

Begrenzung des Anwendungsbereiches für die bruchmechanische Bewertung von Gasleitungen

nach DVGW-Merkblatt G 464

Im Zusammenhang mit dem Neubau oder der Umstellung von Gashochdruckleitungen ist entsprechend dem DVGW-Regelwerk der **Nachweis der Tauglichkeit der verwendeten Stahlrohre im Rahmen einer bruchmechanischen Bewertung** zu erbringen. Dies erfolgt aktuell für Gashochdruckleitungen nach dem DVGW-Merkblatt G 464. Um abzuschätzen, ob dies auch für Gasleitungen bis 16 bar erforderlich ist, **hat der DVGW das Forschungsprojekt BAG464 initiiert**, dessen Ziel es war, eine Abgrenzung für die sinnvolle Anwendung der bruchmechanischen Bewertung zu identifizieren.

von: Dr. Ulrich Marewski, Tillmann Wiegold & Dr. Michael Steiner (alle: Open Grid Europe GmbH)

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten bruchmechanischen Bewertungen basieren auf dem Vorgehen, wie es im DVGW-Merkblatt G 464 [1] beschrieben wird. Dieses beinhaltet ein abgeschlossenes, konservatives Sicherheitskonzept für den Transport von Wasserstoff in Gashochdruckleitungen. Die bruchmechanische Bewertung resultiert in einer Prognose des Risswachstums und liefert die dazugehörige kritische Lastwechselzahl N_{krit} .

Für die Berechnung werden die Auslegungsparameter der Rohrleitung entsprechend dem aktuellen DVGW-Regelwerk verwendet. Dabei wird grundsätzlich zwischen dem Neubau einer Rohrleitung und der Umstellung einer existierenden Rohrleitung unterschieden.

Da es sich bei N_{krit} um das theoretische Versagen eines konservativ angenommenen Fehlers nach DVGW-Merkblatt G 464 handelt, wird die Integrität der Rohrleitung durch zwei Sicherheitsfaktoren gewährleistet. Einer der Sicherheitsfaktoren wird auf die Risstiefe angewendet. Da das Risswachstum nicht linear ist, beschleunigt sich dieses mit fortschreitender Entwick-

lung des Risses. Daher wird ein zweiter Sicherheitsfaktor eingeführt, welcher auf die prognostizierten Lastwechsel angewendet werden muss und den Zeitpunkt der Verifizierung der bruchmechanischen Bewertung festlegt. Eine Verifikation und entsprechende Anpassung der bruchmechanischen Prognose ist jedoch immer – unabhängig von der rechnerischen Bewertung – nach spätestens zehn Jahren erforderlich.

Hinsichtlich der Notwendigkeit einer bruchmechanischen Bewertung wurden in dem durchgeführten Projekt sinnvolle Kriterien eingeführt, die angeben, ob eine bruchmechanische Bewertung einen relevanten Beitrag zu der Bewertung der Integrität der vorliegenden Rohrleitung erbringt. In diesem Zusammenhang wird eine Mindestzahl an Lastwechseln N_{safe} definiert, welche eine Rohrleitung im regulären Betrieb nicht erreichen wird. Dieser Wert wird mit der kritischen Lastwechselzahl der bruchmechanischen Bewertung verglichen. Gilt $N_{krit} > N_{safe}$, so ergibt eine bruchmechanische Bewertung keine weitere Erkenntnis zur üblichen Auslegung der Rohrleitung. Sollte – möglicherweise in Ausnahmefällen – die anzunehmen-

de Anzahl der Lastwechsel größer als N_{safe} sein, sind Einzelfallbetrachtungen anzustellen.

- Für den Druckbereich $p \leq 16$ bar wird $N_{krit} = 100.000$ Volllastwechsel angesetzt. Dies deckt mehr als zwei Volllastwechsel pro Tag für 100 Jahre ab (zwei Volllastwechsel/Tag \times 365 Tage/Jahr \times 100 Jahre = 73.000 Volllastwechsel).
- Da davon auszugehen ist, dass im Gashochdruckbereich ($p > 16$ bar) weniger Druckwechsel stattfinden, wird $N_{krit} = 50.000$ angesetzt. Dies deckt mehr als einen Volllastwechsel pro Tag über 100 Jahre ab. Ein weiteres Argument für den geringeren Wert ist, dass es im Transportnetz aufgrund physikalischer Grenzen oftmals nicht möglich ist, einen kompletten Lastwechsel pro Tag zu erreichen. Somit ist davon auszugehen, dass der angenommene Wert im Regelfall eine sehr konservative Grenze beschreibt.

