

# Wirkung von Wasserstoffgas auf Stahlrohre – eine bruchmechanische Betrachtung

Von Georg Golisch, Christoph Kalwa und Holger Brauer

*Wasserstoff ( $H_2$ ) wird oft als alternativer Energieträger zu fossilen Brennstoffen hervorgehoben, da er eine  $CO_2$ -freie Wirtschaft ermöglicht. Deutschland und andere europäische Länder haben das Potenzial einer  $H_2$ -Wirtschaft erkannt und fördern in großem Umfang Projekte, die den Weg für eine Umsetzung ebnen und bestmöglich unterstützen.*

## Einleitung

Wasserstoff wird oft nicht dort benötigt, wo er produziert wird. Am wirtschaftlich sinnvollsten scheint für den Transport die Nutzung von Verteilnetzen aus Rohrleitungen [1]. Verteilnetze gibt es bereits für Erdgas, teilweise mit zwei parallelen Strängen, womit ein schneller erster Lösungsansatz für den  $H_2$ -Transport geschaffen ist. Dennoch steht in Frage, inwieweit bestehende Rohrleitungen für den  $H_2$ -Transport geeignet sind. Eine mögliche Umwidmung von reinem Erdgas auf  $H_2$ /Erdgas-Gemische oder 100 %  $H_2$  könnte nach bestehender Theorie zu einer verringerten Betriebszeit führen. Wie Bestandsleitungen auf den  $H_2$ -Transport reagieren, hängt maßgeblich von Druck und Druckschwankungen, der Gaszusammensetzung und dem Rohrmaterial ab. Der Betreiber kann die Lebensdauer verlängern, indem er sein Netz ohne neuinstallierte Rohre an das neue Gas angepasst auslastet. Daher steht für den Betrieb mit  $H_2$ /Erdgas-Gemisch oder 100 %  $H_2$  nur noch ein Teil der betrieblichen Restlebensdauer zur Verfügung. Um die Lebensdauer zu verlängern, können dann bspw. geringere Drücke verwendet werden, was aber seinerseits eine schlechtere ökonomische Nutzung nach sich zieht.

Folglich werden für neue Leitungen verbesserte Rohrmaterialien eingesetzt, die den Anforderungen in einer  $H_2$ -Wirtschaft auch bei hohen Drücken besser standhalten als herkömmliche Rohrmaterialien. Diese so genannten H2ready®-Materialien müssen dann die Vorgaben der mechanischen Eigenschaften aus Designnormen wie bspw. der ASME B31.12 (2019) [2] erfüllen.

Neben der amerikanischen Norm ASME B31.12 lassen auch europäische und deutsche Normen eine bruchmechanische Lebensdaueranalyse zu. Sie wird genutzt, um eine konservative Abschätzung der betrieblich nutzbaren Lebensdauer zu ermitteln und bedarf einer Vielzahl von Annahmen und Werkstoffkennwerten. Dieser Artikel gibt Aufschluss über die verschiedenen Eingangsparameter. Insbesondere die Ermittlung der betrieblichen Lebensdauer einer Rohrleitung unterscheidet sich nach ASME B31.12 von der klassischen Herangehensweise und wird in diesem Zusammenhang

diskutiert. Hier wird vor allem auf die Vor- und Nachteile der Kenngrößen  $K_{IH}$ ,  $K_{IC}$  und  $K_{JIC}$  eingegangen.

Weiterhin zeigt eine Parameterstudie die Einflussgrößen auf die Lebensdauer von beispielhaften Rohrleitungen aus Stahl mit Abmessungen von mittleren Leitungsrohren von Mannesmann Line Pipe GmbH und Großrohren von Europipe GmbH auf. Sie zieht Schlüsse hinsichtlich zerstörungsfreier Prüfung, Kennwertermittlung und Leitungsbetrieb, um eine lange betriebliche Lebensdauer zu ermöglichen.

## Die bruchmechanische Lebensdaueranalyse

Bruchmechanische Lebensdaueranalysen basieren auf der schwellenden Belastung eines rissbehafteten Rohres und dem Widerstand des Rohrmaterials gegen diese Belastung. Sie beziehen die drei wesentlichen Aspekte der Lebensdauer eines Bauteils mit ein: die Inbetriebnahme, den Betrieb der Rohrleitung und den „end of life“-Zustand. Für alle drei Aspekte sind unterschiedliche Kenngrößen notwendig, die eine Lebensdaueranalyse erst ermöglichen, siehe **Bild 1**.

