu der Vorschrift [1], die in [2] bis [10] zitiert sind, hat das Verfahren zwar verfeinert, aber den genannten grundsätzlichen Mangel nicht behoben.

Im folgenden wird ein Berechnungs- und Bewertungsverfahren vorgestellt, das auf die jeweils konkret vorliegende einzelne Verschwächung zugeschnitten ist und das eine sichere abschließende Bewertung zuläßt. Das Verfahren ist von BEB zur Anwendungsreife gebracht worden, damit die oben angeführte Anforderungen an den sicheren und wirtschaftlichen Leitungsbetrieb erfüllt werden.

Sicherheitsphilosophie

Grundlage der Bemessung von Stahltragwerken ist, eine vorhandene Spannung mit der zulässigen Spannung des Werkstoffs zu vergleichen. Die zulässige Spannung ergibt sich aus einer „Grenzspannung", mit der die Ausbildung eines sicheren Gleichgewichtes möglich ist, dividiert durch die Sicherheitszahl. Im Stahlbau ist die theoretische (einaxiale) Fließspannung als Grenzspannung definiert, obwohl noch höhere Spannungen möglich sind, und die zugehörigen Sicherheitszahlen liegen in der Größenordnung von 1,5 (festgeschrieben in den jeweiligen Normen). Diese Denkweise erleichtert das Aufstellen statischer Berechnungen sehr. Es gilt das Hookesche Gesetz, geometrisch oder physikalisch nichtlineare Rechenverfahren brauchen nicht angewandt zu werden.

Es verbleibt jedoch eine ungenutzte Tragreserve im Werkstoff, da ein statisch unbestimmtes System im Fließprozeß zu Lastumlagerungen fähig ist. Diese Reserve zu nutzen bedeutet eine wirtschaftliche Optimierung des Tragwerkes. Im Stahlhochbau (DIN 18800 ff.) ist die Mobilisierung dieser Tragreserve zugelassen. Plastische Verformungen dürfen auftreten, wenn die Tragsicherheit des Gesamttragwerkes nicht eingeschränkt ist. Der Nachweis ist vom Aufsteller zu erbringen.

Es liegt nahe, ähnliche Sicherheitsphilosophien für Gashochdruckleitungen aufzustellen, da örtliche Verschwächungen nur zur Ausbildung örtlicher Fließzonen führen, die durch Belastungsumordnung zum Mittragen benachbarter Bereiche führen.

Die Schere zwischen Sicherheit und Wirtschaftlichkeit

Gashochdruckleitungen sind – im Gegensatz zu fast allen anderen Tragwerken – dadurch gekennzeichnet, daß der bestimmungsgemäße Hauptlastfall „Innendruck" praktisch immer und überall im Tragwerk in voller Höhe ansteht. Es gibt somit keine versteckten Reserven aus dem Verhältnis von rechnerischer Maximallast zu wirklicher Belastung, wie sie sonst anzutreffen sind. Unter Beachtung des Gefährdungspotentials, das eine Gashochdruckleitung bei unsachgemäßem Betrieb darstellt, ist die Frage der Sicherheiten sehr konservativ zu behandeln, insbesondere wenn der Grundrahmen bestehender Vorschriften verlassen bzw. ausgeweitet wird.

Auf der anderen Seite kann die Frage des wirtschaftlichen Betriebs von Leitungen nicht außer Acht gelassen werden. Dabei darf berücksichtigt werden, daß der Stand von Wissenschaft und Forschung in den gängigen Vorschriften noch keinen Niederschlag gefunden hat und diese Vorschriften im allgemeinen nur vage Hinweise auf entsprechende Möglichkeiten geben.

Überhöhte Sicherheiten bei der Auslegung von Gashochdruckleitungen sind nicht zielführend, da nicht alle Bereiche möglicher Beeinträchtigungen erreicht werden und sie zu erhöhten – vielfach unnötigen – Aufwendungen führen. Es muß daher erlaubt sein, das notwenige Maß für eine ausreichende Sicherheit zu definieren und im Rahmen dieser Möglichkeiten ein Kostenoptimum zu finden.