Der Vollständigkeit halber soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass bei einer erwarteten sehr großen Anzahl von Lastwechseln – neben der typischen statischen Auslegung einer Rohrleitung – zusätzlich die Auslegung gegen

Wechselbeanspruchung nach DIN EN 13480-3 [2] zu überprüfen ist.

Betrachtete Materialien

Im Rahmen des Projektes wurden die bruchmechanischen Bewertungen für eine Vielzahl von Rohrmaterialien durchgeführt. Diese umfassen typische Rohrstähe, welche sowohl im Verteil- als auch im Transportnetz sowie für Rohrleitungen auf Anlagen eingesetzt werden. Eine Auflistung der überwiegend verwendeten Materialien wird tabellarisch in dem Projektbericht [3] gegeben. Hier ist anzumerken, dass weitere Stahlsorten in die Tabelle eingeordnet werden können, soweit die mechanisch-technologischen Kennwerte den angegebenen Materialien entsprechen. Im Folgenden werden hier repräsentative Materialien für die Gasverteilung und den Gastransport detaillierter betrachtet.

Ergebnisse der bruchmechanischen Bewertung

Mit dem Ziel, Randbedingungen zu identifizieren, für die bei der Auslegung einer Rohrleitung keine bruchmechanische Bewertung notwendig ist, wurden zahlreiche bruchmechanische Bewertungen durchgeführt. Dabei wurden Nenn-durchmesser, Auslegungsdruck, Stahlsorte und initiale Risstiefe variiert. Zur deutlicheren Darstellung werden die Ergebnisse für den Druckbereich $p \leq 16$ bar und den Hochdruckbereich getrennt dargestellt. Um allgemeingültige und konservative Ergebnisse zu erhalten, wurde immer der nach geltendem Regelwerk minimal zulässige Wert für die Wanddicke verwendet. Die Mindestwanddicke wird in der Gasverteilung bis 16 bar nach dem DVGW-Arbeitsblatt G 462 [4] in Kombination mit DIN EN 12007-3 [5] und dem Sicherheitsbeiwert $S = 2,22$ (maximaler Nutzungsgrad = 0,45) bestimmt. Für Gastransportleitungen wird die Mindestwanddicke nach dem DVGW-Arbeitsblatt G 463 [6] in Kombination mit DIN EN 1594 [7] und einem Sicherheitsbeiwert $S = 1,6$ bestimmt. Zusätzlich wurde für Anlagen die Mindestwanddicke nach dem DVGW-Arbeitsblatt G 491 [8] in Kombination mit DIN 30690-1 [9] bestimmt.

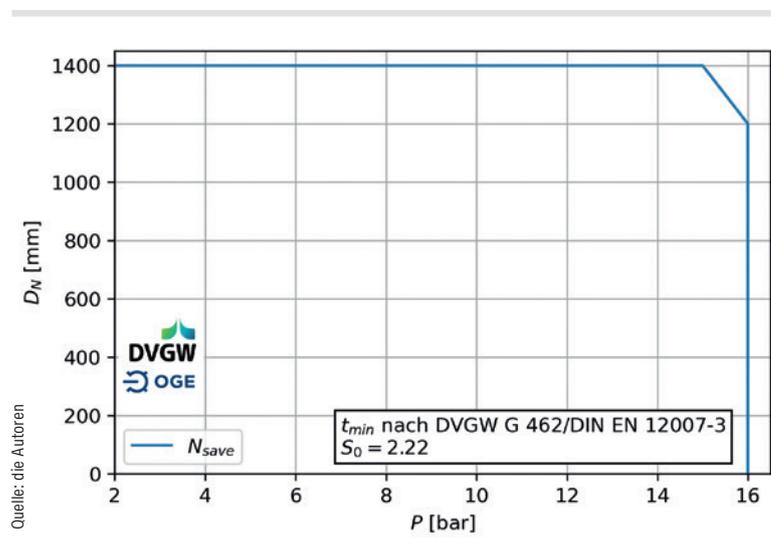
Auslegung nach DVGW-Arbeitsblatt G 462, DIN EN 12007-3, $p \leq 16$ bar

Für die Gasverteilung bis zu maximalen Betriebsdrücken ≤ 16 bar wird eine detaillierte bruchmechanische Bewertung als nicht erforder-

lich eingestuft, wenn die kritische Lastwechselzahl $N_{krit} \geq 100.000$ erreicht. Für Stahlrohre in der Gasverteilung bis 16 bar ist eine zerstörungsfreie Prüfung der Stahlrohre nicht verpflichtend, sodass oftmals keine Angaben zu Fehlergrößen vorliegen. Aufgrund der vorhandenen Qualitätsstandards für neuwertige und bis zu ca. 40 Jahre alte Rohre kann konservativ eine mögliche Risstiefe von 20 Prozent der Wanddicke angenommen werden. Für ältere Leitungen kann sinnvollerweise eine konservative Fehlertiefe von 30 bis 35 Prozent der Wanddicke vermutet werden. Die Annahme noch größerer Fehlertiefen erscheint den Autoren nicht sinnvoll, da der zu gewährleistende sichere Betrieb von Leitungen für brennbare Medien – auch unabhängig von der Verwendung des Mediums Wasserstoff – in solchen Fällen zumindest diskussionswürdig wäre.

