

Elasto-plastisches Tragverhalten von Stahlrohren unter Innendruck und Biegung

Elasto-plastic bearing behaviour of steel pipes subjected to internal pressure and bending

Weltweite Standards erlauben die Ausnutzung plastischer Tragreserven beim Nachweis der Grenztragfähigkeit (ULS) von Stahlrohren, um eine wirtschaftlichere Auslastung zu erreichen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, welche maximalen Dehnungen für ein Stahlrohr unter Innendruck und Zusatzbeanspruchungen zulässig sind. Die vorliegende Arbeit beschreibt die Ergebnisse einer Versuchsreihe an acht Probekörpern, bei denen das Tragverhalten unter Innendruck und Zwangsverformung getestet sowie unter Verwendung der Methode der Finiten Elemente numerisch simuliert wurde. Basierend auf den so gewonnenen Ergebnissen wird ein Berechnungsansatz vorgeschlagen, nach dem geometrie- und innendruckabhängige zulässige maximale Dehnungen ermittelt werden können.

Die Versuchsergebnisse zeigten weiterhin den Einfluss der Belastungsgeschichte auf zulässige Beanspruchungszustände. So konnte nachgewiesen werden, dass Biegezwangsverformungen, die im drucklosen Zustand bereits zum Beulversagen des Rohres führten, im druckbeaufschlagten Zustand ohne Stabilitätsverlust aufgebracht werden konnten. Für das gleiche Maß der Biegezwangsverformung blieb die Stabilität des Rohres auch erhalten, wenn bei konstant gehaltener Verformung der Innendruck reduziert oder sogar auf Null abgesenkt wurde.

Der hier vorgeschlagene Bemessungsansatz schafft Reserven für die Beurteilung von Beanspruchungszuständen, die sich nach der Projektierung und dem Bau einer Pipeline, beispielsweise durch Umnutzungen der Geländeoberfläche, ergeben. Er ermöglicht den Nachweis des zulässigen und sicheren Weiterbetriebs einer überbauten Pipeline, ohne dass an ihr bauliche Sicherungsmaßnahmen vorzunehmen sind.

Worldwide, actual design standards allow the consideration of plastic deformations for the ultimate limit state (ULS) in order to achieve a higher degree of utilisation. In this context maximum plastic strains, which can be allowed for tubular steel pipes exposed to internal pressure and additional loads, are of special interest. This paper describes the results of tests on eight specimens in which the behaviour of steel pipelines subjected to internal pressure and bending were tested and numerically simulated by the Finite Element Method. On the basis of those results, a mathematical approach is proposed according to which allowed maximum strains dependent on geometry and internal pressure can be determined.

Furthermore, the test results showed the influence of load history on permitted load conditions. It could be proved that bending deformations which already led to buckling of the pipe in unpressurised condition could be applied without stability loss in pressurised condition. For the same level of bending deformation, the stability of pipes also maintained when the internal pressure was reduced or actually decreased to zero while the deformation was kept constant.

The proposed design criterion gives reserves for the evaluation of load bearing capacity arising after design and construction of pipelines, e.g. by changed utilization on the ground surface level. It makes possible the verification of permitted and safe on-going operation of an erected pipeline without additional structural safeguarding measures.

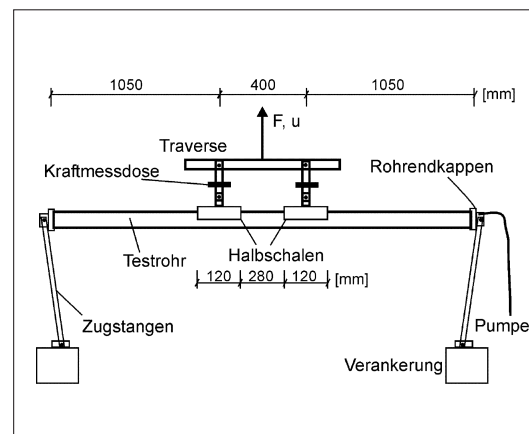


Bild 1: Versuchsaufbau

Fig. 1: Test setup

Versuchsprogramm

Zur Untersuchung des elasto-plastischen Tragverhaltens wurde eine Versuchsreihe durchgeführt. Hierbei kam ein Versuchsaufbau wie in **Bild 1** dargestellt zum Einsatz.

