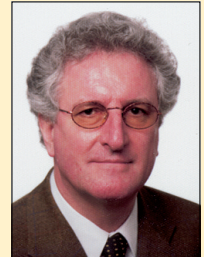


Fragen der Sicherheitsphilosophie bei der Bewertung von Wanddickenverschwächungen

Questions on safety philosophy in the evaluation of wall-thickness reductions

Durch die Anwendung des FEM-Verfahrens ist es möglich, die Auswirkungen von Wanddickenverschwächungen oder Sonderbeanspruchungen auf Hochdruckleitungen genau zu ermitteln. Diese genaue Berechnung hat nur dann einen Stellenwert, wenn ein der Aufgabenstellung angepasstes Bemessungsverfahren die örtlichen Tragreserven der Leitung aufzeigt. Die zum jetzigen Erfahrungsstand anzusetzende örtliche Sicherheit gegen Bruch sollte mindestens $S = 1,8$ betragen. Dieser Weg darf aber nur dann beschritten werden, wenn die Rechenprogramme durch Fachleute angewendet werden, die das gesamte Umfeld und die Belastungsgeschichte der zu untersuchenden Leitungsteile berücksichtigen und über den Korrosionsfortschritt zuverlässige Untersuchungen anstellen.

The use of the FEM procedure makes it possible to determine precisely the effects of wall-thickness reductions and special loadings on high-pressure pipelines. This precision calculation is of value only if a measurement method appropriate to the task indicates the local load-bearing reserves of the pipeline. The local safety margin against fracture to be used on the basis of present-day experience should be not less than $S = 1.8$. This path may only be trod if the computation programs are used by specialists who take into account the entire environment and load history of the piping sectors to be examined, with the performance of reliable investigation of the progress of corrosion.



Dr.-Ing. Manfred Veenker

Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH,
Hannover; Tel. (0511) 28 499-0,
E-Mail: mail@veenkerghmbh.de

Tragreserve

Hochdruckleitungen werden in Deutschland – und nach Einführung der DIN EN 1594 einheitlich auch in Europa – nach dem denkbar einfachsten Sicherheitskonzept berechnet und ausgelegt. Die Wanddicke wird nach der Kesselformel lediglich für den Lastfall Innendruck unter Berücksichtigung eines festen Sicherheitsfaktors festgelegt. Dieses deterministische Sicherheitskonzept ist für die Entwurfs- und Bemessungsphase angemessen, da es einen durchgängigen Sicherheitsstandard festschreibt und vermeidet, über Gefahren und Gefährdungsklassen ein diffuses Sicherheitsbild zu erzeugen.

Der weit verbreiteten Ansicht, zusätzliche Belastungen einer Hochdruckleitung aus Verkehr, Erdeckung usw. seien durch den Sicherheitsfaktor abgedeckt, muss allerdings nachdrücklich widersprochen werden. Diese Einflüsse sind nicht durch irgendwelche Zuschläge abgedeckt, sondern sie dürfen nur deshalb vernachlässigt werden, weil sie im Allgemeinen klein sind. Wenn diese Einflüsse signifikante Größenordnungen annehmen, müssen sie selbstverständlich berücksichtigt werden, und im Anhang zur DIN EN 1594 ist ein Teil der dann anzuwendenden Berechnungs- und Bewertungsverfahren angegeben.

Die ausschließliche Konzentration der Auslegung der Hochdruckleitung auf den Hauptlastfall Innendruck birgt allerdings den Nachteil, dass für signifikante Zusatzlasten keine bestimmungsgemäße Tragreserve vorhanden ist und in diesen Fällen verfeinerte Untersuchungen angestellt werden müssen, wenn Tragreserven für Zusatzbeanspruchungen aufgezeigt werden sollen.

Diese Forderung gilt auch für die hier behandelten Wanddickenverschwächungen aus Korrosion, die mit dem klassischen Bemessungskonzept nach der Kesselformel nicht wirtschaftlich sinnvoll bewertet werden können. Da das Sanieren von Wanddickenverschwächungen durch Herausschneiden entsprechender Leitungsteile oder das Aufbringen von Sicherungsschellen mit hohen Kosten verbunden ist, ist der Nachweis der ausreichenden Standsicherheit des geschwächten Bereiches die Grundlage hoher Einsparpotentiale.

