

🌐 www.dvgw-forschung.de

Begrenzung des Anwendungsbereiches für bruchmechanische Bewertungen von Gasleitungen nach DVGW G 464

Kurzfassung

Dr. Ulrich Marewski

Open Grid Europe GmbH, Essen

Tillmann Wiegold

Open Grid Europe GmbH, Essen

Herausgeber

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.

Technisch-wissenschaftlicher Verein

Josef-Wirmer-Straße 1-3

53123 Bonn

T +49 228 91885

F +49 228 9188990

info@dvwg.de

www.dvgw.de

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. **Begrenzung des Anwendungsbereiches für bruchmechanische Bewertungen von Gasleitungen nach DVGW G 464**

Kurzfassung

September 2024

DVGW-Förderkennzeichen G 202333

1 Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit dem Neubau oder der Umstellung von Gashochdruckleitungen ist entsprechend dem DVGW-Regelwerk - abhängig von der Auslegung und den verwendeten Werkstoffen - der Nachweis der Tauglichkeit der verwendeten Werkstoffe im Rahmen von umfangreichen bruchmechanischen Untersuchungen zu erbringen. Dies gilt aktuell sowohl für den Hochdruckbereich als auch formal für den Niederdruckbereich. Um den bisher erforderlichen Prozess zu vereinfachen, wurde vom DVGW das Forschungsprojekt BAG464 initiiert, dessen Ziel es war, eine Abgrenzung für die sinnvolle Anwendung der bruchmechanischen Bewertung zu identifizieren.

Im Rahmen des durchgeführten Projektes wurden für typische Auslegungsparameter, sowohl für das Verteilnetz als auch für das Transportnetz, bruchmechanische Bewertungen durchgeführt. Die Untersuchungen identifizieren einen Bereich, in dem - unter Berücksichtigung konservativer Randbedingungen - bruchmechanische Bewertungen keinen Mehrwert für die sichere Auslegung der Rohrleitungen erbringen.

Der identifizierte Bereich erfüllt mehrere Kriterien zur sicheren Auslegung und zeigt, dass insbesondere im für einen maximal zulässigen Betriebsdruck (MOP) $p \leq 16$ bar eine bruchmechanische Bewertung nur in sehr seltenen Ausnahmefällen durchgeführt werden muss. Bei $MOP\ 12\ bar < p \leq 16\ bar$ sind bis einschließlich DN 200 ebenfalls keine bruchmechanischen Bewertungen erforderlich. Für größere Durchmesser sind Einzelfallbetrachtungen durchzuführen. Unterhalb von $MOP\ p \leq 12\ bar$ sind bei Einhaltung der beschriebenen Randbedingungen - auch unabhängig von dem Rohraußendurchmesser und Stahlwerkstoff - grundsätzlich keine bruchmechanischen Bewertungen erforderlich.

Für Gashochdruckleitungen mit $MOP\ p > 16\ bar$ kann demgegenüber nur in wenigen Ausnahmefällen auf eine bruchmechanische Bewertung verzichtet werden. Diese Ausnahmefälle beschränken sich auf kleinere Rohrdurchmesser und/oder kleinere MOP.

2 Aufgabenstellung

Für den Bau und Betrieb von Gashochdruckleitungen wurden die DVGW-Regelwerke G 409 [1] (Umstellung von bestehenden Gashochdruckleitungen), G 463 [2] (Neubau), G 466-1 [3] (Instandhaltung und Betrieb) auf den Transport mit dem Medium Wasserstoff angepasst. Insbesondere für die betroffenen Rohrleitungen wurden hierbei bruchmechanische Bewertungen bzw. Berechnungen eingeführt, die das möglicherweise durch den Wasserstoff veränderte Materialverhalten berücksichtigen. Durch das inzwischen abgeschlossene DVGW-Projekt SyWeSt H2 [4] gelang es, die prinzipielle Eignung der üblicherweise verwendeten Rohrleitungsstähle nachzuweisen. In dem DVGW-Merkblatt G 464 [5] wurden diese Erkenntnisse bereits implementiert und das bruchmechanische Sicherheitskonzept spezifiziert.

Die beschriebene Vorgehensweise zielt jedoch insbesondere auf den Betrieb von Gashochdruckleitungen mit Drücken MOP > 16 bar ab. Eine klare Abgrenzung zu Leitungen mit kleinerem Druck und/oder geringer Auslastung ist bisher nicht erfolgt und führt zunehmend zu Unsicherheiten. Darüber hinaus würden die beschriebenen Prozesse - insbesondere für Verteilnetze - zu einem unverhältnismäßig hohen und auch unnötigen Aufwand im Rahmen von Umstellungsprozessen führen.