Die **Abbildungen 1** und **2** zeigen Ergebnisse der bruchmechanischen Bewertung als Darstellung des Rohrdurchmessers über der Druckstufe. In diesen Abbildungen wird eine initiale Risstiefe von $a_0 = 20$ Prozent respektive $a_0 = 35$ Prozent der Rohrwanddicke vorausgesetzt. Die dargestellte Linie bildet die Grenze, an der die bruchmechanische Bewertung das Kriterium $N_{krit} > N_{safe}$ gerade noch erfüllt. Entsprechend erfüllen bzw. übererfüllen alle Parameter, die zu einer Position unterhalb der eingezeichneten Linie führen, dieses Kriterium. Je weiter die Betriebs- bzw. Rohrparameter von der Grenzkurve entfernt sind, desto größer ist die tatsächlich berechnete, kritische Lastwechselzahl N_{krit} bzw. die Differenz zwischen N_{krit} und N_{safe} . Die Ergebnisse sind dargestellt für die Stahlsorten L245/L290, wobei die Berechnungen ergaben, dass bei allen betrachteten Werk-

Abb. 1: Darstellung Nenn-durchmesser über Druck für $P \leq 16$ bar, $a_0 = 20$ Prozent



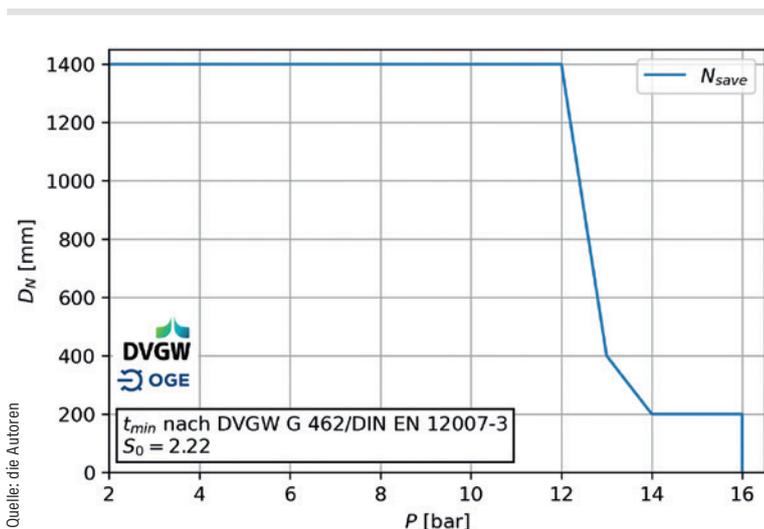
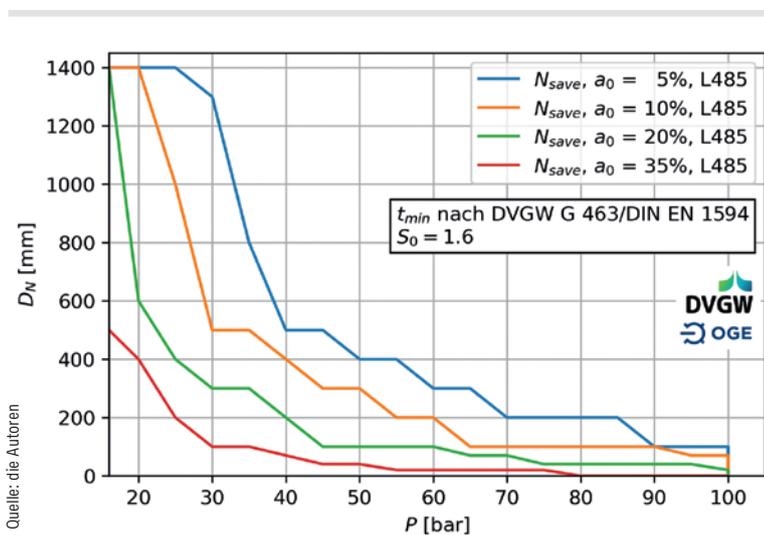


Abb. 2: Darstellung Nenn-durchmesser über Druck für $P \leq 16$ bar, $a_0 = 35$ Prozent

stofften lediglich marginale Unterschiede hinsichtlich der Anzahl der berechneten Drucklastwechsel auftraten. Die stufenartige Darstellung in den Abbildungen des Rohrdurchmessers über den Druck sind darauf zurückzuführen, dass der Rohrdurchmesser ab DN = 100 mm in diskreten Intervallen (Schritte von jeweils 100 mm) berücksichtigt wurde.