Berechnung von Wanddickenverschwächungen

Mit der Finite-Element-Methode (FEM) ist in den letzten Jahrzehnten ein Verfahren entwickelt worden, das es erlaubt, beliebige Strukturen unter statischer oder dynamischer Lasteinwirkung mit hoher Genauigkeit zu berechnen. Die Genauigkeit ist insbesondere dadurch zu erreichen, daß die Struktur – insbesondere an „Störstellen" wie Lasteinleitungen, Auflager oder Verschwächungen sie darstellen – möglichst fein diskretisiert wird. Die Wahl des richtigen Elementtyps ist dabei von größter Wichtigkeit. Das Verfahren ist so ausgereift, daß diese Voraussetzungen im allgemeinen problemlos erfüllt werden können. Es ist jedoch notwendig, die Größe des Restfehlers durch Konvergenzbetrachtungen, Gegenrechnungen und Messungen einzugrenzen.

Für die vorliegende Aufgabenstellung ist die Diskretisierung eines Verschwächungsbereiches beispielhaft in Bild 1 dargestellt. Die feine Diskretisierung im Verschwächungsbereich ergibt sich aus Konvergenzstudien. Elementlängen, die klei-

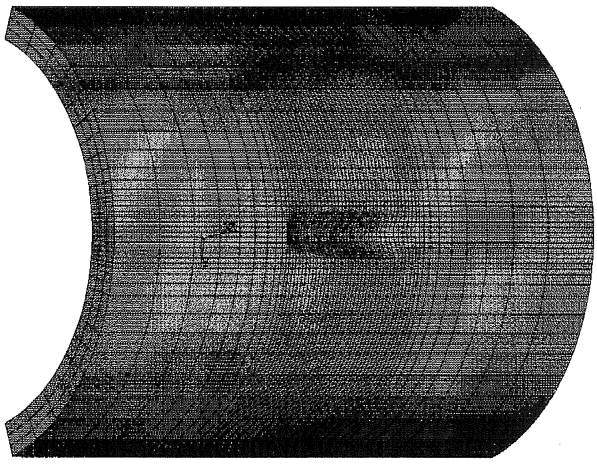
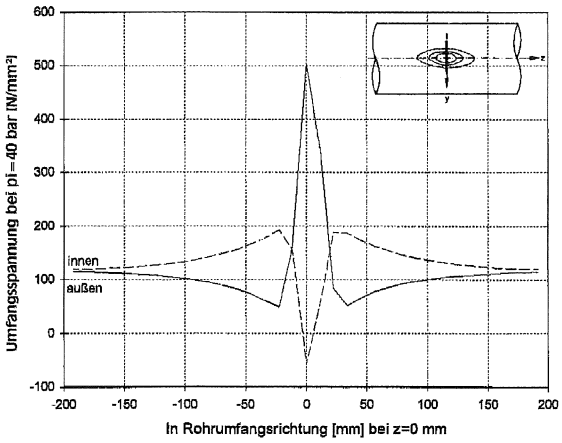


Bild 1: FEM-Darstellung einer Verschwächung

Fig. 1: FEM depiction of a reduction in wall-thickness



Rohr B Verschwächung (1), FEM-Berechung

Bild 3: Umfangsspannung im Verschwächungsbereich außen und innen

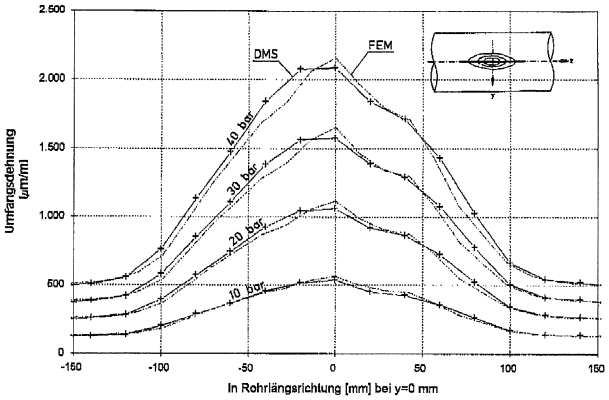
Fig. 3: Circumferential stress, external and internal, around the reduction in wall-thickness

ner sind, als die Wanddicke, liefern im allgemeinen gute Ergebnisse.