### Inbetriebnahme (Anfangszustand)

Die Lebensdaueranalyse startet mit der Inbetriebnahme einer Rohrleitung. Zu diesem Zeitpunkt wird bereits angenommen, dass eine Ungänze (Riss) an der Rohrinneenseite vorliegt. Die Größe einer nicht entdeckten Ungänze hängt von der Auflösung der zerstörungsfreien Prüfung ab. Diese Auflösung wird an künstlichen Referenzfehlern kalibriert, die bspw. 5 % (N5) oder 10 % (N10) der Wanddicke betragen. Nach bruchmechanischer Betrachtung wird eine solche Ungänze als Riss angenommen, was weniger kritische Geometrien der Ungänze wie Kerben und Eindrücke konservativ mit einschließt. Bei einer N5-Kalibrierung wird für eine 8 mm Wand folglich eine Anfangsrisstiefe  $a_0$  von 0,4 mm angenommen, bei einer N10-Kalibrierung eine Anfangsrisstiefe  $a_0$  von 0,8 mm. Die Fehlerbreite ist mit 50 mm in der Entwurfsversion des DVGW-Arbeitsblattes G 463 [3] definiert.

**Betrieb (Risswachstumsphase)**

Für den Betrieb der Rohrleitung werden Innendruck und Druckschwankungen berücksichtigt. Rohrabmessung, Größe der Ungenauigkeiten und Druck ergeben die Spannungszustände. All diese Größen gehen in die Ermittlung der Belastung mit ein. Die Belastung in Form der Schwankungsbreite des Spannungsintensitätsfaktors  $\Delta K$  definiert die entscheidende Größe für den Betrieb. Diese wird auf Basis von Regelwerken wie BS 7910 [4] bestimmt.  $\Delta K$  wird vorerst dem materialabhängigen Schwellenwert  $\Delta K_{th}$  gegenübergestellt, ab dessen Überschreiten Rissfortschritt möglich ist ( $\Delta K > \Delta K_{th}$ ). Konservative Abschätzungen beachten diesen Schwellenwert nicht und sehen jeden Riss als wachstumsfähig an.

Eine Lebensdaueranalyse benötigt weiterhin eine Rissfortschrittsrate  $da/dN$ , die material- und mediumabhängig ist. Je größer Druck und Druckschwankungen im Betrieb sind, desto größer ist  $\Delta K$  und desto schneller wächst ein Riss. Die Ermittlung von Rissfortschrittsraten ist in ASTM E647 [5] beschrieben und kann an Luft, wie in  $H_2$  erfolgen.

Für die Rissfortschrittsrate gibt ASME B31.12 eine „upper bound“-Rate an, die auf Untersuchungen an vielerlei Stählen in  $H_2$  beruhen [6], jedoch die tatsächliche Performance unterschätzen kann. Die Prüfung der Rissfortschrittsraten des jeweiligen Stahls ermöglicht folglich realistischere Aussagen für die Lebensdauer. Die Rohrhersteller Mannesmann Line Pipe und Europipe haben das erkannt und haben bereits erste Rissfortschrittsraten für die eigenen H2ready®-Leitungswerkstoffe ermitteln lassen. Welchen Einfluss die Verwendung gemessener Werte auf die Lebensdauer hat, ist in der unten stehenden Parameterstudie wiedergegeben. Generell sind bruchmechanische Lebensdaueranalysen bereits konservativ, weil sie auf der Grundlage eines wachstumsfähigen Risses mit scharfer Spitze aufgestellt werden, die in realen geschweißten Rohren nicht vorhanden sind. Darüber hinaus wird nur ein Teil der Lebensdauer für den Leitungsbetrieb berücksichtigt. Mit dem Einführen zusätzlicher Kriterien darf dann ein Riss bspw. nur ein Bruchteil der Wanddicke erreichen. Risswachstum über diese Kriterien hinaus bedeuten eine Nutzung der Sicherheitsreserve, siehe Bild 1. Es empfiehlt sich daher, die Lebensdauer

durch regelmäßige Inspektion zu verifizieren. Vorschläge zu entsprechenden Intervallen wurden bereits durch Überwachungsgesellschaften gemacht [7].

**End-of-life (Abbruchkriterium)**

Das ASME-Regelwerk sieht für das zulässige Risswachstum zwei Abbruchkriterien der Lebensdaueranalyse vor, die miteinander konkurrieren:

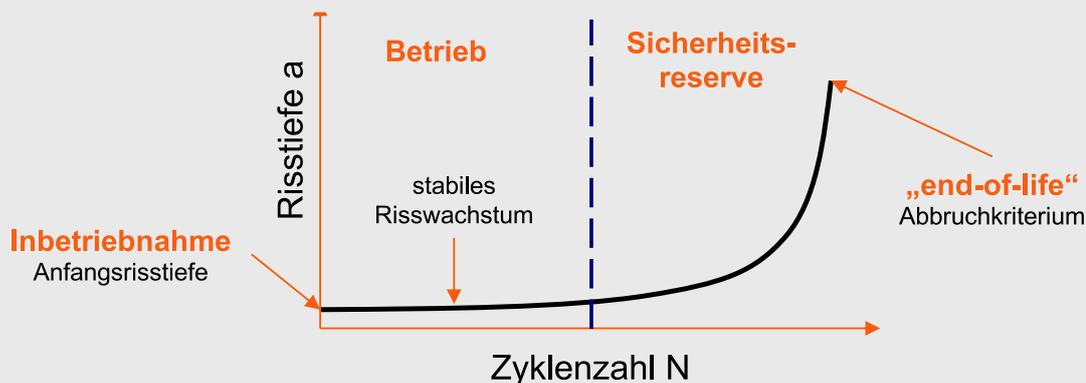
- » Das Erreichen einer bestimmten Risstiefe ( $0,25 \times$  Wanddicke)
- » Das Erreichen einer bestimmten Spannungsintensität ( $55 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

Das durch das Risswachstum zuerst erreichte Kriterium gibt das Ende der Lebensdauer vor.

Denkbar ist auch, der kritischen Spannungsintensität die tatsächliche Bruchzähigkeit  $K_{Ic}$  des Werkstoffes entgegen zu setzen. Diese wird nach Prüfnormen wie ASTM E399, ASTM E1820 oder ISO 12135 [8-10] ermittelt. Darin wird eine Versuchsführung mit konstant steigender Kerbaufweitung bis zum Probenversagen beschrieben.

Um den in die Auslegung eingehende Spannungsintensität von  $55 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  abzusichern, muss nach ASME B31.12 eine umfangreiche Prüfung des Werkstoffes auf  $K_{Ih}$  durchgeführt werden.  $K_{Ih}$  repräsentiert den Schwellenwert für die eingehende Spannungsintensität in Wasserstoff. Spannungsintensitäten unterhalb von  $55 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  sind daher zulässige Belastungen. Die Versuchsführung und Kennwertermittlung soll nach ASTM E1681 [11] erfolgen. ASME BPVC Sec. VIII Div 3 [12] beschreibt die Randbedingungen für eine Prüfung in Druckwasserstoff und gibt je nach Prüfmethode weitere Bedingungen für die Berechnung von  $K_{Ih}$  vor.

ASME BPVC Sec. VIII Div 3 zeigt Unterschiede hinsichtlich Prüftechnik, Lastaufbringung und Durchführung von Parallelversuchen auf. Oftmals wird  $K_{Ih}$  mit der „constant displacement“- anstelle der „constant load“-Methode ermittelt. Während bei „constant displacement“ die Last über eine konstante Kerbaufweitung der Probe aufgebracht wird, bedeutet das Einstellen einer konstanten Last z. B. das Anhängen eines Gewichtes an die Probe. In der Praxis kann das jedoch



**Bild 1:** Schema der Lebensdaueranalyse

**Tabelle 1:** Parameter der Lebensdauerberechnungen

Fall	Rohrmaße		Inbetriebnahme			Betrieb				„end-of-life“	kritische Fehlergröße		Zyklenzahl (***)	
	OD	WT	zfp	a <sub>0</sub>	2c <sub>0</sub>	da/dN	P	% SMYS	R-Wert	K <sub>IH</sub>	a <sub>crit</sub>	2c <sub>crit</sub>	N <sub>crit</sub>	N <sub>design</sub>
i	mm	mm	-	mm	mm	-	bar	-	-	MPa√m	mm	mm	-	-
1	406,4	8	N10	0,8	50	B31.12	85	50%	0,5	55	4,56	50,10	48.450	24.200
2	406,4	8	N10	0,8	50	B31.12	85	50%	0,7	55	4,79	50,10	711.800	355.800
3	406,4	8	N5	0,4	50	B31.12	85	50%	0,5	55	4,59	50,10	219.150	109.550
4	406,4	8	N10	0,8	25	B31.12	85	50%	0,5	55	6,43	27,03	67.800	33.800
5	406,4	8	N5	0,4	50	GW X60 *)	85	50%	0,5	55	4,66	50,12	354.600	177.250
6	406,4	8	N5	0,4	50	SG X60 *)	85	50%	0,5	55	4,63	50,16	328.250	164.100
7	1422	21,5	N5	1,08	50	B31.12	90	60%	0,5	55	8,31	50,80	10.120	5.055
8	1422	21,5	N5	1,08	50	GW X70 **)	90	60%	0,5	55	8,32	50,45	14.825	7.410
9	1422	21,5	N5	1,08	50	SG X70 **)	90	60%	0,5	55	8,27	51,32	21.730	10.860