Grundsätzlich handelt es sich um einen klassischen Vierpunkt-Biegeversuch im Modellmaßstab von 1:5 bis 1:15 bezüglich der üblichen Durchmesser für Hochdruckleitungen. Um lokales Versagen im Bereich der Kräfteinleitungspunkte zu verhindern, wurden auf der Zugseite in Versuchskörpermitte Stahlhalbschalen für die Lastenleitung aufgeklebt. An diesen wird der Versuchskörper nach oben verformt. Die Anschlagpunkte an den Rohrenden sind drehbar gelagert. Die maximale Beanspruchung liegt in Rohrmitte. Hiervon haben die Kräfteinleitungspunkte einen Abstand $> 4D$, so dass Störungen als abgeklungen gelten können. Variiert wurden die Höhe des Innendrucks P und das Maß der Verschiebung u . Das Versuchsprogramm ist in **Tabelle 1** zusammengestellt.

Es kamen Testrohre mit einem Außendurchmesser von $D = 66,1$ mm und einer Wanddicke von $t = 0,5$ mm (Schlankheit $D/t = 132$) zum Einsatz. Die Rohre bestehen aus längsnahtverschweißtem Stahl (Kaltband St4) mit einer Streckgrenze von $f_{y,k} = 220$ N/mm² und einer Zugfestigkeit von $f_{u,k} = 300$ N/mm². Die realen Spannungsdehnungslinien sind im Vorfeld durch Zugversuche ermittelt worden.



Dipl.-Ing. Henning Brüggemann

Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH, Hannover
Tel. +49(0)511/284-9912
E-Mail: henning.brueggemann@veenkermbh.de



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann

Institut für Stahlbau, Universität Hannover
Tel. +49(0)511/762-3781
E-Mail: schaumann@stahl.uni-hannover.de



Dipl.-Ing. Christian Keindorf

Institut für Stahlbau, Universität Hannover
Tel +49(0)511/762-3713
E-Mail: keindorf@stahl.uni-hannover.de

Versuchsergebnisse und Vergleich mit numerischen Simulationen

Vor Versuchsbeginn sind die Prüfkörper vermessen worden, da insbesondere die Ovalisierung einen großen Einfluss auf das Tragverhalten hat. Ein Maß für die Ovalisierung ist die Unrundheit, die sich zu

$$f_0 = (D_{\max} - D_{\min}) / D$$

ergibt und im Durchschnitt $f_0 = 2,0\%$ betrug.

Die Versuche wurden weggesteuert durchgeführt, wobei der Versuch 1 nur auf Biegung und die Versuche 2 bis 8 auf Biegung und Innendruck beansprucht wurden. Der Innendruck wurde über eine Wasserfüllung mittels einer Handpumpe aufgebracht. Die horizontalen und vertikalen Verschiebungen wurden mit Hilfe von Wegaufnehmern und Potenziometern gemessen. An den beiden Kräfteinleitungsstellen befanden sich Kraftmessdosen zur Messung der Reaktionskräfte infolge der aufgetragenen Verschiebung (vgl. Bild 1). Zusätzlich wurden Dehnungsmessstreifen in Längs- und Querrichtung des Rohres sowie ein Druckmessgeber an einer Rohrendkappe installiert.

Für den Versuch 1 ($P = 0$ bar) ist in **Bild 2** der Verlauf der gemittelten Reaktionskraft in Abhängigkeit von der vertikalen Verschiebung dargestellt. Die Reaktionskraft stieg zu Beginn des Versuches linear an bis zum Erreichen der Streckgrenze. Der Übergang zum elasto-plastischen Bereich ist anhand des nichtlinearen Kurvenverlaufs zu erkennen. Bei weiterer Steigerung des Verschiebungsweges wurde durch die vorhandenen geometrischen und materiellen Imperfektionen das Schalenbeulen initiiert. Kurz nach Erreichen der maximalen Tragfähigkeit traten große plastische Verformungen im lokalen Beulbereich auf, wobei die Beule in der Nähe der Rohrmitte nach innen einsprang. Im Nachbeulbereich fiel die Kraft-Verschiebungskurve ab.

Zum Vergleich wurden numerische Simulationen mit dem FE-Programm ANSYS

Tab. 1: Versuchsprogramm

Table 1: Test program

Nr.	P [bar]	U_k [mm]	Bemerkung
1	0	35	
2	15	76	
3	15	67,5	Druckabsenkung auf $P = 0$ und -wiederaufbau auf $P = 15$ bar
4	25	11,0	
5	25	110,0	Druckabsenkung auf $P = 0$ und -wiederaufbau auf $P = 25$ bar
6	5	43,0	
7	30	130,0	
8	30	182,0	Druckabsenkung auf $P = 0$ und -wiederaufbau auf $P = 30$ bar

durchgeführt (siehe Bild 2). Als Werkstoffgesetz wurde die wahre Spannungs-Dehnungsline aus den Zugversuchen berücksichtigt.