Bewertungsverfahren

Als Bewertungsverfahren für Hochdruckleitungen mit Wanddickenverschwächungen haben sich das empirische Verfahren nach ANSI B 31 G [1] für eine Vorabbewertung und Berechnungen

mit Hilfe der Finite-Element-Methode (FEM) für eine abschließende Optimierung und Bewertung als sinnvoll anwendbar erwiesen. Diese Verfahren werden in [2] und [3] in diesem Heft beschrieben und bewertet. Einer schlüssigen Sicherheitsphilosophie ist nur eine Berechnung nach der FEM zugänglich, da nur bei diesem Verfahren sämtliche Rohrparameter und Lastkollektive genau berücksichtigt werden können. Die weiteren Ausführungen beschränken sich deshalb auf dieses Verfahren. Das empirische Vorgehen in ANSI B 31 G lässt insbesondere die Berücksichtigung von Zusatzbeanspruchungen und die Bewertung von Wanddickenverschwächungen im Bereich von Schweißnähten, Bögen, T-Stücken usw. nicht zu. Die diesbezügliche Einschränkung im Vorwort der Norm wird leider allzu häufig missachtet.

Anforderungen

Wenn Wanddickenverschwächungen mit der FEM berechnet werden, ergeben sich im Verschwächungsbereich Materialspannungen, die weit oberhalb der Fließspannung liegen [2]. Es muss also ein neues Bemessungskonzept aufgestellt werden, das sinnvoller Weise mit Sicherheiten gegen Bruch arbeitet und zu-

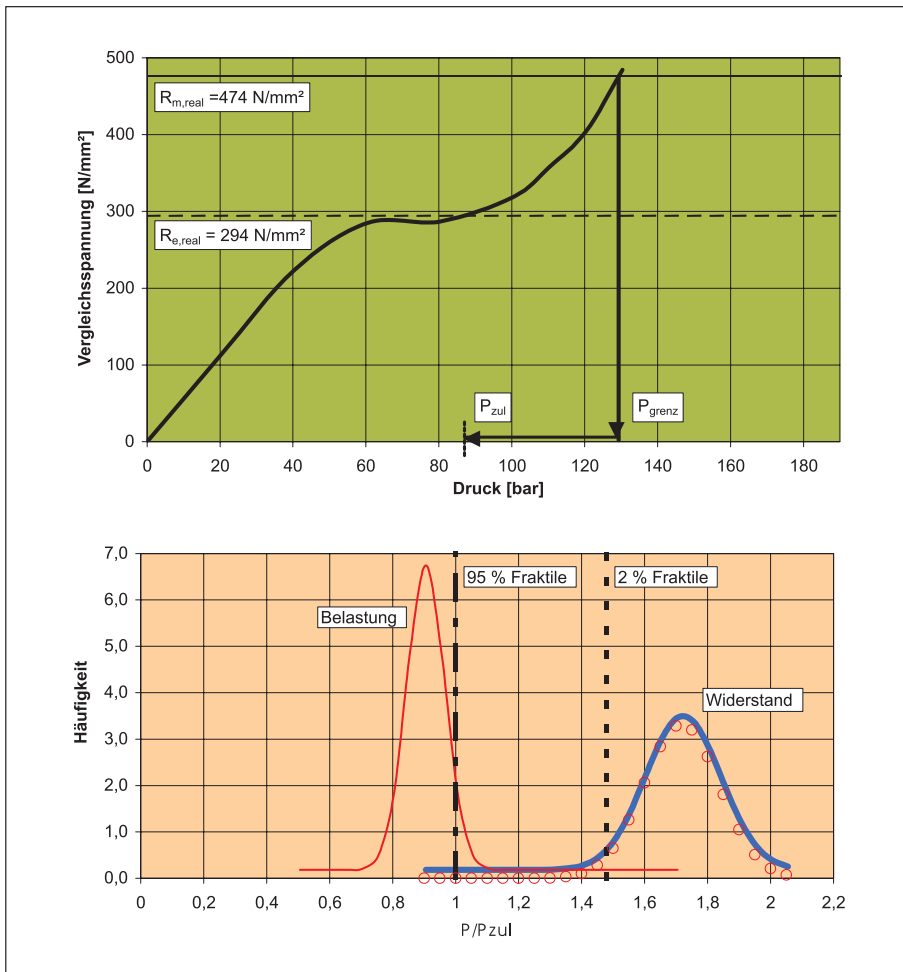


Bild 1: Bemessungskonzept und Sicherheit gegen Bruch
Fig. 1: Dimensioning concept and safety-margin against fracture

sätzlich die Durchplastizierung des verschwächten Querschnittes bewertet.

