

Druckprüfung von Paßstücken

Pressure testing of filler elements

Aus dem deutschen Normenwerk läßt sich keine zwingende Notwendigkeit für eine Druckprüfung von Paßstücken ableiten, die bei Reparaturen eingebaut werden müssen. Es liegt nahe, für diese klassische Druckprüfung eine gleichwertige Alternative zu suchen, um dem Bedürfnis eines maximalen Sicherheitsniveaus Rechnung zu tragen. Durch theoretische und praktische Untersuchungen wird nachgewiesen, daß an Einzelrohren im Herstellerwerk eine gleichwertige Druckprüfung wie an einem eingebetteten Rohrstrang durchgeführt werden kann. Auf die theoretischen Untersuchungen und auf die praktischen Versuche an Flachkörpern und Einzelrohren wird ausführlich eingegangen. Die Arbeiten führen zu dem Ergebnis, daß bei einem Prüfdruck der 95 % Mindeststreckgrenze des Werkstoffes entspricht, und bei einer Prüfdauer von 8 min im Herstellerwerk das gleiche Sicherheitsniveau erreicht wird, wie bei einem klassisch geprüften Rohrstrang.

It is not possible to derive from the relevant German standards an absolute necessity for pressure testing of filler elements which have to be installed in the context of repair work. An obvious step is to seek for this classical pressure test an equivalent alternative in order to take account of the need for maximum safety. Theoretical and practical examinations are used to demonstrate that it is possible to perform on individual pipes at the manufacturer's works a pressure test equivalent to that on an in-situ pipe element. The theoretical investigations and the practical tests performed on flat bodies and individual pipes are examined in detail. The work led to the result that the same safety level as in a train of pipe tested in the classical manner is achieved in the manufacturer's works at a test pressure of 95 % of the minimum yield point of the material and with a test period of 8 min.

Die Forderung, daß sicherheitsrelevante Bauwerke in allen Bereich so auszulegen sind, daß – der Belastung und Gefährdung angepaßt – überall ein ähnliches Sicherheitsniveau herrscht, ist unmittelbar einsichtig. Für Gashochdruckleitungen, die über ihre Länge einer konstanten Belastung, nämlich dem Innendruck, ausgesetzt sind, scheint diese Forderung einfach erfüllbar, indem man die Wanddicke an allen Stellen nach den gleichen Sicherheitskriterien auslegt. Es bleiben dann nur noch höher belastete Sonderbereiche (Überschüttungen usw.), die einer gesonderten Betrachtung bedürfen.

Der Nachweis, daß diese Forderung bei der Erstellung einer Gashochdruckleitung Rechenschaft getragen wird, ist unter anderem durch die Druckprüfung erbracht. Beim Neubau von Transportleitungen ist angebracht – und wird von den meisten Betreibern auch so gehandhabt – zusätzliche Rohrstücke in die Druckprüfung mit einzubinden, um für spätere Reparaturen und Auswechslungen Rohrmaterial vorrätig zu haben, das der gleichen Prüfung unterzogen wurde und somit der Forderung nach einem einheitlichen Sicherheitsniveau gerecht wird. Ausgenommen von dieser Forderung sind dann nur noch die „Garantienächte“, die aber

anderen zusätzlichen Prüfungen unterworfen werden.

Sobald man dieses Thema ausweitet auf Reparaturmaterial für alte Leitungen mit nicht gängigen Druckstufen, Werkstoffen, Durchmessern oder Wanddicken, wird die vergleichsweise einfache Forderung nach dem Einhalten eines gleichen Sicherheitsniveaus eine kosten-trächtige Forderung, da dann bei vorhersehbaren Reparaturmaßnahmen in jedem Einzelfall und ebenso für die vielfältigen Rohre eines Notlagers jeweils die aufwendige und kostspielige Druckprüfung einzeln durchgeführt werden muß. Es liegt nahe, für diese klassische Druckprüfung an Einzelrohren eine gleichwertige Alternative zu suchen.

Die im folgenden beschriebenen Ergebnisse basieren auf zweijährige Untersuchungen, die vom Ingenieurbüro Dr. Veenker im Auftrag von Verbundnetz Gas AG, BEB Erdgas und Erdöl und Erdgasverkaufsgesellschaft Münster durchgeführt wurden.