Für neuere Rohrleitungen, bei denen davon ausgegangen werden kann, dass die initiale Risstiefe kleiner als 20 Prozent ist, ist für nahezu den gesamten dargestellten Bereich (d. h. für maximale Betriebsdrücke $p \leq 16$ bar) das Kriterium $N_{krit} \geq N_{safe}$ erfüllt. Lediglich für Rohre mit einem Durchmesser > 1.200 mm ist das gewählte Kriterium für Drücke $p \leq 15$ bar erfüllt. Letztere Rohrleitungsdimensionen sind für das Verteilnetz jedoch nicht üblich und wurden nur der Vollständigkeit halber in die bruchmechanische Bewertung mit aufgenommen.

Abb. 3: Darstellung Nenn-durchmesser über Betriebsdruck für $P \geq 16$ bar mit verschiedenen initialen Risstiefen, Werkstoff L485



Quelle: die Autoren

Auch für ältere Rohrleitungen mit einer angenommenen initialen Risstiefe von maximal 35 Prozent zeigt sich, dass für die meisten Parameter $N_{krit} > N_{safe}$ erfüllt ist. Für maximale Betriebsdrücke bis einschließlich 12 bar erfüllen alle Durchmesser das gewählte Kriterium bzw. entfällt somit das Erfordernis einer bruchmechanischen Bewertung. Für Rohrdurchmesser ≤ 200 mm kann eine bruchmechanische Bewertung sogar für maximale Betriebsdrücke bis 16 bar entfallen.

Auslegung nach DVGW-Arbeitsblatt G 463, DIN EN 1594, Gashochdruckleitungen ab 16 bar

Die Auswertung der bruchmechanischen Bewertung für Gashochdruckleitungen erfolgte analog zu den Leitungen für die Gasverteilung. Die geltenden Normen für Gashochdruckleitungen erfordern bereits seit längerer Zeit regelmäßige Inspektionen, Integritätsbewertungen sowie zerstörungsfreie Prüfungen während der Fertigung der verwendeten Rohre. Dadurch lässt sich eine initiale Risstiefe/Rissgeometrie in vielen Fällen (z. B. aus der Detektionsschwelle für die zerstörungsfreie Prüfung) abschätzen und wird in den nachfolgenden Bewertungen entsprechend berücksichtigt. Wie für den Druckbereich $p \leq 16$ bar, werden die initialen Risstiefen von 20 Prozent, 35 Prozent und zusätzlich 5 bzw. 10 Prozent dargestellt. Letztere entsprechen den Vorgaben für neue und neuwertige Rohrleitungen gemäß [1]. Die Abbildung 3 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen für den Werkstoff L485.

Für den Hochdruckbereich ergibt sich ein deutlich größerer Bereich von Parametern, für die eine bruchmechanische Bewertung erforderlich ist. Lediglich in den Fällen, in denen entweder der Durchmesser der Rohrleitung oder der Betriebsdruck geringere Werte annimmt, ist eine bruchmechanische Bewertung nicht erforderlich. Für die typischen Geometrien und Betriebsdrücke eines leistungsfähigen modernen Transportnetzes ergibt die bruchmechanische Bewertung eine deutliche Limitierung der Anzahl von berechneten Lastwechseln mit großer Druckschwingbreite. Abhängig vom maximalen Betriebsdruck ist insbesondere die initiale Risstiefe maßgebend für die Anzahl der berechneten Drucklastwechsel. Im Kontext der durchgeführten Arbeit wird zur besseren Vergleichbarkeit allerdings immer auf die Anzahl der Drucklastwechsel bei maximal möglicher

Insbesondere für die Leitungsrohre der Verteilnetze kann in den meisten Fällen auf eine bruchmechanische Bewertung gemäß dem DVGW-Merkblatt G 464 verzichtet werden.