Über diese Grundlagen hinaus ist es unerlässlich, eine Aussage über den Korrosionsfortschritt und die Korrosionsprognose zu machen, denn gerade bei der Auswertung von Molchläufen ergeben sich so viele Hinweise auf Wanddickenverschwächungen, dass unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ein Aufgraben, Inspizieren und Sanieren aller Stellen nicht möglich ist. Um so unerlässlicher ist es, über eine zuverlässige Prognose den Zeitraum zu ermitteln, in dem die Fehlstelle standsicher bleibt. Die alleinige Bewertung des Ist-Zustandes erfüllt nicht die Anforderungen einer umfassenden Sicherheitsphilosophie.

Für die sichere Bewertung von Fehlstellen müssen damit folgende Grundlagen vorliegen:

- Übereinstimmung von Rechenmodell (FEM) und Wirklichkeit,
- Bemessungskonzept,
- Korrosionsprognose.

Es ist sinnvoll diese Schritte soweit prüfen und zertifizieren zu lassen, dass sie

bei Anwendungen auf Hochdruckleitungen allgemein gültig sind und nicht den Charakter einer prüfpflichtigen Einzelmaßnahme haben.

FEM-Berechnungen

Für FEM-Berechnungen ist Software verfügbar, die auf Personalcomputern läuft und die Anforderungen an geometrisch und physikalisch nichtlineare Untersuchungen problemlos erfüllt. Hier besteht kein Überprüfungsbedarf. Der Benutzer ist allerdings gezwungen, die Fehlstelle abzubilden und hier ergibt sich schon aus Gründen des Speicherplatzbedarfs und der Rechenzeit die Anforderung, nur Teilbereiche des Rohres abzubilden und den abgeschnittenen Rest des Tragwerkes durch Rand- und Übergangsbedingungen zu simulieren. Bei falscher Formulierung dieser Ränder können erhebliche Fehler entstehen und es empfiehlt sich, eine grundsätzliche messtechnische Überprüfung vorzunehmen, bevor das generelle Rechenmodell endgültig festgelegt wird.

Tab. 1: Korrespondenz Versagenswahrscheinlichkeit-Sicherheit

Table 1: The correlation between probability of failure and safety

Versagenswahrscheinlichkeit für Bruch einer Fehlstelle unter Nenndruck	Korrespondierende Sicherheit gegen Bruch
10^{-3}	1,054
10^{-4}	1,126
10^{-5}	1,195
10^{-6}	1,262
10^{-7}	1,329
10^{-8}	1,396
10^{-9}	1,464
10^{-10}	1,534

Bemessungskonzept

Sehr viel schwieriger gestaltet sich das Festlegen von Bemessungsverfahren und Sicherheitszahlen, da es in der Literatur belastbare und hier zu übernehmende Unterlagen nicht gibt. Es ist zwar früher üblich gewesen, Hochdruckleitungen nach der Kesselformel gegen Bruch auszulegen, aber die da eingesetzten Sicherheitszahlen lagen in der Größenordnung von $S = 4,0$ und sind für einen wirtschaftlichen Einsatz moderner Berechnungsverfahren nicht brauchbar.

Ein möglicher Weg ergibt sich, wenn mit Hilfe probabilistischer Methoden aus einer zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit eine Sicherheitszahl abgeleitet wird. Sicherheitszahlen sind bestimmungsgemäß festgelegt als Verhältnis von gefährlichem Zustand zu zulässigem Zustand. Im vorliegenden Fall ist dies das Verhältnis vom Innendruck, der zum Bruch in der Verschwächung führt, zu einem gerade noch zulässigen Innendruck. Beide Drücke sind dabei nicht eine feste Größe, sondern unterliegen einer Verteilung, die zum einen von der Verteilung der Bruchspannung des Werkstoffes abhängig ist und zum anderen von der Verteilung eines wirklich gefahrenen Drucks in einer Hochdruckleitung. Für beide Verteilungsformen gibt es Unterlagen, die z. B. in [4] und [5] aufgezeigt sind. Bildhaft verdeutlicht ist dieser Gedanke in **Bild 1**. Die Spannung der am höchsten belasteten Stelle im Bereich der Verschwächung ergibt sich als Abbild des Werkstoffgesetzes über steigendem Druck. Aus der Überschneidung der Verteilungsfunktionen für den Grenzdruck und den Betriebsdruck ergibt sich die Versagenswahrscheinlichkeit.

Bei Vorgabe eines Grenzwertes für die Versagenswahrscheinlichkeit ergeben

sich zwangsläufig die Verteilungen, wie sie in Bild 1 (unten) dargestellt sind (Darstellung für $P_F = 10^{-9}$).