Rechtliche Aspekte zur Druckprüfung von Paßstücken

In Auswertung der internationalen Vorschriften kann die Empfehlung einer vorlaufenden Druckprüfung nur für große

Dr.-Ing. habil. Wolfgang Siegert



Hauptreferent bei Verbundnetz Gas AG, Leipzig, Tel.: (0341) 443-2490. Aufgabenbereich: Gastransport und Erdgaseinsatz in Kraftfahrzeugen.

Dipl.-Ing. Alexander Junge



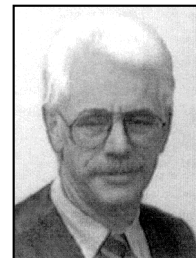
Projektleiter im Büro Beratende Ingenieure Dr. Veenker, Hannover; Tel. (0511) 284990. Aufgabenbereich: Statische und dynamische Berechnungen, Sicherheitsanalysen, Erstellen von Gutachten.

Dr.-Ing. Manfred Veenker



Leiter des Büros Beratende Ingenieure Dr. Veenker, Hannover; Tel. (0511) 284990. Aufgabenbereich: Statische und dynamische Berechnungen, Sicherheitsanalysen, Erstellen von Gutachten.

Dipl.-Ing. (FH) Bernd Schreiner



Hauptreferent bei Verbundnetz Gas AG, Leipzig, Tel.: (0341) 4 43-28 35. DVGW-Sachverständiger.

Durchmesser (DN > 600) und für hochfeste Stahlsorten (StE 470.7 und hochfester) abgeleitet werden.

Die anzuwendende deutsche Vorschrift ist die Verordnung über Gashochdruckleitungen (Gas HL-VO) [1]. In dieser Verord-