Die FE-Berechnungen zeigen eine gute Übereinstimmung hinsichtlich des Kraftanstiegs im elastischen Bereich. Die Berech-

nung ohne Imperfektionen erreicht eine maximale Kraft von $F = 440$ N und bricht bei einer Verschiebung von $u = 37$ mm ab. Der geeignete Ansatz der Imperfektionen erfolgt auf Basis einer Eigenwertanalyse für Beulformen. Das Stichmaß ist entsprechend der ge-

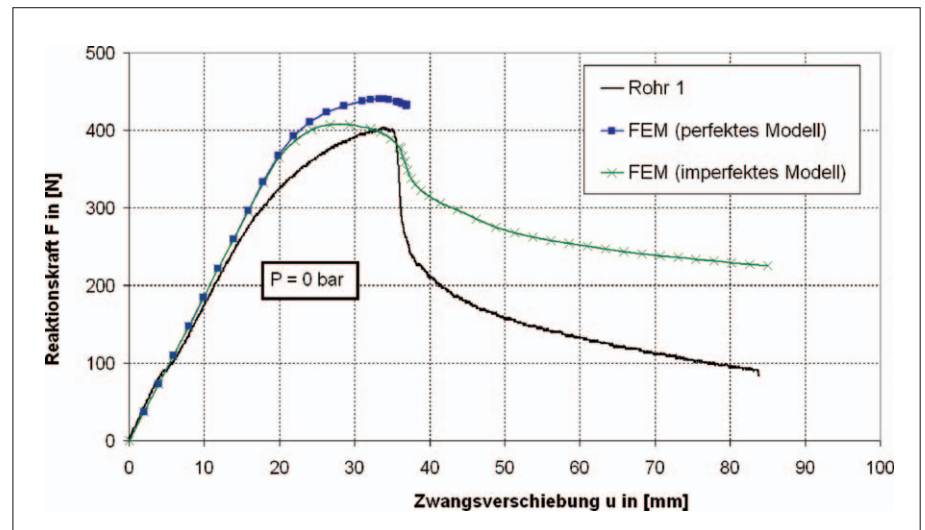
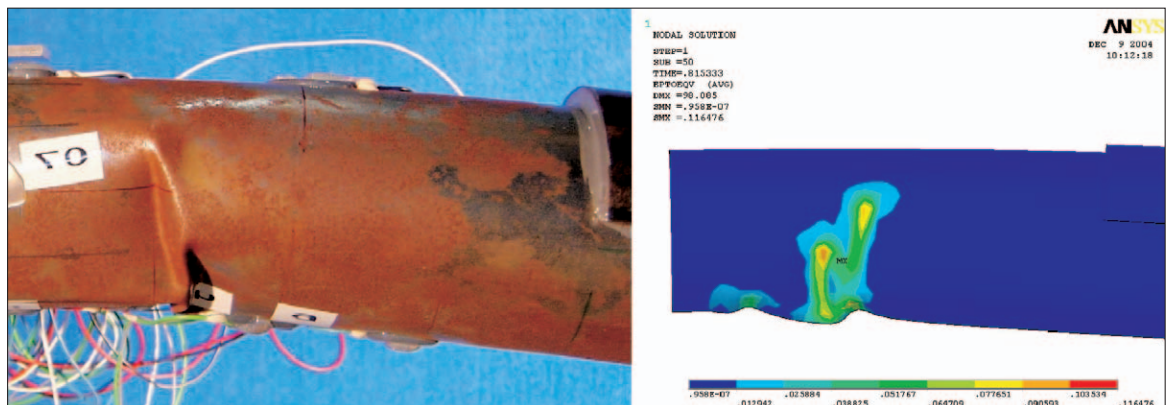