Für den Grenzdruck wird nun die 2 %-Fraktile und für den Betriebsdruck die 95 %-Fraktile angesetzt.

Die Sicherheit ergibt sich dann in Abhängigkeit von der Versagenswahrscheinlichkeit zu

$$S = P_{\text{Grenz}} / P_{\text{Zul}}$$

Als Grenzwerte für die hier vorliegende Gefährdungskategorie ergeben sich z. B. nach [6] Größenordnungen, die im Bereich von 10^{-7} liegen. D. h. anschaulich, dass bei 10^7 kritischen Fehlstellen ein Platz pro Jahr auftreten darf. Wenn diese Forderung auf den Leitungskilometer bezogen wird und von 100 Fehlstellen pro Kilometer ausgegangen wird, was bei älteren Leitungen auftreten kann, so ergibt sich ein Grenzwert für die Versagenswahrscheinlichkeit von 10^{-9} . In **Tabelle 1** sind die aus diesen Bedingungen ermittelten Sicherheitszahlen aufgezeigt und es folgt daraus zunächst, dass für die Bemessung von Fehlstellen gegen Bruch eine Sicherheit von $S \approx 1,5$ ausreichend wäre. Unter dem Aspekt, dass in diesem Bereich wenig Erfahrungen vorliegen und die örtlichen Gegebenheiten in ihrer Gesamtheit unter Umständen nicht exakt erfasst werden können, empfiehlt es sich, zunächst mit der Sicherheit gegen Bruch

$$S = 1,2 \cdot 1,5 = 1,8$$

zu arbeiten. Es ist selbstverständlich, dass bei genaueren Untersuchungen die Sicherheitszahlen weiter eingeschränkt werden können. Entsprechende Zertifizierungen [7] schreiben diesen Weg ebenfalls fest mit Ausblick auf später mögliche günstigere Ansätze. Bemessungsverfahren dieser Art sind nur dann zulässig, wenn durch Ausmessen und Ausschleifen der Fehlstelle eindeutige Verhältnisse geschaffen worden sind bzw. bei Fehlstellen, die nicht zugänglich sind, durch Fachleute angemessene Zuschläge für Geometrie und Zustand der Wanddickenverschwächung angesetzt werden.

Korrosionsprognose

Das Aufstellen einer allgemein gültigen Korrosionsprognose, die sicher aber nicht zu konservativ ist, stößt an Grenzen und es kann allenfalls erreicht werden, die wichtigsten Einflüsse in Algorithmen zu fassen, die dann in einem Expertensystem von Fachleuten abgefragt und weiterverarbeitet werden. Die umfangreiche Literatur, die in [8] bis [17] hier nur in Auszügen zitiert ist, und die Erfahrungen der Korrosionsschutzfachleute der Netzbetreiber lassen eine Eingrenzung zu, so dass sich gemäß dem Ablaufplan in **Bild 2** brauchbare Ergebnisse für den Korrosionsfortschritt ermitteln lassen. Die