\*) Rissfortschrittsparameter für X60 von Mannesmann Line Pipe ermittelt, 100 % H<sub>2</sub>

\*\*\*) Rissfortschrittsparameter für X70 von Europipe ermittelt, 100 % H<sub>2</sub>

\*\*\*) Eigenspannungen nicht berücksichtigt

zu Schwierigkeiten führen, da beim Auflegen des Gewichts bereits kleine Schwankungen der Last zu Ungenauigkeiten führen können. Die Prüfung in Druckwasserstoff erfordert weitere Randbedingungen, die die „constant load“-Methode weiter erschweren. Das „Aufspannen“ der Proben bedarf hingegen verhältnismäßig geringem Aufwand. Zudem können mit „constant displacement“ viele Parallelversuche durchgeführt werden. In Hinblick auf die große Probenzahl für eine Qualifizierung bei Prüfzeiten von 1.000 Stunden bietet „constant displacement“ folglich Vorteile.

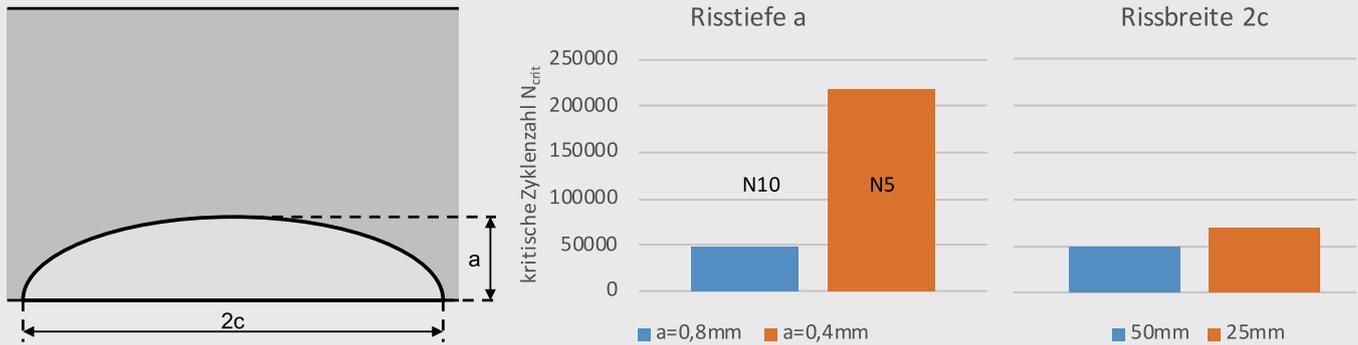
Dennoch birgt diese Methode gerade aufgrund ihres Pragmatismus auch Nachteile. So wird bei fehlendem Risswachstum nur eine Wahr/Falsch-Aussage hinsichtlich der Mindestanforderung von 55 MPa√m nach ASME B31.12 generiert. Zusätzlich verlangt ASME BPVC Sec. VIII Div 3 für „constant displacement“ dann eine Halbierung des aufbrachten Wertes. Um folglich ein Rohrmaterial mit einem K<sub>IH</sub> Wert von 55 MPa√m zu qualifizieren, werden die Proben so vorbereitet, dass das aufbrachte „displacement“ einem Wert von 110 MPa√m entspricht.

Ein tatsächlicher Materialkennwert wird mit dieser Methode nur erzeugt, wenn ein Riss wächst und aufgrund der Teilentlastung der Probe stoppt. ASTM E1681 schlägt daher vor, Versuche nahe des tatsächlichen Kennwertes durchzuführen, was einen großen Umfang an Proben bei unterschiedlich großem „displacement“ notwendig macht.

Für einen gültigen K<sub>IH</sub> Wert muss nach ASTM E1681 eine Mindestprobendicke erfüllt sein, um die plastische Zone an der Risspitze im Verhältnis zur Probengröße klein zu halten und so den notwendigen Spannungszustand einzustellen. Dieser ist abhängig von der Festigkeit des Werkstoffs und der angelegten Spannungsintensität. Je höher K<sub>IH</sub> und je niedriger die Streckgrenze ist, desto größer muss auch die Probe sein. Mit der „constant displacement“-

Methode und dem damit verbundenen Mindestwert von 110 MPa√m berechnet sich die Probendicke beispielsweise bei der Güte L415 auf 177 mm und bei L485 auf 130 mm, was sich prüftechnisch bei üblichen Pipeline-Rohrwanddicken zwischen 5 mm und 35 mm nicht realisieren lässt. ASME BPVC Sec. VIII Div. 3 begegnet diesem Problem, indem es für einen gültigen K<sub>IH</sub> Wert statt des Dickenkriteriums aus ASTM E1681 eine Probendicke von > 85 % der Rohrwand definiert. Dadurch repräsentiert K<sub>IH</sub> ausschließlich den Schwellenwert für die Spannungsintensität eines Materials in einer Wanddicke. Eine Übertragung auf andere Wanddicken ist nicht möglich und müsste ggf. neu qualifiziert werden.