In Bild 2 sind für die Dehnungen in Umfangsrichtung FEM-Ergebnisse und Meßergebnisse zusammengestellt worden, die die ausgezeichnete Übereinstimmung zeigen. Damit wird angezeigt, daß mit vertretbarem Aufwand exakte Berechnungen durchgeführt werden können.

Interpretation der Ergebnisse

Die in Bild 3 dargestellten Ergebnisse resultieren aus der Berechnung der in Bild 5 dargestellten Verschwächung. Die Berechnung zeigt nachvollziehbare Ergebnisse. Die Umfangsspannungen auf der Außenseite liegen neben der Verschwächung unter dem Regelwert nach der Kesselformel und in der Verschwächung deutlich höher. Auf der Rohrinnenseite ergeben sich für die Umfangsspannungen neben der Verschwächung Spannungszunahmen und in der Verschwächung Abminderungen. Die Biegung aus Exentrizität der Umfangskraft in der Verschwächung und die Wanddikkenminderung selbst führen zu diesen Erscheinungen.

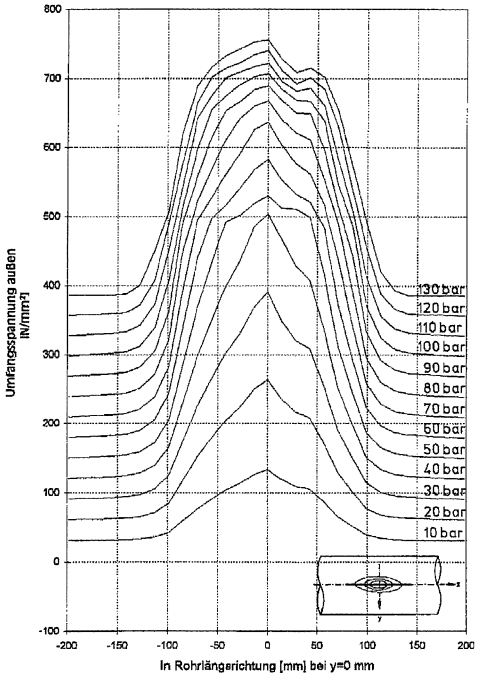


Rohr B Verschwächung (1), DMS-Messung, FEM-Berechnung

Bild 2: FEM-Ergebnisse und DMS-Messungen (Dehnungen ε_U) für die Verschwächung nach Bild 1

Fig. 2: FEM results and strain-gauge measurements (strains ε_U) for the reduction in wall-thickness shown in figure 1