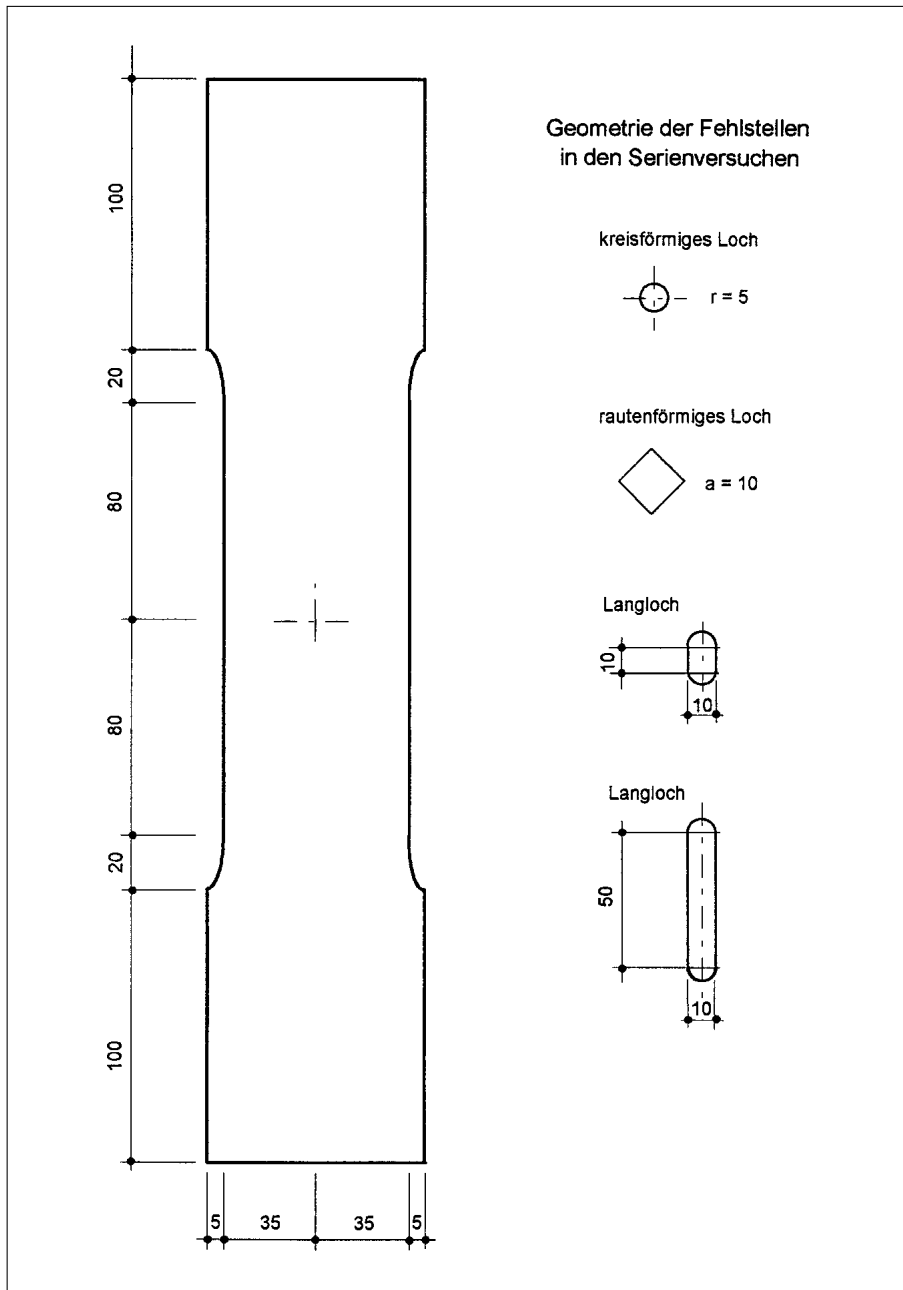


Bild 1: Geometrie der Flachproben und der Fehlstellen

Fig. 1: Geometry of flat specimens and defects

nung wird zunächst auf die Notwendigkeit von Sicherheitsanforderungen hingewiesen, wie sie in den DVGW-Arbeitsblättern G 463 [2], G 466/I [3] geregelt sind. Der Gas HL-VO ist zu entnehmen, daß eine Auswechslung von Teilen einer Gashochdruckleitung nicht als eine wesentliche Änderung angesehen werden muß, wenn die neuen Teile die Sicherheitsanforderungen in mindestens gleichwertiger Weise erfüllen. Für nicht wesentliche Änderungen wird lediglich die Anhörung eines Sachverständigen gefordert. Paßstücke für Auswechslungen werden ausdrücklich erwähnt und als nicht wesentlich bewertet, wenn „die neuen Teile die Sicherheitsanforderungen im Verhältnis zu den vor-

herigen in mindestens gleichwertiger Weise erfüllen“. Zu Paßstücken für Auswechslungen werden in der Anlage A 18 unter I. 1a) und 1b) des Kommentars zur Gas HL-VO [4] Einzelheiten bezüglich der Anhörung und der Arbeiten eines Sachverständigen aufgeführt. Aus dem Wortlaut dieser Textpassagen ist zu entnehmen, daß bei Auswechslungen eine Druckprüfung erst dann erforderlich ist, wenn deren Länge die Länge eines einzelnen Rohrschusses überschreitet.

Da einerseits keine zwingende Notwendigkeit zur Durchführung vorlaufender Druckprüfungen für Paßstücke vorliegt, andererseits jedoch das Bedürfnis nach einem hohen Sicherheitsniveau besteht,

werden in der Praxis der Gasversorgungsunternehmen Deutschlands zwei völlig unterschiedliche Verfahrensweisen beim Einbau von Paßstücken für Reparaturzwecke angewendet:

- es werden Paßstücke, geordnet nach Nennweite und Druckstufe, in einem Notlager vorgehalten. Diese Einbauteile sind vorher einer Druckprüfung (Wasserdruckprüfung A 1 oder A 2 bzw. sogar Streßdruckprüfung) unterzogen worden;
- es werden überhaupt keine vorlaufenden Druckprüfungen durchgeführt, das heißt das Paßstück wird ungeprüft in den zu reparierenden Rohrstrang eingebaut.

Den weiteren Untersuchungen lag der Gedanke nahe, eine Druckprüfung von Paßstücken im Rohrherstellerwerk durchzuführen, da dort ohnehin eine Dichtheitsprüfung vorgenommen wird. Dafür war jedoch eine Reihe von theoretischen und praktischen Untersuchungen erforderlich, auf die im folgenden eingegangen werden soll [5], [6].

Statisches System

Neben einer Aussage über die Dichtheit des hergestellten Rohrstranges soll eine Druckprüfung im wesentlichen eine Aussage darüber machen, ob dieser Rohrstrang geeignet ist, die später vorgesehene bestimmungsgemäße Belastung aufzunehmen. Dieser Nachweis wird dann schlüssig erbracht, wenn der Prüfdruck gleich dem späteren Betriebsdruck multipliziert mit Sicherheitsfaktor ist. Der so aufgebaute Prüfdruck erzeugt in der Rohrleitung Spannungen, die in der Nähe der Fließspannung liegen. Die hauptsächlich angewandten Prüfverfahren [7], bei denen 95 % der Mindeststreckgrenze des Werkstoffes erreicht werden, erfüllen diese Forderung. Dort, wo das Material zu dieser äußeren Belastung kein inneres Gleichgewicht aufbauen kann, kommt es entweder zu Lastumlagerungen infolge Fließens oder zu einem Bruch der Leitung.