Die „constant load“-Methode lässt mit einem Test auf 55 MPa√m ebenfalls nur eine Wahr/Falsch-Aussage zu, ohne einen Materialkennwert zu erzeugen und verletzt ebenfalls das Dickenkriterium, so dass auch in diesem Fall keine Übertragung auf andere Wanddicken möglich ist. Eine tatsächliche Kennwertermittlung von K<sub>IH</sub> bietet die ISO 1114-4 [13]. Proben werden hier samt Druckbehälter bspw. in einer servohydraulischen Prüfmaschine eingespannt. Die Probe wird in Druckwasserstoff einer konstanten Last ausgesetzt, die schrittweise gesteigert wird. Die Wartezeit nach jedem „step-wise load increase“ ist mit 20 Minuten so gewählt, dass Rissfortschritt mittels Messung des elektrischen Potentials detektierbar ist. Nach der Wartezeit wird die aufbrachte Last um 1 MPa√m erhöht. Als Startwert darf die Hälfte eines Kennwertes aus Voruntersuchungen genutzt werden. Für bspw. 110 MPa√m kann demnach mit einem Wert von 55 MPa√m gestartet werden. Sofern der tatsächliche Kennwert bei 110 MPa√m liegt, dauert der Versuch also ca. 19 Stunden pro Probe. Der Vorteil der tatsächlichen Kennwertermittlung steht folglich dem Nachteil einer für prüftechnische Verhältnisse sehr langen Prüfdauer gegenüber.



**Bild 2** links: Einfluss der zFP-Prüfung (N10 in blau; N5 in orange) auf die kritische Zyklenzahl (Fall 1 und 3), Mitte: Einfluss der Rissbreite 2c auf die kritische Zyklenzahl (Fall 1 und 4); rechts: schematische Darstellung der Fehlerdefinition

Bruchmechanische Kennwerte basierend auf ASTM E399, ASTM E1820 und ISO 12135 bieten den klassischen Ansatz für die Bestimmung eines Abbruchkriteriums für bruchmechanische Lebensdaueranalysen. Die Bruchzähigkeit  $K_{IC}$  in Druckwasserstoff wird ermittelt, indem eine Probe bei monoton steigender Kerbaufernung zerstörend geprüft wird. Voraussetzung zur Bestimmung der Bruchzähigkeit ist allerdings ein vornehmlich sprödes Materialverhalten. Rohrleitungsstähle zeichnen sich jedoch durch ihre Duktilität aus, was zur Kennwertermittlung zu berücksichtigen ist. In diesem Fall bietet sich der  $K_{JIC}$  Wert an. Diese Methode wurde bereits angewendet [14] und birgt großes Potential für eine realistische Kennwertermittlung für das Rohrleitungsdesign, da tatsächliche Kennwerte ermittelt werden können und Prüfzeiten gegenüber einer 1.000-stündigen Auslagerung wie bei der Bestimmung von  $K_{IH}$  eingespart werden. Gerade im Fall einer zeitkritischen Qualifizierung eines Rohrleitungs-materials ist daher  $K_{JIC}$  zu bevorzugen. Die Salzgitter Man-nesmann Forschung GmbH (SZMF) widmet sich derzeit dem Aufbau verschiedener Prüfeinrichtungen für die genannten Kennwerte, da je nach Notwendigkeit, Bedarf und Aussagekraft alle Prüfmethoden ihre Berechtigung haben.

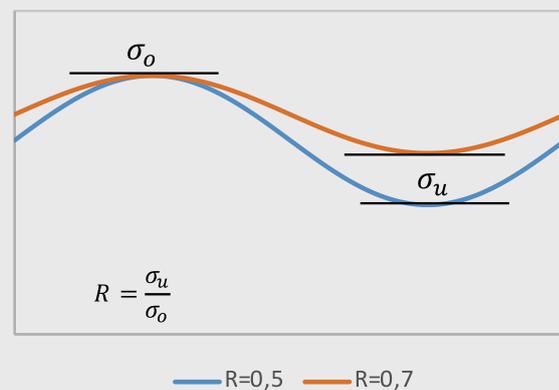
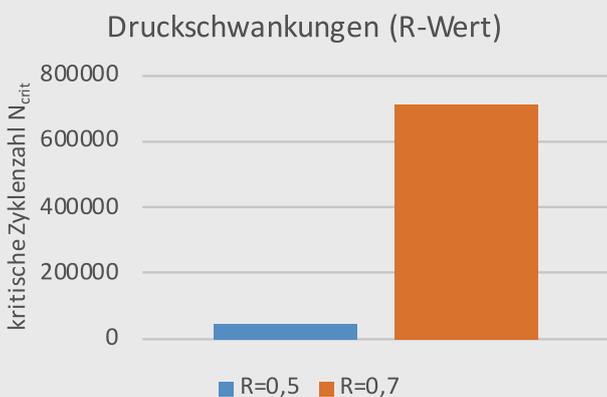
### Einflussfaktoren auf die Lebensdauer