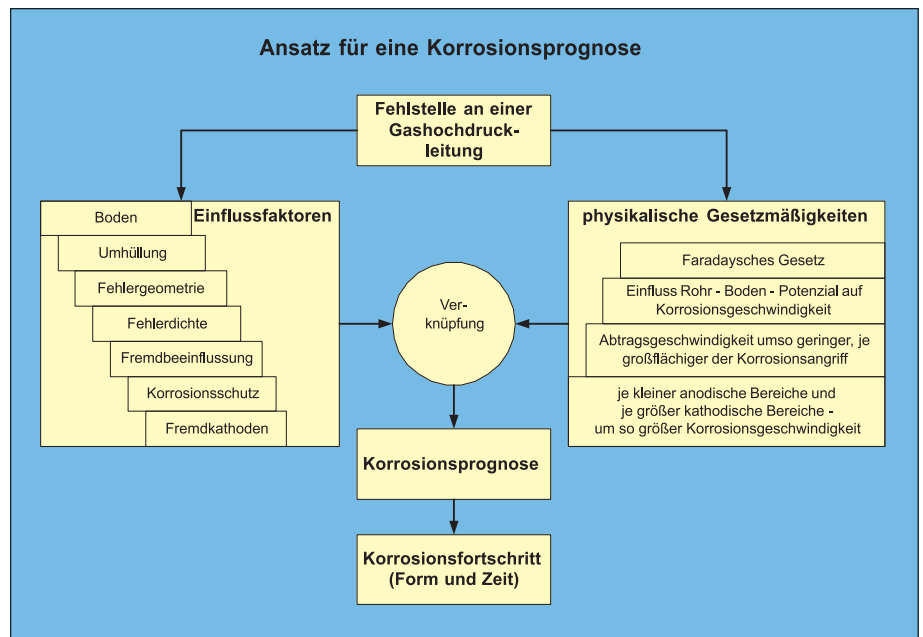


Bild 2: Ablaufschema Korrosionsprognose

Fig. 2: Procedural diagram for forecasting of corrosion

Gesamtheit aller Algorithmen hier aufzuführen, würde den Rahmen dieser Veröffentlichung sprengen. Sie sind in dem Rechenprogramm KaRo [18] zusammengefasst und mit diesem Programm, das zunächst Fehlstellen auf Grundlage des FEM-Verfahrens und neuronaler Netze berechnet, werden dann zulässige Standzeiten für unbehandelte Verschwächungen ermittelt, in denen der volle Nenndruck der Fehlstelle zugewiesen werden kann. Die Abtragsraten, die sich für flächenhafte oder einzelne Korrosionsstellen ergeben, liegen in den Bereichen von 0,01 mm/a (z.B. Fehlstellen bei intaktem KKS) über 0,3 mm/a (z.B. Fehlstellen mit eingeschränktem KKS) bis zu Extremwerten von 1,2 mm/a (z.B. bei elektrischer Beeinflussung).

Literatur

[1] ASME B31G, Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines, 1991
 [2] Engbert, F.; Engel, A.; Steiner, M.: Erfahrungen bei der Bewertung von Wanddickenminderungen mit der Methode der Finiten Elemente; 3R internat. 40 (2001) Nr. 10-11, S. 642-644
 [3] Hoffmann, U.: Erfahrungen bei der Bewertung von Wanddickenverschwächungen im Ergebnis von Molchinspektionen; 3R internat. 40 (2001) Nr. 10-11, S. 646-650
 [4] Spaethe, G.: Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen, Springer-Verlag Wien / New York, 1992
 [5] ISO CD 16708
 [6] The superb project: Linepipe statistical properties and implications in design of

offshore pipelines, 1997 Omae-Volume V, pp. 45
 [7] Zertifizierung des Verfahrens "Bewertung von Wanddickenverschwächungen", Materialprüfanstalt (MPA) Hannover
 [8] Rahmel, A.; Schwenk, W.: Korrosion und Korrosionsschutz von Stählen; Verlag Chemie; 1977
 [9] Staider, F.: Lokale Korrosion an erdvergrabenen metallischen Rohrleitungen; 3R internat. 24 (1985) Nr. 8
 [10] Schwenk, W.: Untersuchungen zur Korrosion von Stahlrohren unter nichthaftender PE-Umhüllung, 3R internat. 28 (1989) Nr. 6
 [11] Schwenk, W.: Bemerkungen zur Abschätzung von Umhüllungsschäden erdverlegter Stahlrohre aus Potentialgradienten-Messungen; 3R internat. 33 (1994) Nr. 7
 [12] Mackenstein, P.; Schmidt, W.: Beurteilung der Festigkeit von fehlerhaften Pipeline-rohren – Verfahren und Bewertungskriterien; 3R internat. 34 (1995) Nr. 12
 [13] Ahlers, M.; Schöneich, H.-G.: Intelligente Molchung – ein Beitrag zur Überwachung des Korrosionsschutzes molchbarer Gashochdruckleitungen; 3R internat. 39 (2000) Nr. 7
 [14] Fuchs, W.; Steinrath, H.; Ternes, H.: Untersuchungen über die Wechselstromkorrosion von Eisen in Abhängigkeit von der Stromdichte und Frequenz; gwf-Wasser/Abwasser (1958)
 [15] Wendler-Kalsch, E.; Gräfen, H.: Korrosionsschadenkunde, 1998; Springer-Verlag
 [16] Stern, M. und Geary, A. L.: 1957; Electrochem. Soc.; pp. 56-63, Linearpolarization Resistance Monitoring
 [17] Riegel, K.; Queitsch, W.: Erfahrungen bei Intensivmessungen an sanierten Altleitungen; 3R internat. 33 (1994) Nr. 7
 [18] KaRo: Rechenprogramm zur Bewertung von Korrosion an Rohrleitungen, Gemeinschaftsentwicklung VNG AG / Ing.-Büro Veenker, 2000