Es ist unmittelbar einsichtig, daß die Fließprozesse nur dann auftreten und komplett abklingen können, wenn der Prüfdruck eine bestimmte Zeit gehalten wird. Die Vorschriften erlauben zwar dem Sachverständigen, hier im Einzelfall die Zeiten vorzugeben, die Grundvorgabe geht aber bei den Druckprüfungen von mehreren Stunden aus. Diese Vorgaben auf die Prüfung von einzelnen Rohren unverändert zu übertragen, würden den unterschiedlichen statischen Systemen nicht gerecht. Der wesentliche Unterschied zwischen einem montierten und – zumindest teilweise – eingedeckten Rohrstrang sowie einem Einzelrohr besteht in den Lagerungsbedingungen des jeweiligen statischen Systems.

Der fertiggestellte Rohrstrang ist elastisch gebettet, und bei Vornahme der Druckprüfung bewirken die Dehnung in Umfangsrichtung, die Dehnungen in Längsrichtung und die Biegeverformungen an den Etagen, Dükern und Horizontalbögen eine Interaktion zwischen dem Rohrstrang und dem Boden. Die dabei mobilisierten Reibungskräfte zwischen dem Rohrmaterial und dem Boden, der ständige Wechsel zwischen Haft- und Gleitreibung und die damit verbundene Umlagerung der Bodenteilchen bewirken, daß sich der endgültige Spannungszustand im geprüften Rohrstrang erst nach einer bestimmten Abklingzeit, die mehrere Stunden dauern kann, einstellt. Damit ist es notwendig, die Druckprüfung über mehrere Stunden aufrecht zu halten und auch sinnvoll, die Druckhöhe mehrfach zu verändern. Der hier beschriebene Zusammenhang kann leicht nachvollzogen werden, wenn bei Druckprüfungen die auftretenden Verformungen und Spannungen über die Zeit aufgetragen werden und wenn bedacht wird, daß unter Umständen das Versagen ganzer Rohrteile erst nach mehreren Stunden auftritt.

Ganz anders liegen die Verhältnisse bei einem Einzelrohr. Im allgemeinen ist es „statisch bestimmt“ (auf zwei Lagern) abgesetzt. Die elastische Einspannung, die dadurch entsteht, daß die Dichtung an den Rohrenden über angepreßte Gummischeiben erreicht wird, kann in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden. Auch hier bedürfen die Fließ- und Umformprozesse einer gewissen Zeit, aber da die Interaktion Rohr/Boden vollkommen entfällt, sind diese Prozesse dann abgeschlossen, wenn der örtliche Fließprozeß beendet ist. In diesen zeitlichen Ablauf gehen nur das Werkstoffverhalten und die Art der Druckprüfung (das jeweilige Aufbringen und Konstanthalten des Innendrucks) ein.

Aus diesem Zusammenhang ergibt sich ein deutlicher Hinweis darauf, daß bei einem Einzelrohr, das nach dem Fertigungsprozeß eine relativ kurze Zeit dem Prüfdruck ausgesetzt wird, das gleiche Sicherheitsniveau zu erreichen ist, wie bei einem Rohrstrang, der mehrere Stunden einer Druckprüfung unterzogen wird.

Versuche zur Ermittlung einer erforderlichen Prüfdauer

Mittels einer Druckprüfung wird der Nachweis erbracht, daß das Rohr die spezifizierte Festigkeit und die erforderliche Dichtheit aufweist. Während der Druckprüfung werden Fehlstellen oder sonstige Spannungsspitzen (zum Beispiel Eigenspannungen infolge Herstellung) derart beansprucht, daß es entweder zum Bruch oder zur Leckage kommt