Anfangsrisstiefe, Betriebsbedingungen, Rissfortschrittsgeschwindigkeit und Abbruchkriterium haben unterschiedlich starke Auswirkungen auf die Lebensdauer. SZMF hat in einer Parameterstudie relevante Größen exemplarisch für Rohrwerkstoffe von Mannesmann Line Pipe und Europipe für übliche Rohrgeometrien untersucht. Alle Parameter zu Berechnungen der kritischen Lebensdauer für das Design nach ASME BPVC Sec VIII Div 3 KD-412 [14] sind in **Tabelle 1** aufgeführt. Die Kriterien zur Bestimmung der Designlebensdauer sind in Gleichungen (1) und (2) beschrieben.

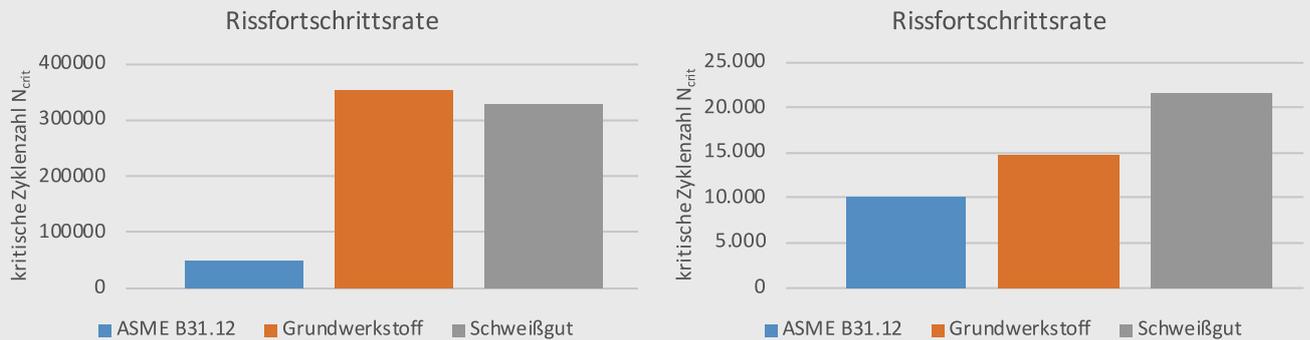
$$a_{design} = MIN[0,25 \cdot \text{Wanddicke}; 0,25 \cdot a_{crit}] \quad (1)$$

$$N_{design} = [N@ a_{design}; 0,5 \cdot N_{crit}] \quad (2)$$

**Bild 2** zeigt schematisch den Einfluss von Anfangsrisstiefe  $a_0$  und -breite  $2c_0$  bei Inbetriebnahme. Während eine Halbierung der Anfangsrisstiefe  $a_0$  von 0,8 mm auf 0,4 mm mehr als eine Vervierfachung der kritischen Zyklenzahl nach sich zieht, steigert sie sich bei einer Halbierung der Anfangsrisbreite  $2c_0$  von 50 mm auf 25 mm um die Hälfte.



**Bild 3** links: Auswirkungen von Druckschwankungen auf die kritische Zyklenzahl (Fall 1 und 2), rechts: schematische Darstellung der R-Wert Definition



**Bild 4** links: Auswirkungen der Rissfortschrittsrate nach ASME B31.12 (blau), X60 Grundwerkstoff (orange) und X60 Schweißgut (grau) des Rohrwerkstoffes von Mannesmann Line Pipe (Fall 1, 5 und 6); rechts: Auswirkungen der Rissfortschrittsrate nach ASME B31.12 (blau), X70 Grundwerkstoff (orange) und X70 Schweißgut (grau) des Europipe Rohrwerkstoffes (Fall 7, 8 und 9)

**Bild 3** zeigt den Einfluss von Druckschwankungen. Druckschwankungen werden als R-Wert, dem Verhältnis der Unter- zur Oberlast, ausgedrückt. Für die exemplarischen Rechnungen wurde der R-Wert mit 0,5 und 0,7 gewählt. Die maximale Spannung geht aus dem Betriebsdruck hervor. Mit  $R=0,5$  und einem maximalen Druck von  $p=85$  bar ergibt sich  $\Delta p=42,5$  bar, während bei  $R=0,7$  Druckschwankungen von  $\Delta p=25,5$  bar vorliegen. Ein R-Wert von 0,5 entspricht den ASME-gemäßen Laborbedingungen zur Ermittlung der Rissfortschrittsraten. Druckschwankungen in Rohrleitungen sind geringer und werden hier exemplarisch mit einem Wert von 0,7 angenommen, was näher an den üblichen Betriebsbedingungen liegt. Die kritische Zyklenzahl ist für  $R=0,7$  ca. 14-mal höher. Je geringer die Druckschwankungen sind, desto größer ist die erwartete Lebensdauer.