Bild 2: Kraft-Verschiebungskurven für Rohr 1

Fig. 2: Force-deformation-plot specimen 1

Bild 3: Vergleich der Beulformen für Rohr 1

Fig. 3: Collapse-plots specimen 1



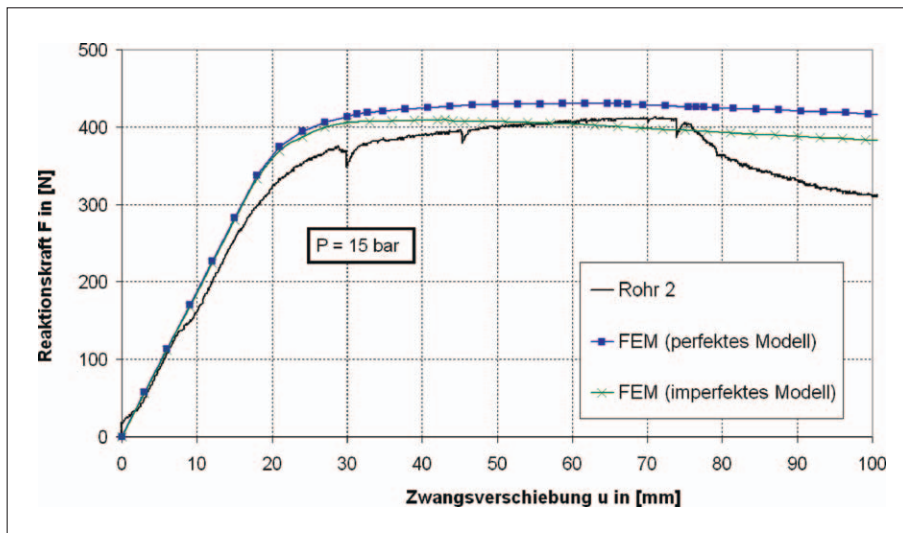


Bild 4: Kraft-Verschiebungskurven für Rohr 2

Fig. 4: Force-deformation plot specimen 2

messenen Unrundheit f_0 angesetzt worden. Im Gegensatz zum idealen Modell verläuft diese Kraftkurve bis in den abfallenden Bereich, jedoch ist der Kraftabfall im Vergleich zum Versuch 1 nicht so deutlich. In Bild 3 sind die Beulformen vom Versuch 1 und der FE-Berechnung mit Imperfektionen gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass Position und Verformungsstruktur der Beulen gut übereinstimmen.

Beim Versuch 2 wurde zu Beginn eine Innendruckauslastung in Umfangsrichtung von 45 % der Streckgrenze ($P = 15$ bar) erzeugt. Anschließend wurde bei konstantem Innendruck eine Verschiebung bis in den Bereich aufgebracht, in dem es beim Versuch 1 ($P = 0$ bar) bereits zum Stabilitätsversagen kam, ohne dass es zum Beulen kam. Erst bei deutlich größeren Verschiebungen, als sie bei Versuch 1 erreicht werden konnten, waren mehrere Wellen entlang der Rohrachse auf der Druckseite zu erkennen. Bei größeren Verschiebungen verstärkte sich die Ver-

formung einer einzelnen Welle und es prägte sich eine Falte aus, die sich durch die Stabilisierung des Innendrucks nach außen wölbte. Gleichzeitig konnte ein deutlicher Kraftabfall beobachtet werden.

Die numerische Simulation (Bild 4) liefert grundsätzlich gleiche Ergebnisse. Im Gegensatz zum Versuch zeigen die Kraft-Verschiebungskurven jedoch keinen signifikanten Kraftabfall im Nachbeulbereich. Im Vergleich zum Versuch 1 konnten durch die beullasterhöhende Wirkung des Innendrucks sowohl im Versuch als auch in der Simulation deutlich größere Verschiebungen ohne Stabilitätsversagen erzielt werden.

Ein Vergleich der Beulformen vom Versuch 2 und der FE-Berechnung ist in Bild 5 dargestellt. Im Vergleich zum Versuch ohne Innendruck ist das Beulverhalten bei den Versuchen mit Innendruck grundsätzlich anders, weil die Umfangsspannungen infolge des Innendrucks den Ovalisierungskräften infolge Biegung entgegenwirken und somit das Beu-

len erst bei größeren Zwangsverformungen beginnt. Die Beulfiguren unter Innendruck sind in der Regel durch die Ausprägung einer einzelnen Falte gekennzeichnet, die sich bezogen auf die Längsrichtung in einem schmalen Bereich nach außen wölbt. Zusätzlich führt die imperfektionsglättende Wirkung des Innendrucks zu einer weiteren Stabilisierung der Stahlrohre.

Elasto-plastisches Tragverhalten während eines Druckabfalls

Beim Versuch 3 wurde im elasto-plastischen Bereich das Szenario eines Druckabfalls untersucht (Bild 6). Dazu wurde das Rohr zunächst bei einer Innendruckauslastung von 45 % bis etwa drei Viertel der maximalen Verschiebung beim Versuch 2 verformt. Im Anschluss daran folgte eine Innendruckentlastung auf ca. $P = 0$ bar, während die eingeprägte Verformung konstant gehalten wurde. Dabei blieb der Rohrquerschnitt stabil und es trat kein lokales Beulen ein. Nach erneutem Druckaufbau auf 45 % Auslastung wurde die Verschiebung bis in die Größenordnung des Versagens von Versuch 2 gesteigert und der Innendruck erneut abgelassen, wobei das Rohr immer noch stabil blieb und keine Beule einsprang. Erst bei weiterer druckloser Steigerung der Verschiebung kam es sofort zum Beulversagen im Druckbereich. Die Form der Beule ähnelte der vom Versuch 1 ohne Innendruck.