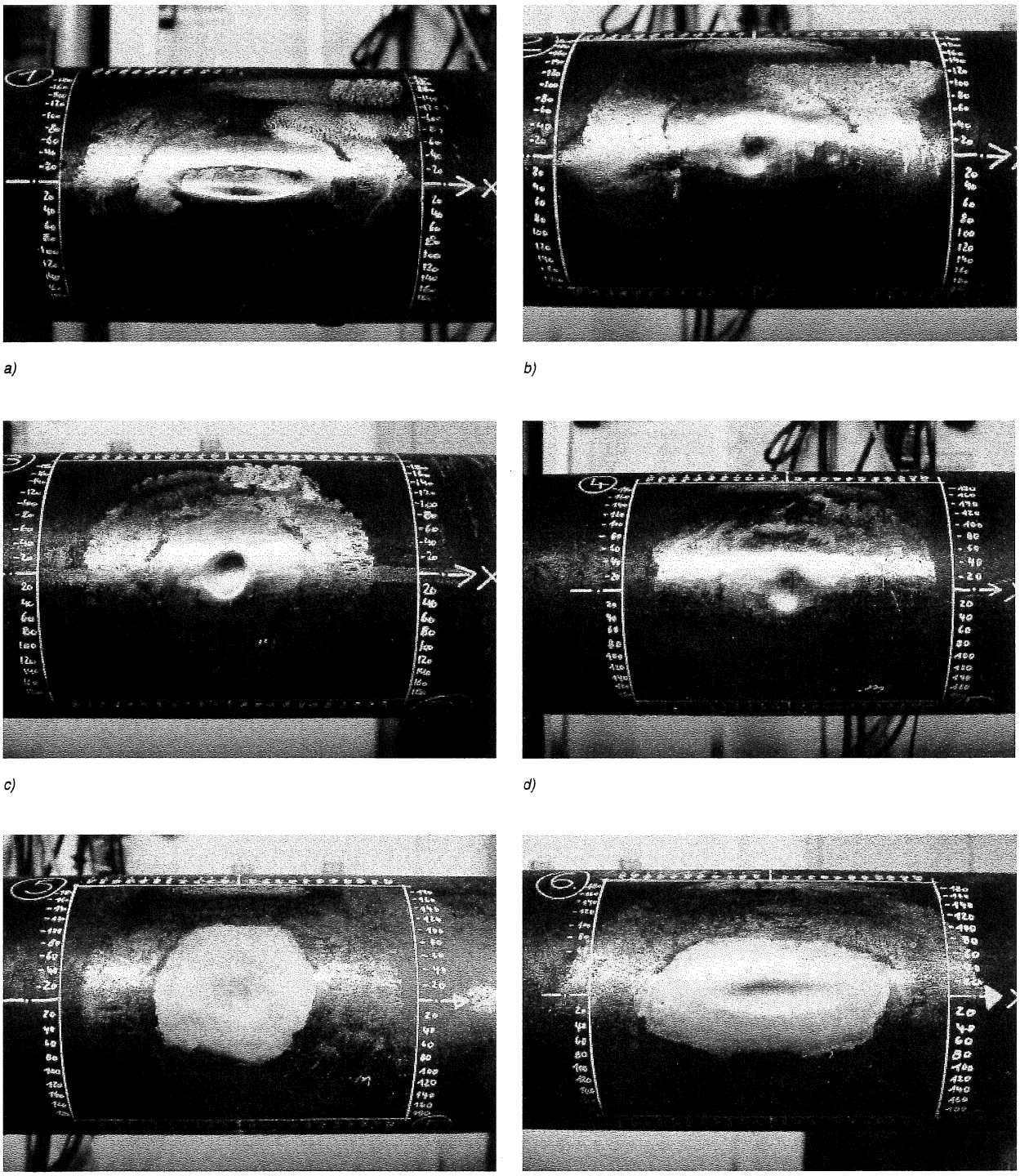
Aufschlußreicher ist die Darstellung in Bild 4, die den Gesamtspannungsverlauf der Umfangsspannung auf der Rohraußenseite im Verschwächungsbereich über verschiedene Druckstufen aufzeigt. Die hohen Zugspannungen im Bereich der Verschwächung erreichen schnell den nichtlinearen Bereich und nehmen dann unterproportional zu. Aus Gleichgewichtsgründen wächst die Spannung im Nachbarbereich rechts und links neben der Verschwächung, was aus der „Lastumlagerung" folgt. Das Tragwerk verhält sich also „gutmütig", in dem es unverschwächte Nachbarbereiche zur Lastabtragung mobilisiert.



Rohr B Verschwächung (1), FEM-Berechung

Bild 4: Entwicklung der Spannungen in Umfangsrichtung über die Druckerhöhung

Fig. 4: The development of stresses in the circumferential direction plotted against increase in pressure



a) b) c) d) e) f)

Bild 5: Darstellung der untersuchten charakteristischen Verschwächungsarten
Fig. 5: The typical types of reduction in wall-thickness investigated

Wesentlich ist aber, daß beim Erreichen der Fließspannung auf der Rohraußenseite im Verschwächungsbereich die Innenfaser fast unbelastet ist, was aus dem exzentrischen Lastangriff rührt, und eine hohe Tragreserve darstellt. Darauf ist bei der Verschwächungsbewertung einzugehen.