Im Rahmen dieses Projekts wird untersucht, unter welchen Bedingungen bei dem Transport mit Wasserstoff bruchmechanische Bewertungen an Rohren erforderlich werden. Dazu werden im Rahmen des Projekts die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Ab welchem Wasserstoffpartialdruck sind hinsichtlich der Integrität relevante Auswirkungen zu erwarten?
- Kann auch für Werkstoffgüten > L360 ggf. auf eine bruchmechanische Bewertung verzichtet werden?
- Kann für Gashochdruckleitungen > 16 bar unter beschreibbaren Randbedingungen eine bruchmechanische Bewertung entfallen?
- Ist eine bruchmechanische Bewertung für Verteilnetze ≤ 16 bar oder niedrige Wasserstoffpartialdrücke weitestgehend verzichtbar?
- Unterhalb welchem MOP kann grundsätzlich eine bruchmechanische Bewertung entfallen?

Die Durchführung der bruchmechanischen Bewertung ergibt in vielen Fällen - vor allem im Druckbereich $p \leq 16$ bar - , dass die Rohrleitung eine größere Anzahl zulässiger Lastwechsel liefert, als realistisch auftreten werden. Die bruchmechanische Bewertung wird als nicht notwendig betrachtet, wenn eine Mindestzahl an Lastwechseln N_{safe} bei der bruchmechanischen Bewertung erreicht wird $N_{crit} \geq N_{safe}$.

- Im Druckbereich $p \leq 16$ bar wird $N_{safe} = 100\,000$ angesetzt. Dies deckt mehr als 2 Volllastwechsel pro Tag für 100 Jahre ab. $2 \text{ Volllastwechsel/Tag} * 365 \text{ Tage/Jahr} * 100 \text{ Jahre} = 73\,000 \text{ Volllastwechsel}$.
- Da davon auszugehen ist, dass im Hochdruckbereich ($p > 16$ bar) weniger Druckwechsel stattfinden, wird $N_{safe} = 50\,000$ angesetzt. Dies deckt immer noch mehr als 1 Volllastwechsel pro Tag über 100 Jahre ab.

3 Untersuchte Werkstoffe

Im Rahmen des Projektes wurden die bruchmechanischen Bewertungen für eine Vielzahl von Rohrwerkstoffen durchgeführt. Eine Auflistung aller berücksichtigten Werkstoffe ist in der Tabelle 1 gegeben. Die betrachteten Werkstoffe repräsentieren einen großen Bereich der typischen Rohrstähle, welche sowohl im Verteil-, als auch im Transportnetz eingesetzt werden. Zur klareren Darstellung der bruchmechanischen Bewertung werden die Werkstoffe in Gruppen unterteilt, welche in den Ergebnissen referenziert werden.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die nachfolgende Tabelle lediglich einen repräsentativen Überblick über die eingesetzten Stahlsorten liefern soll. Ergänzend zu den aufgelisteten Rohrstählen können weitere - in den relevanten Normen zugelassene Stähle - auf Grundlage ihrer Streckgrenze den aufgelisteten Gruppen zugefügt werden, soweit die mechanisch-technologischen Kennwerte den hier aufgeführten Werkstoffen entsprechen.

Gruppe 1 $235 \leq R_t \leq 245$		Gruppe 2 $245 < R_t \leq 290$	Gruppe 3 $290 < R_t \leq 360$		Gruppe 4 $360 < R_t \leq 415$	Gruppe 5 $415 < R_t \leq 485$	Gruppe 6 $485 < R_t \leq 555$
E235	RST 35.29	API 5L x42	API 5L X46	P355 NL2	API 5L X56	API 5L X60	GRS 550
L235GA	RST 35.3	L290	API L X52	RST 43.7	L415	API 5L X65	GRS 550 TM
L245	RST 37.2	L290 ME	L320	RST 47.7	L415 MB	API 5L X70	GRS 555 TM
L245 MB	RST 38.7	L290 NB	L360	S355 J2G3	L415 ME	GRS X70	L555
L245 ME	S235 JRG2	L290 NE	L360 MB	S355 N	L415 NE	L450	L555 ME
L245 N	ST 34	P250 GH	L360 ME	ST 360.7	ST 56.7	L485	
L245 NB	ST 35	P265 GH	L360 N	ST 43.7	ST 60.7	L485 MB	
L245 NE	ST 35.29	P275 NL	L360 NB	ST 47.7	STE 385.7	L485 ME	
MRST 34	ST 35.56	P275 NL1	L360 NE	ST 52.3	STE 415.7	P460 N	
MRST 34.2	ST 35.8/I	P275 NL2	L360 QE	ST 53.7	X 56	P460 NH	
MRST 35	ST 35b	STE 270.7	MRST 43.7	STE 320.7		P460 NL1	
MRST 37	ST 35b-2 C	STE 290.7	MST 52.3	STE 360.7		P460 NL2	
MRST 37.2	ST 37	X42	MST 52.7			PS X70	
MST 35.29	ST 37.0		P355 N			ST 70.7	
P235 GH	ST 37-2		P355 NH			STE 480.7	
P235 TR1	ST 38.7		P355 NL			X 60	
RST 35	STE 240.7		P355 NL1			X 70	