Dieses Tragverhalten konnte mit FE-Berechnungen für die Versuche 3, 5 und 8 bestätigt werden und führt zu dem Schluss, dass in der Phase der Erzeugung von größeren Verformungen ein Innendruck vorhanden sein muss, der jedoch nicht erforderlich ist, wenn die Verformung konstant gehalten wird. Eine weitere Steigerung der Verformung darf nicht im drucklosen Zustand erfolgen, da die stützende Wirkung des Innendrucks bei der Erzeugung von weiteren plastischen Dehnungssinkrementen fehlt.

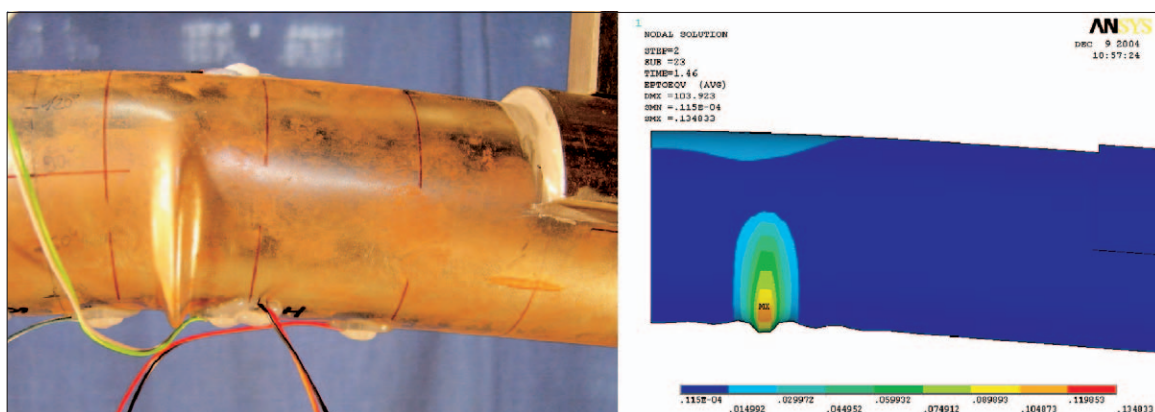


Bild 5: Vergleich der Beulformen für Rohr 2

Fig. 5: Collapse-plots specimen 2

Dehnungsbasiertes Grenzkriterium

Nach Auswertung der Versuchsergebnisse und Abgleich derselben mit einem auf der Differentialgleichung des Biegebalkens basierenden Ansatz wurde ein dehnungsbasiertes Grenzkriterium definiert. Dazu wurde die folgende Gleichung zur Berechnung der kritischen Dehnung im Druckbereich in Abhängigkeit von der Innendruckauslastung abgeleitet:

$$\epsilon_{cr,k} = 0,124 \frac{t}{r_m} + 0,016 \left(\frac{\sigma_\Theta}{\sigma_y} \right)^3 \quad (1)$$

mit ϵ_{cr} : Grenzdehnung; t : Wanddicke; r_m : Mittlerer Radius; σ_Θ : Umfangsspannung; σ_y : Beanspruchbarkeit in Umfangsrichtung.

Der erste Summand von Gleichung 1 gibt die Grenzdehnung für ein druckloses Rohr an. Der zweite Summand steht für den Dehnungsanteil, der bei einer bestimmten Innendruckauslastung zusätzlich erreicht wird. Die Gleichung 1 stellt in Abhängigkeit des Stichprobenumfangs der Versuchsreihe die untere Schranke des 95%-Konfidenzintervalls dar. Da die Stichprobe mit zunächst acht Versuchen sehr klein ist, hat Gleichung 1 eine große mögliche Abweichung. Bei Erweiterung des Stichprobenumfangs wird die untere Schranke dichter an der Regressionsgeraden liegen und so größere Grenzdehnungen zulassen. Weiterhin muss die Gültigkeit der Gleichung 1 für andere D/t-Verhältnisse überprüft werden.