Ergebnisse der hier vorgestellten Art, die an einer langen, tiefen ausgerundeten Kerbe errechnet wurden, sind in ähnlicher Weise für alle untersuchten außenliegenden Verschwächungen gefunden worden, so daß von einer Gesetzmäßigkeit gesprochen werden kann.

Bemessungskonzept

Werden bei einer Beurteilung die Reserven eines Bauteils im plastischen Bereich berücksichtigt, so ist der Belastungszustand (hier der Innendruck) mit dem erforderlichen Sicherheitsbeiwert zu beaufschlagen, und es ist nachzuweisen, daß die daraus ermittelten Spannungen einen Grenzzustand nicht überschreiten. Der Grenzzustand stellt die höchste Beanspruchung für eine Verschwächung dar, die durch das Tragsystem im ungünstigsten Fall mit Sicherheit aufgenommen werden kann. Sichergestellt ist die Tragfähigkeit, wenn das Integral der Umfangsspannungen über die Wanddicke die Streckgrenze des Werkstoffs nicht überschreitet und die am meisten beanspruchte plastifizierte Randfaser die Zugfestigkeit des Werkstoffs nicht erreicht. Die Größe der auftretenden Dehnungen muß zusätzlich kontrolliert werden. Durch diese Art der Bemessung werden folgende Reserven berücksichtigt:

1. Möglichkeit zur Lastumlagerung aus der Duktilität des Werkstoffs,
2. lokale Biegebeanspruchung in der Verschwächung mit gering beanspruchten Fasern in der „Druckzone",
3. Optimierung der Ergebnisse durch nichtlineare Berechnung am verformten System.

Die Grenzwerte Zugfestigkeit und Streckgrenze sind nur mit einem relativ geringen Teilsicherheitsbeiwert zu belegen.

Ist für eine vorliegende Verschwächung der maximal zulässige Innendruck zu ermitteln, so wird der Innendruck für das Erreichen des Grenzzustandes berechnet und anschließend durch den Sicherheitsbeiwert geteilt. Daraus ergibt sich der zulässige Innendruck.

Die hier vorgestellte Berechnungsmethode und das Bemessungskonzept erlauben den Nachweis
— von Verschwächungen mit besonderen Formen,
— von kombinierten Belastungszuständen,
— bei zusätzlicher Belastung einer Leitung durch Setzungen

und eine Berücksichtigung der Interaktion mehrerer Schäden. Das Verfahren stellt also den wirklichen Beanspruchungszustand aus allen Belastungen und Verschwächungen der Leitung dar.

Versuchsdurchführungen zur Verifizierung

Komplexe Berechnungen der hier vorgestellten Art bedürfen wegen der Tragweite der Ergebnisse unbedingt einer Überprüfung durch Versuche. Im wesentlichen ist bei diesen Versuchen zu überprüfen, ob die ermittelten Ergebnisse für die Dehnungen und Spannungen grundsätzlich richtig sind und insbesondere, ob das Werkstoffgesetz für die Berechnung richtig aufbereitet wurde.

Die Untersuchungen wurden an Testrohren durchgeführt, denen im Labor mechanisch Verschwächungen zugefügt wurden, die den am häufigsten anzutreffenden Wanddickenminderungen entsprechen und auch gemäß einer Voruntersuchung allgemeingültige Ergebnisse erwarten ließen. Die untersuchten Verschwächungstypen sind in Bildern 5 a bis f dargestellt.

Die Beanspruchung der Rohre im verschwächten Bereich wurde durch Dehnungsmeßstreifen (DMS) meßtechnisch erfaßt.

Auf den Versuchskörpern wurden auf der Rohraußenseite in der Mitte der Verschwächung DMS mit einem geringen Abstand zueinander als DMS-Ketten angeordnet (Bild 6). Anhand dieser Aufteilung konnte der Verlauf der Dehnungen über die Verschwächung als Funktion dargestellt werden. Das hatte den Vorteil, daß die Berechnungsergebnisse anhand der Finite-Elemente-Methode nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ bewertet werden konnten. Die DMS wurden an den Seiten bis in den ungeschwächten Rohrbereich geführt, so daß das Ergebnis auch mit Hilfe der „Kesselformel" überprüft werden konnte.