Tabelle 1: Liste der betrachteten Werkstoffe

4 Ergebnisse der bruchmechanischen Bewertung

Mit dem Ziel einen Parameterbereich zu identifizieren, in dem bei der Auslegung einer Rohrleitung keine bruchmechanische Bewertung mehr notwendig ist, wurden zahlreiche bruchmechanische Bewertungen durchgeführt. Dabei wurden Nenndurchmesser, MOP, Werkstoff und initiale Risstiefe (im Hochdruckbereich) 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. Diese wird im Niederdruckbereich nach DVGW-Arbeitsblatt G 462 [6] in Kombination mit DIN EN 12007-3 [7] und dem Sicherheitsbeiwert $S_0 = 2,22$ bestimmt. Zusätzlich wurde für Anlagen die Mindestwanddicke nach DVGW-Arbeitsblatt G 491 [8] in Kombination mit DIN 30690-1 [9] bestimmt. Im Hochdruckbereich wird die Mindestwanddicke nach DVGW-Arbeitsblatt G 463 [2] in Kombination mit DIN EN 1594 [10] und einem Sicherheitsbeiwert $S_0 = 1,6$ bestimmt.

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

Für die bruchmechanische Bewertung für MOP $p \leq 16$ bar erfolgt die Berechnung der Mindestwanddicke auf Grundlage des DVGW-Arbeitsblattes G 462. Rohrleitungen, welche gemäß des DVGW-Arbeitsblatt G 462 verwendet werden, müssen den Anforderungen der DIN EN 12007-3 entsprechen.

Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 zeigen die Auswertung der bruchmechanischen Bewertungen als Darstellung des Rohrdurchmessers über der Druckstufe. In diesen Abbildungen wird eine initiale Risstiefe von $a_0 = 20$ %, respektive $a_0 = 35$ % berücksichtigt. Während in der Abbildung 4.2 von einer Beimischung von 30 % Wasserstoff (z.B. im Erdgas) ausgegangen wird, berücksichtigt die Abbildung 4.1 reinen Wasserstoff, d.h. einen Anteil von ca. 100%. Die dargestellte Linie bildet die Grenze, an der die bruchmechanische Bewertung das Kriterium $N_{crit} \geq N_{safe}$ gerade noch erfüllt. Entsprechend erfüllt eine Auslegung, die zu einer Position unterhalb der eingezeichneten Linie führt, dieses Kriterium und eine bruchmechanische Bewertung führt nicht zu weiteren integritätsrelevanten Erkenntnissen. Die Berechnungen ergaben, dass bei den betrachteten Werkstoffen lediglich marginale Unterschiede für den Druckbereich $p \leq 16$ bar auftraten. Daher sind die Ergebnisse für alle in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgelisteten Werkstoffe anwendbar. Die stufenartige Darstellung in den Abbildungen des Rohrdurchmessers über den Druck ist darauf zurückzuführen, dass der Rohrdurchmesser bei den bruchmechanischen Bewertungen ab DN = 100 in diskreten Intervallen (Schritte von jeweils DN 100) berücksichtigt wurde. Der Vergleich von Abbildung 4.1 mit Abbildung 4.2 zeigt, dass sich der Bereich, für den keine bruchmechanische Bewertung erforderlich ist, für Beimischungen von Wasserstoff vergrößert.