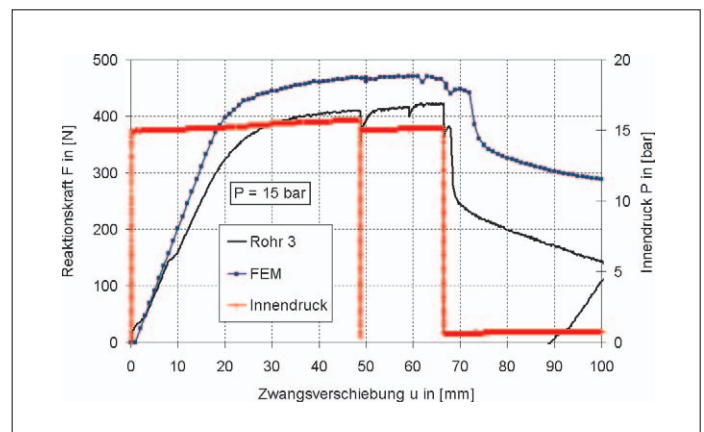
Der erste Term der Gleichung 1 gilt für den Fall reiner Biegung. Der zweite Term berücksichtigt die beullasterhöhende Wirkung des Innendrucks in Abhängigkeit vom Verhältnis der Umfangsspannung zur elastischen Streckgrenze. In der Literatur [1] und [2, 3] wird für das plastische Schalenbeulen bei reiner Biegung ein Bereich für die kritischen Beuldehnungen von

$$0,2 \cdot \frac{t}{r_m} < \epsilon_{cr} < 0,4 \cdot \frac{t}{r_m}$$

angegeben. Die beullasterhöhende Wirkung des Innendrucks wird nach einem Vorschlag von Gresnigt [4] in halbempirischen Gleichungen berücksichtigt. Auf Basis von Testergebnissen werden dort Werte für Beuldehnungen in Abhängigkeit von Rohrschlankheit, E-Modul und Innendruck angegeben. Ein Vergleich der Grenzdehnungslinien von Gresnigt und der von den Verfassern definierten Gleichung 1 ist in Bild 7 dargestellt.

Aufgrund anderer Randbedingungen sind die Tragreserven des realen Systems deutlich größer als diejenigen des im Versuch zugrunde liegenden statischen Systems. Aufgrund der Reibungskräfte zwischen Rohr und Boden und der im Prinzip „unendlichen“ Ausdehnung der Leitung im Boden wird die Horizontalverschiebung der Leitung behindert. Daraus folgt, dass die am Ver-

Bild 6: Kraft-Verschiebungskurven für Rohr 3
Fig. 6: Force-deformation plot specimen 3



sich gewonnenen kritischen Dehnungen in der Realität erst bei deutlich größeren Beanspruchungen erreicht werden. Die Übertragung der so gefundenen kritischen Dehnungen auf reale Fälle stellt einen auf der sicheren Seite liegenden Ansatz dar.

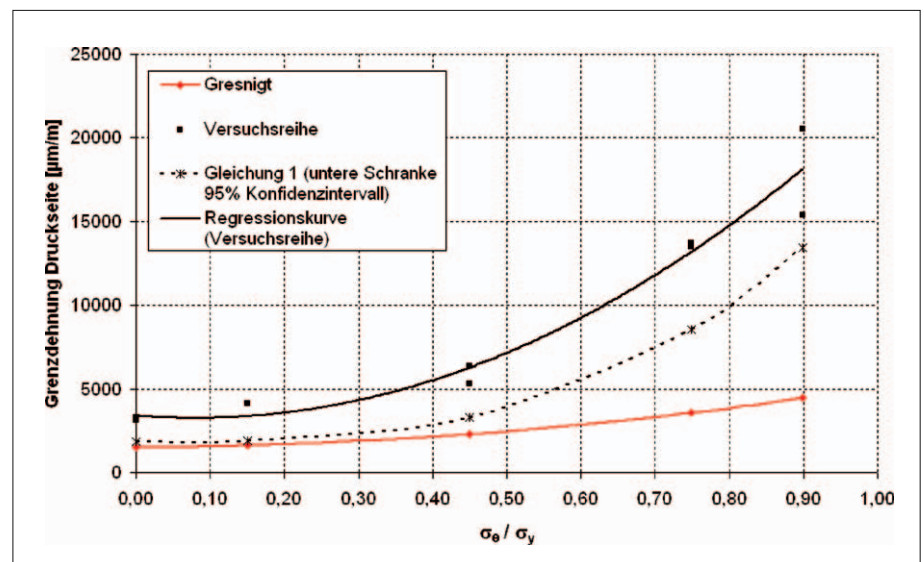
Entwicklung eines elasto-plastischen Bemessungskonzeptes

Es wurde ein elasto-plastisches Bemessungskonzept auf der Basis der Balken-Differentialgleichung entwickelt. Die analytische Methode setzt sich aus einer elastischen und elasto-plastischen Berechnung zusammen. Zur Ermittlung der Zustandsgrößen wird die elasto-plastische Berechnung weggesteuert und iterativ durchgeführt. Zur Erfassung der Plastizität wird die Fließhypothese nach v.