Schwingbreite, d. h. über den gesamten Bereich des MOP der Leitung, Bezug genommen. Derartige Beanspruchungen sind aber gerade bei Hochdruckdruckleitungen sehr selten, sodass auch eine relativ gering erscheinende Anzahl von Volllastwechseln in der Regel den Transport von Wasserstoff über lange Zeiträume ermöglicht.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen des DVGW-Projektes BAG464 sollte identifiziert werden, unter welchen Randbedingungen eine bruchmechanische Betrachtung entsprechend dem DVGW-Arbeitsblatt G 464 nicht erforderlich ist. Die Untersuchungen ergaben insbesondere für den bevorzugten Druckbereich der Verteilnetze (bis 16 bar), dass – unter Einhaltung der beschriebenen Randbedingungen – für die überwiegende Anzahl der zu betrachtenden Leitungen keine bruchmechanische Bewertung erforderlich ist. Bis zu einem Betriebsdruck von 12 bar ist grundsätzlich keine bruchmechanische Bewertung erforderlich; je nach weiteren spezifischen Leitungs- und/oder Betriebsparametern (z. B. Leitungsdurchmesser, Beimischungen von Wasserstoff) ist in vielen Fällen sogar bis zu einem Betriebsdruck von 16 bar keine bruchmechanische Bewertung erforderlich. Dies ist darin begründet, dass die möglichen auftretenden Drucklastwechsel zwar rechnerisch beschrieben werden können, der tatsächlich berechnete Rissfortschritt jedoch – insbesondere im Vergleich zu Gashochdruckleitungen – vernachlässigbar ist.

Das oben Genannte gilt für den Hochdruckbereich nur, wenn entweder der Druck oder der Durchmesser kleine Werte annimmt. Hier hat sich in den meisten Fällen gezeigt, dass eine bruchmechanische Bewertung bei der Auslegung der Rohrleitung einen relevanten Beitrag liefert und somit erforderlich ist. Die dargestellten Ergebnisse umfassen eine umfangreiche Betrachtung verschiedener Werkstoffe, Darstellungen der Berechnungsergebnisse (wie z. B. die Anzahl der erreichten Lastwechsel über der Druckschwingbreite) sowie die Berücksichtigung von Beimischungen von Wasserstoff.

Im Rahmen des durchgeführten Projektes wurde festgestellt, dass insbesondere für die Leitungsrohre der Verteilnetze sehr häufig auf eine bruchmechanische Bewertung gemäß dem DVGW-Merkblatt G 464 verzichtet werden kann. Damit ist ein wertvoller Beitrag zur Reduzierung des Aufwandes bei dem Neubau und bei der Umstellung von Leitungen auf das Medium Wasserstoff erbracht worden. ■

Literatur

- [1] DVGW-Merkblatt G 464: Bruchmechanisches Bewertungskonzept für Gasleitungen aus Stahl mit einem Auslegungsdruck von mehr als 16 bar für den Transport von Wasserstoff.
- [2] DIN EN 13480-3: Metallische industrielle Rohrleitungen – Teil 3: Konstruktion und Berechnung.
- [3] Abschlussbericht DVGW-Projekt BAG464: Begrenzung des Anwendungsbereiches für bruchmechanische Bewertung von Gasleitungen nach DVGW G 464, Bonn 2024.
- [4] DVGW-Arbeitsblatt G 462: Gasleitungen aus Stahlrohren bis 16 bar Betriebsdruck, Errichtung.
- [5] DIN EN 12007-3: Gasinfrastruktur – Rohrleitungen mit einem maximal zulässigen Betriebsdruck bis einschließlich 16 bar – Teil 3: Besondere funktionale Anforderungen für Stahl.
- [6] DVGW-Arbeitsblatt G 463: Gashochdruckleitungen aus Stahlrohren für einen Auslegungsdruck von mehr als 16 bar; Planung und Errichtung.
- [7] DIN EN 1594: Gasinfrastruktur – Rohrleitungen für einen maximal zulässigen Betriebsdruck über 16 bar – Funktionale Anforderungen.
- [8] DVGW-Arbeitsblatt G 491: Gas-Druckregelanlagen für Eingangsdrücke bis einschließlich 100 bar.
- [9] DIN 30690-1: Bauteile in Anlagen der Gasversorgung – Teil 1: Anforderungen an Bauteile in Gasversorgungsanlagen.

Die Autoren

Dr. Ulrich Marewski ist Leiter Leitungsbewertung bei der Open Grid Europe GmbH.

Tillmann Wiegold ist Referent für Leitungsbewertung bei der Open Grid Europe GmbH.

Dr. Michael Steiner ist Leiter Pipelineintegrität bei der Open Grid Europe GmbH.

Kontakt:

Tillmann Wiegold
Open Grid Europe GmbH
Gladbeckerstr. 404
45326 Essen
Tel.: 0201 364218-327
E-Mail: tillmann.wiegold@oge.net
Internet: www.oge.net