**Bild 4** links zeigt den Einfluss der Rissfortschrittsrate auf die kritische Zyklenzahl für eine typische Rohrabmessung von Mannesmann Line Pipe bei Betriebsbedingungen von 85 bar. Die Ergebnisse basierend auf den in der ASME B31.12 gegebenen „upper bound“-Parametern sind in blau abgebildet. Die Verwendung der Rissfortschrittsparemeter für Grundwerkstoff (orange) und Schweißnaht (grau) des verwendeten X60 zeigt eine Versiebenfachung für den Grundwerkstoff und eine Versechsfachung der Lebensdauer für die Schweißnaht. Bild 4 rechts zeigt den Einfluss der Rissfortschrittsrate auf die kritische Zyklenzahl für eine typische Rohrabmessung von Europipe bei Betriebsbedingungen von 90 bar. Nach den ASME B31.12 „upper bound“-Parametern ergeben sich ca. 10.000 Lastwechsel. Mit Verwendung der Parameter für Grundwerkstoff und Schweißgut eines X70 wird die kritische Zyklenzahl verandert halbfacht bzw. verdoppelt. Unterschiede in der kritischen Zyklenzahl beider Rechenbeispiele sind auf die Unterschiede der Rohrabmessungen und die Auslastung der Streckgrenze (SMYS 50 % und 60 %) zurückzuführen. **Tabelle 1** führt alle Parameter der Berechnungen, die kritischen Zyklenzahlen und die Design-Zyklenzahlen auf. Bei einem Abbruchkriterium von  $K_{IH} = 55 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  und einem Innendruck von 85 bar ergibt sich eine kritische Fehlertiefe

$a_{crit}$ , bei der weniger als 50 % der Wanddicke trägt. Solche Fehlertiefen werden in der Regel nicht erreicht, da sie bei regelmäßiger Inspektion detektiert und repariert werden können.

- Aus der Parameterstudie leiten sich folgende Punkte ab:
- » Die Anfangsrisstiefe beeinflusst stark die Lebensdauer der Rohrleitung. Sowohl Mannesmann Line Pipe als auch Europipe nutzen daher bei der US-Prüfung eine Kalibrierung an einer N5-Kerbe, um den Rohrwerkstoff für  $H_2$ -Anwendungen abzusichern.
  - » Druckschwankungen nehmen maßgebenden Einfluss auf die Rohrleitung und sollten für eine langlebige Leitung gering gehalten werden (R-Wert nahe 1).
  - » ASME B31.12 gibt eine „upper bound“-Rissfortschrittsrate vor und ist entsprechend konservativ. Mannesmann Line Pipe und Europipe haben jeweils Rissfortschrittsraten ihrer H2ready®-Rohrwerkstoffe bestimmen lassen, um eine bessere Ausnutzung der Rohre und deren Lebensdauer zu ermöglichen. Wird diese in die Lebensdauerberechnung eingebracht, lässt sich die Einsatzdauer signifikant verlängern.

### Schlussfolgerungen

Für eine gute bruchmechanische Lebensdauer vorhersage für Rohre, die Wasserstoff transportieren sollen, werden sinnvolle Regelwerksvorschriften und verlässliche Inputdaten benötigt. Regelwerke wie ASME B31.12 und DVGW G 463 geben gute Grundlagen für eine konservative Abschätzung der Lebensdauer. Inputdaten wie z. B. die Anfangsrisstiefe müssen realistisch abgeschätzt werden und das Werkstoffverhalten in Wasserstoffatmosphäre verifiziert werden. Für die Verifikation ist die Festlegung charakteristischer Kennwerte nötig, die in sinnvollen Versuchen ermittelt werden müssen. Kennwerte wie  $K_{IH}$ ,  $K_{IC}$  und  $K_{JIC}$  stehen zur Verfügung und sind in der genannten Reihenfolge aufwändiger zu bestimmen, aber auch aussagekräftiger. Die Vorschriften aus den Regelwerken erlauben, Parameterstudien über Anfangszustand, Betriebsverhalten und Ver-