Die Versuche wurden in zwei Etappen durchgeführt. Zuerst wurde der Innendruck auf eine Größe begrenzt, bei der keine Dehnungen oberhalb des linear-elastischen Bereiches erzeugt wurden. Die Versuchsdurchführung war dadurch reproduzierbar. Der Innendruck wurde in Druckstufen von 5 oder 10 bar erhöht.

In der zweiten Versuchsetappe wurde die Fließspannung überschritten, wobei das Augenmerk auf der Entwicklung der Dehnungen in der Verschwächungsmitte bei hohem Druck lag. Der Innendruck wurde wieder in Druckstufen von 10 bar erhöht. Nach jeder Druckerhöhung wurde gewartet, bis die DMS konstante Werte anzeigten, das heißt zeitabhängige Verformungsänderungen abgeschlossen waren.

Die Versuchsrohre wurden bis zum Bersten belastet.

Ausblick und Anwendung des Verfahrens

Die bisherigen Erfahrungen mit dem hier vorgestellten Rechenverfahren zeigen, daß in allen Fällen eine klare Entscheidung gefällt werden kann, ob das betreffende Leitungsstück ausgetauscht, eine Reparaturschelle gesetzt oder der Innendruck auf ein genau zu berechnendes Maß reduziert wird. In überraschend vielen Fällen kommt es trotz signifikanter Verschwächungen zu der Aussage, daß die Leitung ohne Einschränkung mit ihrem bisherigen Nenndruck weiter betrieben werden darf. Es ist selbstverständlich, daß die Schadensstelle sorgfältig beschliffen und die Umhüllung vor dem Verfüllen des Rohrgrabens wiederhergestellt wird.

Es ist besonders darauf zu achten, welcher Gesamtbelastung die Leitung unterworfen ist. Wenn zum Beispiel in der Nähe der Schadensstelle nachträglich die Leitung durch Dämme überschüttet wurde und damit Verbiegungen aus Setzungen erfährt, wenn im Schadensbereich mit signifikanten Verkehrslasten zu rechnen ist oder ähnliche nennenswerte Zusatzlasten erwartet werden, dann sind diese Lasten in die statische Berechnung der Schadensstelle einzubeziehen. Da die Schadensstelle als wirkliches statisches System mit der FEM korrekt berechnet wird, ist es möglich, die oben beschriebenen Zusatzlasten dem System zuzuweisen und den Gesamtspannungszustand in der Schadensstelle zu ermitteln. Es verbleibt somit keine erhöhte Restunsicherheit.

Wanddickenverschwächungen können mit Hilfe der KKS-Intensivmessung oder Intelligenter Molche gefunden werden. Beim Einsatz Intelligenter Molche bieten sich das Ultraschall-Verfahren oder das Magnet-Streufluß-Verfahren an. Während die Intensivmessung nur indirekt Hinweise auf das Vorliegen einer Verschwächung gibt und in Wirklichkeit nur Fehler an der Leitungsisolierung aufzeigt, geben Intelligente Molche ein recht genaues Bild von Lage, Ausdehnung und Tiefe der Verschwächung wieder. Dieses „Aufmessen" von Verschwächungen mit Hilfe eines Intelligenten Molches ist allerdings allenfalls geeignet, eine überschlägliche erste Bewertung nach [1] oder den Abgleich mit den zulässigen Toleranzen nach DIN 17172 zu liefern. Für eine genaue Berechnung sind die Ergebnisse von Molchungen zu ungenau.

Bei begründetem Verdacht auf Vorliegen einer signifikanten Verschwächung muß der Bereich aufgegraben, inspiziert und vermessen werden. Hierfür hat sich als günstigstes Verfahren die Ultraschallmessung von Hand erwiesen. Das Meßraster muß so eng sein, daß es die Charakteristik der Verschwächung erfaßt. Im allgemeinen reichen Meßpunktabstände in der Größenordnung der Wanddicke.