Mises und das Stoffgesetz nach Prandtl-Reuss gewählt. Die totale axiale Dehnung ist dann die Summe aus der elastischen Dehnung und den plastischen Dehnungsincrementen. In Bild 8 sind zum Vergleich die Ergebnisse der analytischen Methode und der Versuche mit $P = 0$ und 15 bar dargestellt. Bei den analytischen Berechnungen kommt das dehnungsbasierte Grenzkriterium nach Gleichung 1 zur Anwendung.

Sowohl die Versuche als auch die numerischen Simulationen haben ergeben, dass das Tragverhalten eines Rohres in Umfangsrichtung durch zwängungsbedingte Zusatzbeanspruchungen in Längsrichtung nicht wesentlich beeinflusst wird. Es kam selbst bei dem zu 90 % ausgelasteten Rohr nicht zu Undichtigkeiten, als dieses durch Beulen im plastischen Bereich in der Biegedruckzone stark verformt wurde. Grundsätzlich ist jedoch eine solch starke Verformung des Rohr-

Bild 7: Grenzdehnungslinien in Abhängigkeit von der Innendruckauslastung
Fig. 7: Limit strain curves against the internal pressure ratio



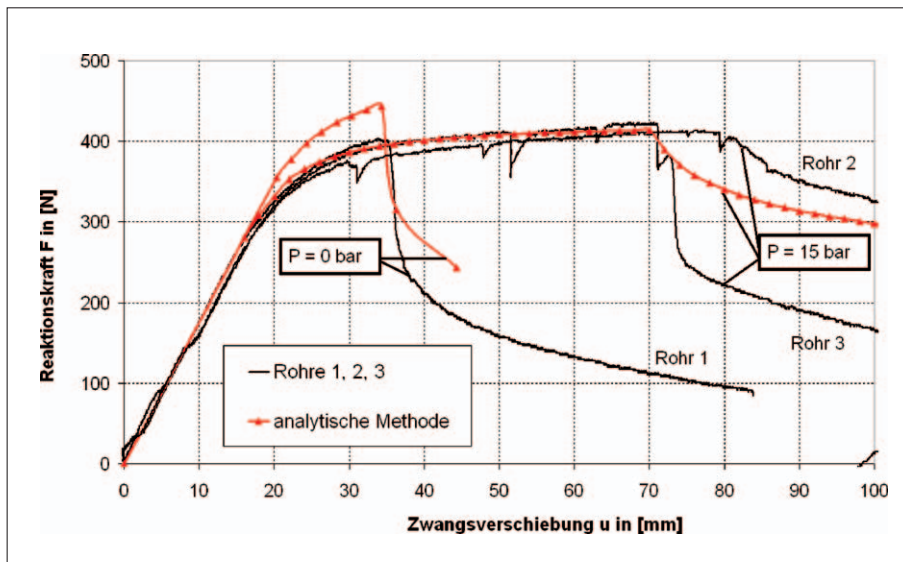


Bild 8: Vergleich der analytischen Berechnungen mit den Versuchen

Fig. 8: Comparing the analytical results with test results

querschnittes in der Praxis nicht tolerabel, da hier Aspekte der Gebrauchstauglichkeit eine Rolle spielen. So muss z. B. gewährleistet sein, dass der Leitungsquerschnitt annähernd kreisförmig bleibt, damit die Leitung mit entsprechenden Inspektionswerkzeugen (Molchen) befahren werden kann.

Das anzuwendende Sicherheits- und Nachweis-konzept für praktische Anwendungen muss sich somit aus mehreren Forderungen zusammensetzen:

1. Die Umfangsspannung darf die zulässige Spannung des Werkstoffes nicht überschreiten [5].
2. Die Aspekte der Gebrauchstauglichkeit, speziell die Ovalisierung, sind entsprechend den Anforderungen des Leitungsbetreibers zu berücksichtigen und einzuhalten. Je nach Einsatzgebiet der Leitung und Anforderung an eine Molchbarkeit können unterschiedliche Ovalitätsmaße akzeptabel sein.
3. Eine in axialer Richtung wirkende Zusatzbeanspruchung muss zwangsbedingt, d. h. konservativ, sein. Das Bemessungsverfahren darf nicht für Leitungsabschnitte angewendet werden, die in axialer Richtung als Biegeträger wirken (beispielsweise selbsttragende Freileitungen).
4. Der verwendete Rohrwerkstoff muss eine hinreichende Duktilität aufweisen. Dies ist für die üblichen Stähle im Rohrleitungsbau [6] gegeben.
5. Die Gleichung 1 zur Berechnung der Grenzdehnung wird hinsichtlich der Berücksichtigung der Auslastung so angepasst, dass die bei der Bemessung zugrunde gelegte Sicherheit Berücksich-

tigung findet. Es ergibt sich die Gleichung 2:

$$\epsilon_{cr,d} = \frac{1}{\gamma_M} \cdot \left(0,124 \frac{t}{r_m} + 0,016 \left(\frac{P \cdot Da}{20 \cdot t \cdot Re} \cdot \frac{1}{\gamma_M} \right)^3 \right) \quad (2)$$

mit P: Druckstufe in bar, Da: Außendurchmesser in mm; γ_P : Teilsicherheit Innendruck; γ_M : Teilsicherheit Material; t: Wanddicke in mm; Re: Streckgrenze in N/mm²; r_m: Mittlerer Radius in mm.