sagen durchzuführen. Ein Rohr mit üblichen Abmessungen für den Betrieb im Hochdruckbereich bei 85 bar erreicht Zyklenzahlen im mittleren 10.000-Bereich. Ein Großrohr im Hochdruckbereich bei 90 bar erreicht mehr als 10.000 Zyklen. Diesen Berechnungen liegen Anfangsrisstiefen mit der Größe des Ultraschall-Kalibrierungsfehlers und Belastungen mit 50 % Druckschwankungen zu Grunde. Durch eine Halbierung der Anfangsrisstiefe lässt sich die zulässige Zyklenzahl auf das Vierfache erhöhen; eine Verringerung der Druckschwankungen von 50 % auf 30 % führt zu 14-facher Zyklenzahl. Die genannten Normen geben für die Lebensdauerberechnung eine lastabhängige Rissfortschrittsgeschwindigkeit vor. Wird statt dieser eine an dem Werkstoff in Versuchen bestimmte Rissfortschrittsgeschwindigkeit eingesetzt, verdoppelt bis verdreifacht sich die Lebensdauer.

Um ihre Werkstoffe in Wasserstoff einsetzen zu können, haben Europipe und Mannesmann Line Pipe Versuchsprogramme aufgesetzt, in denen sie die Rissfortschrittsgeschwindigkeiten und die Bruch-/Risszähigkeit ihrer Werkstoffe in Wasserstoff bestimmen. Die SZMF beschäftigt sich mit dem Aufbau der H<sub>2</sub>-Kompetenz und dem Ausbau ihrer Wasserstoff-Prüfkapazitäten. Mit diesen Maßnahmen werden die Unternehmen dafür gerüstet sein, Antworten zur Sicherheit des Wasserstofftransports durch Pipelines geben zu können.

## Literatur

- [1] Hydrogen Council (2020). "Path to hydrogen competitiveness - A cost perspective"
- [2] ASME B31.12 (2019), "ASME B31.12-2019 Hydrogen Piping and Pipelines" The American Society for Mechanical engineers, New York, USA
- [3] DVGW G 463 Entwurf „Gashochdruckleitungen aus Stahlrohren für einen Auslegungsdruck von mehr als 16 bar; Errichtung“ (2021-02)
- [4] BS7910 "Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures" (2013)
- [5] ASTM E647-15e1 "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates" (2015)
- [6] Slifka AJ, et.al. (2018) "Fatigue Measurements of Pipeline Steels for the Application of Transporting Gaseous Hydrogen". J Press Vess Techn, Vol. 140, pp. 011407-01-011407-12
- [7] Nanninga NE, et.al. (2012) "Comparison of hydrogen embrittlement in three pipeline steels in high pressure gaseous hydrogen environments". Corros Sci, Vol. 59, pp. 1-9
- [8] Moro I, et.al. (2010). "Hydrogen embrittlement susceptibility of a high strength steel X80". Mater Sci Eng A, Vol. 527, pp 7252-7260
- [9] Steinbock J (2021). "Der bruchmechanische Lebensdauernachweis – ein wesentlicher Baustein des Sicherheitskonzeptes für den Betrieb mit Wasserstoff". IRO Seminar Wasserstoff 2021, April 15-16, Oldenburg, Germany
- [10] ASTM E399-12e3, "Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K<sub>IC</sub> for Metallic Materials" (2012)
- [11] ASTM E1820-20e1 "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness" (2020)
- [12] ISO 12135 "Metallic Materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness" (2016)
- [13] ASTM E1681-03 "Standard Test Method for Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials" (2013)
- [14] ASME BPVC "ASME BPVC Section VIII Division 3. Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels" (2013)
- [15] ISO 11114-4 (E) "Transportable gas cylinders – Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents – Part 4: Test methods for selecting metallic materials resistant to hydrogen embrittlement" (2017)
- [16] Marewski, U, et.al. (2020) "Bruchmechanische Prüfungen von Werkstoffen für Gasleitungen zur Bewertung der Wasserstofftauglichkeit: Erste Ergebnisse", 3R (2020) Nr. 10-11, S. 34-41

**SCHLAGWÖRTER:** Wasserstoff, H<sub>2</sub>, Stahlrohre, Bruchmechanik

## AUTOREN



Dr.-Ing. **GEORG GOLISCH**  
Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH,  
Duisburg  
Tel. +49 203 999-3223  
g.golisch@du.szmf.de



Dr. Ing. **CHRISTOPH KALWA**  
Europipe GmbH, Mülheim  
Tel. +49 208 976 4823  
christoph.kalwa@europipe.com



Dr.-Ing. **HOLGER BRAUER**  
Mannesmann Line Pipe GmbH, Hamm  
Tel. +49 2381 420-447  
holger.brauer@mannesmann.com

+++ WWW.3R-ROHRE.DE +++