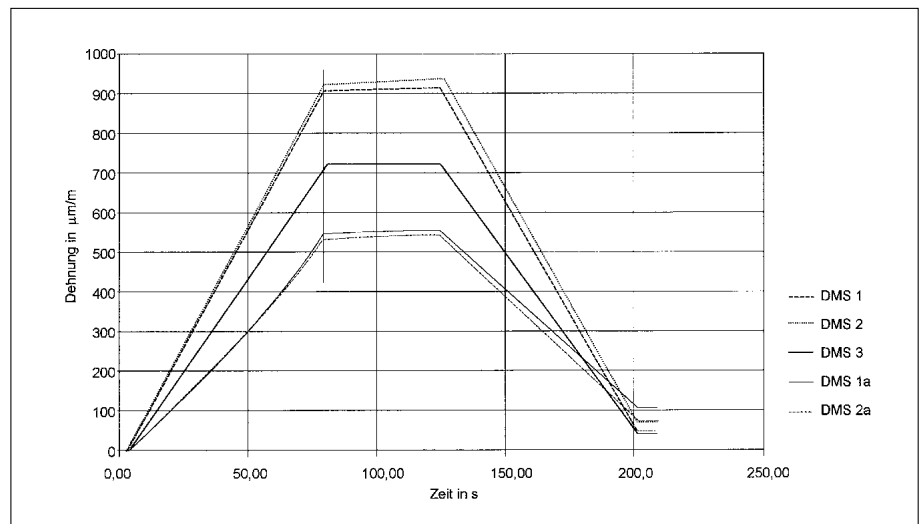


Bild 2: Dehnungsverhalten für Lauf 1

Fig. 2: Strain pattern for Train 1

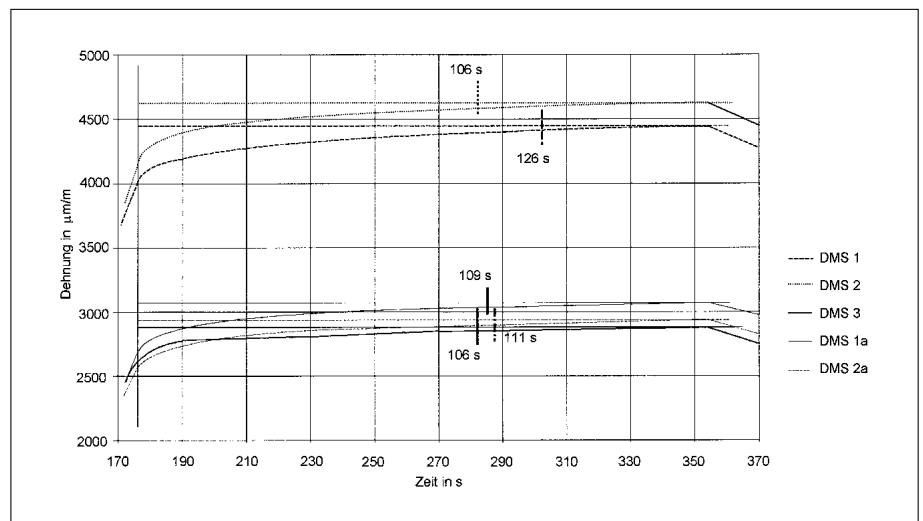


Bild 3: Dehnungsverhalten für Lauf 2

Fig. 3: Strain pattern for Train 2

oder daß es infolge örtlicher Plastifizierung zu einem günstigeren Spannungszustand kommt. Hierbei ist das viskoelastische bzw. viskoplastische Verhalten des Werkstoffs Stahl zu beachten. Es ist davon auszugehen, daß nach Erreichen des Prüfdrucks weitere plastische Vorgänge stattfinden. Es gilt, eine Zeit zu ermitteln, innerhalb der die wesentlichen plastischen Verformungen garantiert abgeklungen sind.

Aus grundsätzlichen Überlegungen und Versuchen ist bekannt, daß die Fließdauer von den folgenden Parametern beeinflusst wird:

- Höhe der Beanspruchung (Dehnung, Spannung). Hierzu zählen sowohl die Beanspruchung während der Druckprüfung als auch die Eigenspannungszustände infolge Herstellung,

- Geometrie einer Fehlstelle bzw. der Eigenspannungsverteilung,
- plastisches Arbeitsvermögen des Materials.