Hiermit ist ein Bemessungsansatz gegeben, der definiert plastische Verformungen zulässt, ohne dabei die Sicherheit zu verringern. Im Gegensatz zur gebräuchlichen Fließgelenktheorie, wo eine Systemtragfähigkeit durch Lastumlagerung gefordert wird, kann das hier aufgezeigte Konzept zur Beurteilung lokaler Probleme angewendet werden.

Für das im Versuch betrachtete Rohr ergeben sich hier Grenzdehnungen zwischen 3 ‰ für das Rohr ohne Innendruck und 6,7 ‰ für das Rohr mit 90 % Innendruckauslastung.

Die in Gleichung 2 berechnete Grenzdehnung ist als obere Schranke zu betrachten, da in der Praxis nie der plötzliche Abfall des Innendruckes ausgeschlossen werden darf. Grenzdehnungen nach Gleichung 2 sind somit nur für besondere überwachte Vorgänge, z. B. das kontrollierte Herbeiführen einer Vorverformung, anzusetzen. In üblichen Bemessungsfällen muss der Innendruck unberücksichtigt bleiben, um nicht unsichere Zustände zu provozieren. Gleichung 2 verkürzt sich somit zu

$$\epsilon_{cr,d} = \frac{1}{\gamma_M} \left(0,124 \frac{t}{r_m} \right) \quad (3)$$

Da nach üblicher elastischer Bemessung Dehnungswerte von maximal 2 ‰ basierend auf der Streckgrenze nicht überschritten werden können, stellt dieses Bemessungsverfahren eine deutliche Erweiterung des Ausnutzungsspielraumes bei der Auslegung von Leitungsabschnitten dar. In dem hier untersuchten Fall lassen sich so bis zu 50 % größere zulässige Zusatzbeanspruchungen infolge von eingepprägten Verformungen nachweisen, als dies bisher möglich war.

Danksagung

Das Projekt wurde im Rahmen des Programms „INNOvationskompetenz mittelständischer Unternehmen“ von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert. Die Verfasser danken der AiF für die finanzielle Förderung und der Firma BRUGG Rohrsysteme für die kostenfreie Bereitstellung der Versuchskörper.

Literatur

- [1] Reddy, B. D. (1979) „An Experimental Study of the Plastic Buckling of Circular Cylinder in Pure Bending“, Int. J. Solid and Structures, Vol. 15, pp. 669-683
- [2] Bai, Y (2003) „Marine structural design“ Elsevier, Amsterdam
- [3] Hauch, S and Bai, Y (1999) „Bending Moment Capacity of Pipes“, Proceedings of the 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, St Johns, Newfoundland Canada Paper No PL-99-5033
- [4] Gresnigt, A. M. (1986) „Plastic design of buried steel pipelines in settlement areas“, Heron, Vol 31 No. 4
- [5] DIN EN 1594 „Gasversorgungssystem – Rohrleitungen für einen maximal zulässigen Betriebsdruck über 16 bar – Funktionale Anforderungen; Deutsche Fassung EN 1594:2000“ (2000-09)
- [6] DIN EN 10208-2 „Stahlrohre für Rohrleitungen für brennbare Medien – Technische Lieferbedingungen – Teil 2: Rohre der Anforderungsklasse B; Deutsche Fassung EN 10208-2:1996“ (1996-08)
- [7] Schlussbericht zum FuE-Vorhaben „Elasto-plastisches Tragverhalten von Stahlrohren unter Innendruck und Zusatzbeanspruchungen“ (KF 0511 301 KUK 3); vorgelegt vom Institut für Stahlbau, Uni Hannover 2005 (unveröffentlicht)
- [8] Schlussbericht zum FuE-Vorhaben „Elasto-plastisches Tragverhalten von Stahlrohren unter Innendruck und Zusatzbeanspruchungen“ (KF 0135 603 KUK 3); vorgelegt von der Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH, Hannover 2005 (unveröffentlicht)
- [9] Schaumann, P.; Keindorf, C.; Brüggemann, H. (2005) „Elastic-plastic bearing behavior of steel pipes exposed to internal pressure and bending“, Proceedings of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, Seoul, Korea, Paper No 2005-jsc-333