Wanddickenverschwächungen, die unter der zulässigen Toleranz nach DIN 17172 liegen und keine Auffälligkeiten wie au-

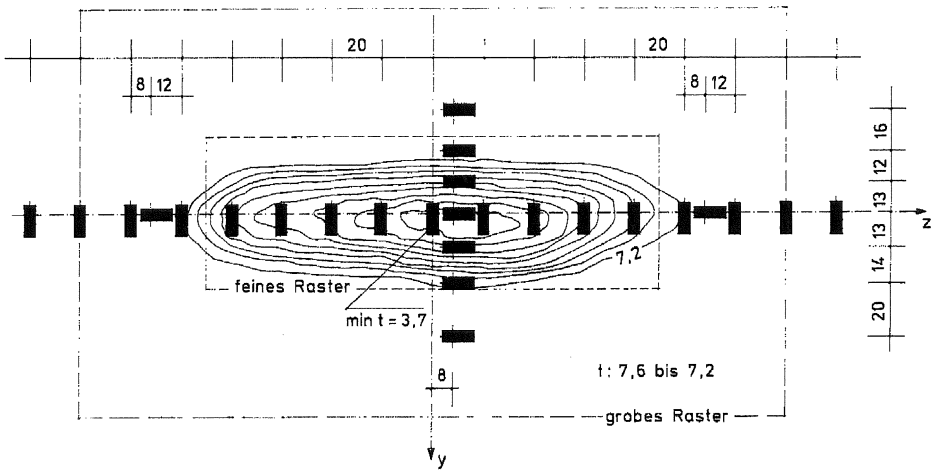


Bild 6: Anordnung der Dehnungsmeßstreifen

Fig. 6: Strain-gauge apparatus arrangement

ßergewöhnliche Ausdehnungen, Riefen, Kerben, Risse usw. haben, bedürfen keiner exakten Berechnung, da die Anwendung dieses Verfahrens in allen untersuchten Fällen die uneingeschränkte Tragfähigkeit des Systems liefert. Es sei jedoch nachdrücklich darauf hingewiesen, daß die angegebenen Zusatzspannungen aus Verkehrslasten, Setzungen usw. auch hier ein vollständig anderes Bild ergeben können.

Schrifttum

[1] ANSI/ASME B31 G-1991 „Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines"

[2] Chouchaoui, B. A.; Pick, R. J.: Behaviour of isolated pits within general corrosion. Pipes and Pipelines Internat, Jan./Feb. 1994, pp. 12 – 21

[3] Chouchaoui, B. A.; Pick, R. J.; Yost, D. B.: Burst pressure prediction of line pipe containing single corrosion pits using the finite element method. ASME OMAE, Vol. V-A, 1992, pp. 203 – 210

[4] Bubenik, T. A.; Olsen,R. J.; Stephens, D. R.; Francini, R. B.: Analyzing the pressure strength of corroded line pipe. ASME OMAE, Vol. V-A 1992, pp. 225 – 231

[5] Vieth, P. H.; Kiefner, J. F.: The remaining strength of corroded pipe. CANMET International Conference on Pipeline Reliability, Calgary, June 2 to 5, 1992, pp. II 7.1 – 14

[6] Kiefner, J. F.; Vieth, P. H: New method corrects criterion for evaluating corroded pipe. Oil & Gas J. 1990, Aug. 6, pp. 56 – 59; 1990, Aug. 20, pp. 56 – 59

[7] Kiefner, J. F.; Vieth, P. H.: A Modified criterion for evaluating the remaining strength of corroded pipe. Project PR 3-805, Pipeline Search Committee, American Gas Association, December 22, 1989

[8] Kiefner, Z.F.: Corroded pipe – Strength and repair methods. 5th Symposium on Line Pipe Research, Houston, Texas, 1974, pp. L1 – L23

[9] Marvin, C.W.: Strength of corroded pipe. Corrosion 72, paper No. 39, March 21, 1972

[10] Barkow, A. G.: Don't bet on a pit. Materials Performance, Vol. 11 (1972) No. 11, pp. 11 – 17