Zur Ermittlung einer erforderlichen Fließdauer in aus Ingenieursicht wichtigen Fällen wurde ein Versuchsprogramm aufgelegt. Das Versuchsprogramm sah vor, das (plastische) Dehnungsverhalten an Versuchskörpern mittels Dehnungsmeßstreifen (DMS) aufzunehmen. Die Dehnungsmeßstreifen befanden sich im Bereich von Fehlstellen, deren Geometrie anhand der oben aufgeführten grundsätzlichen Überlegungen und Erfahrungen festgelegt wurde. Die Versuche fanden zunächst an Flachproben und in einem weiteren Schritt an Rohren (Full-size-Versuche) statt. Alle Versuche wurden kraftgesteuert gefahren. Das ent-

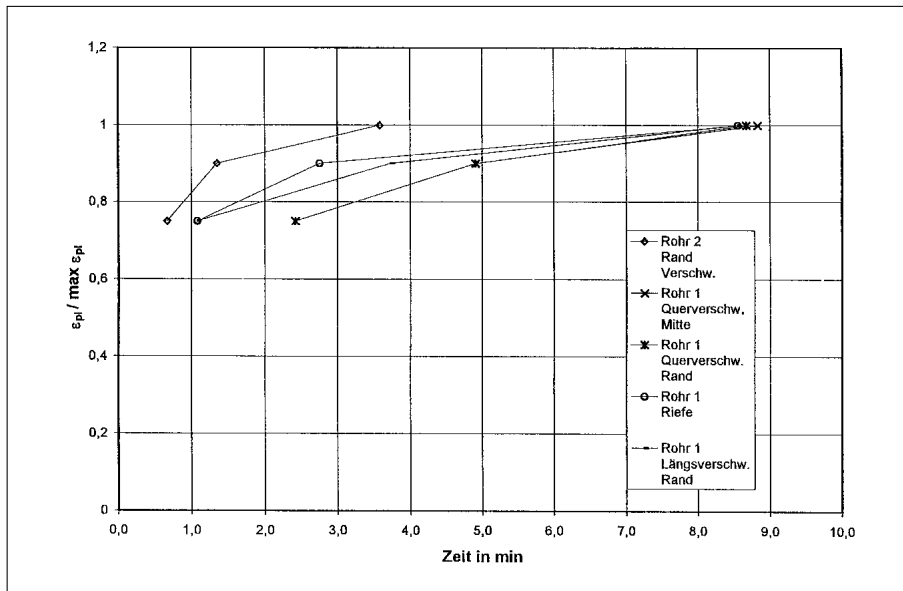


Bild 4: Dehnungsverhalten für Rohrkörper

Fig. 4: Strain pattern for pipes

spricht den Bedingungen einer Druckprüfung im Herstellerwerk, bei der der Druck (und nicht das Volumen) konstant gehalten wird.

Die Prüfkörper waren in allen Fällen mit typischen, künstlich eingearbeiteten Verschwächungen versehen. Bei den Flachproben wurde je eine Fehlstelle eingearbeitet, während bei den Full-size-Versuchen mehrere Fehlstellen (Verschwächung in Längs- als auch in Querrichtung, Längsriefe) aufgebracht wurden.

Bei den Flachproben handelt es sich um Prüfkörper des einheitlichen Werkstoffes StE 290.7 mit vier unterschiedlichen Lochgeometrien bei einer einheitlichen Blechdicke von 8 mm (Bild 1). Die Proben wurden einem Zugversuch unterworfen. Hierbei erfolgte die Laststeigerung in einem ersten Lauf soweit, bis Fließen an der meistbeanspruchten Stelle beobachtet wurde. Danach wurde die Last nochmals gesteigert und dann so lange kraftgesteuert konstant gehalten, bis alle Nachplastifizierungen abgeklungen waren. Danach wurden die Proben entlastet. Für diese Versuche ergibt sich eine Fließdauer in der Größenordnung von 1 min (Bild 2). Im zweiten Lauf wurde die Last so weit gesteigert, bis der Restbereich im Störungsquerschnitt nahezu voll plastifiziert ist. Die dazugehörige Kraft wurde aus der nominalen Fließdehnung ermittelt. Auch hier wurde die Kraft so lange gehalten, bis alle wesentlichen Nachplastifizierungen abgeklungen waren. Die Auswertung der Versuche im Lauf 2 liefert

eine Fließdauer in der Größenordnung von 2 min (Bild 3).

Bei den Full-size-Versuchen wurden Rohre mit Nennweiten von 400, 700 und 800 mm mit Werkstoffgüten von StE 290.7, StE 445,7 und StE 480,7 verwendet. An den bereits erwähnten Fehlstellen und im Bereich der Schweißnähte wurden Dehnungsmeßstreifen angebracht. In zwei Fällen waren die Fehlstellen bewußt so gewählt worden, daß ein Bersten des Rohres herbeigeführt werden konnte. In Bild 4 ist der zeitliche Verlauf der plastischen Dehnung dargestellt. Der plastische Grenzwert bei einer definierten Laststufe beträgt 90 % der plastischen Gesamtdehnung. Wie aus Bild 4 ersichtlich, wird dieser Wert spätestens nach fast 5 min erreicht. In derartigen Fällen wird unter Zugrundelegung der Statistik eine 95%-Fraktile angewendet, so daß sich letztlich eine Fließzeit von 5,5 min ergibt.

Schlußfolgerungen und Ausblick

Die Zusammenfassung der Ergebnisse aus theoretischen Untersuchungen, Vorversuchen und Full-size-Versuchen ergibt damit, daß ein werkseitig geprüftes Einzelrohr das gleiche Sicherheitsniveau wie ein klassisch geprüfter Rohrstrang aufweist, wenn es wenige Minuten der Druckspitze ausgesetzt ist.

Die 95%-Fraktile von 5,5 min ist Ausgangsbasis für die Festlegung einer erforderlichen Prüfzeit für die Druckprüfung im Herstellerwerk. Es ist üblich, eine der-

artige Zeitangabe mit einer Sicherheit zu belegen. Im vorliegenden Fall ist es angebracht, einen Sicherheitsfaktor von 1,3 zu wählen. Aufgerundet ergibt sich damit eine erforderliche Prüfzeit von 8 min.

Es wurde vielfach bezweifelt, daß eine solche Prüfung im Rohrwerk überhaupt durchführbar ist. Den Autoren liegen heute von zwei renommierten Rohrherstellern die schriftliche Bescheinigung vor, daß sie solche Prüfungen auf Anforderung durchführen und mit einem Abnahmezeugnis 3.1 C bestätigen werden.

Die Merkmale der Werksdruckprüfung seien hier stichwortartig nochmal zusammengestellt:

- Wasserdruckprüfung am Einzelrohr,
- Prüfdruck nach DIN EN 10208; die Umfangsspannung soll 95 % der nominalen Fließspannung erreichen,
- Begehung des Rohres zwecks Sichtprüfung des gesamten Rohrumfanges (alternativ gleichwertige Prüfung),
- Halten des Prüfdrucks bis zur Beendigung der Sichtprüfung, jedoch mindestens über eine Dauer von 8 min,
- Erstellen einer Bescheinigung (DIN EN 10204 - 3.1 C).

Die BEB Erdgas und Erdöl GmbH und die Verbundnetz Gas AG werden jeweils für ihre Unternehmen Werksnormen ausarbeiten, in denen die Durchführung von Druckprüfungen von Paßstücken nach den vorstehenden Ausführungen geregelt wird. Parallel dazu hat die BEB einen Antrag auf Förderung an den DVGW gestellt, um weitere Untersuchungen für andere Werkstoffe durchzuführen, die eines Tages zur Aufnahme in das DVGW-Regelwerk führen könnten.

Literatur

- [1] Verordnung über Gashochdruckleitungen. Ausgabe Januar 1993, Carl Heymanns Verlag KG, Berlin
- [2] DVGW-Arbeitsblatt G 463 „Gasleitungen aus Stahlrohren von mehr als 16 bar Betriebsdruck – Errichtung“
- [3] DVGW-Arbeitsblatt G 466/I „Gasrohrnetze aus Stahlrohren mit einem Betriebsdruck von mehr als 4 bar – Instandhaltung“ (1989-07)
- [4] Rothardt, H.; Rothardt, M.; Schott, J.; Volk, A.: Verordnung über Gashochdruckleitungen – Kommentar. Erich-Schmidt-Verlag, Berlin, 1984
- [5] Veenker, M.: Druckprüfung von Auswechslungen/Aktueller Kenntnisstand Gutachten Nr. 46095 vom 18. März 1996
- [6] Veenker, M.: Druckprüfung von Auswechslungen/Versuche zur Ermittlung der erforderlichen Prüfdauer. Gutachten Nr. 66096 vom 22. Mai 1997 und Nachtrag vom 18. Juli 1997
- [7] DVGW-Arbeitsblatt G 469 „Druckprüfverfahren für Leitungen und Anlagen der Gasversorgung“ (1987-07)