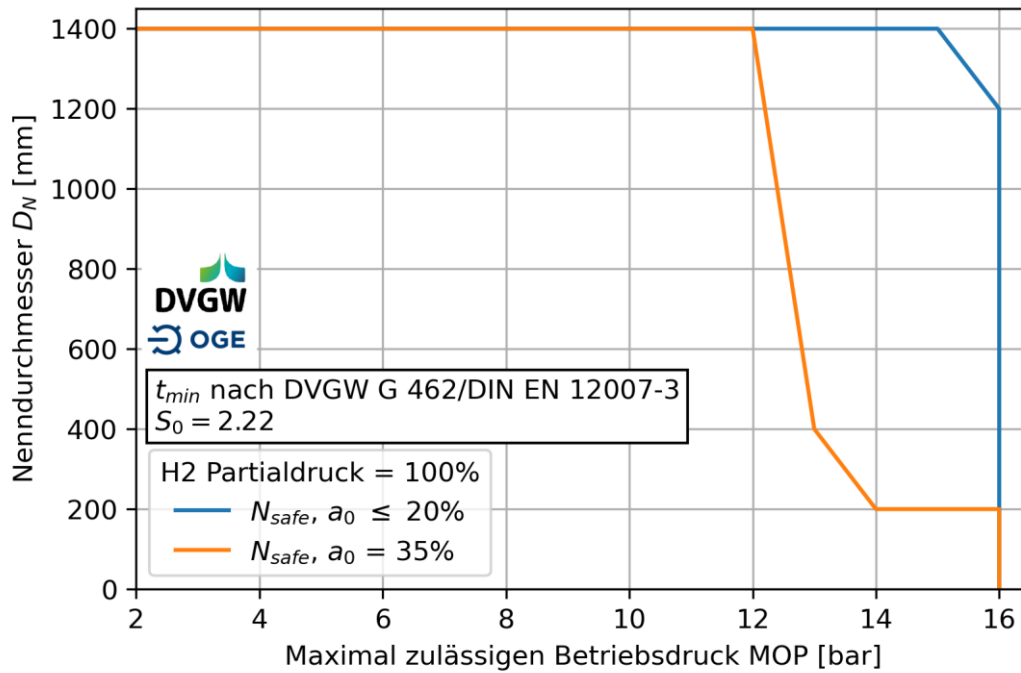


Abbildung 4.1: Darstellung Nenndurchmesser über MOP für $P \leq 16$ bar, $a_0 \leq 20\%$ bzw. $a_0 = 35\%$ und 100% Wasserstoff Partialdruck

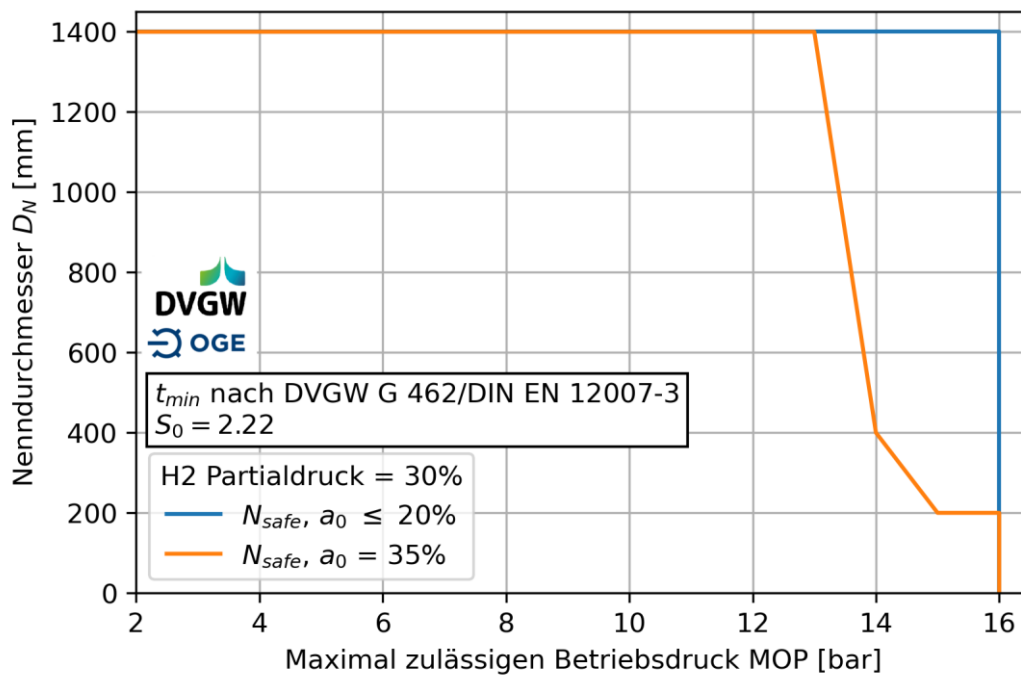


Abbildung 4.2: Darstellung Nenndurchmesser über MOP für $P \leq 16$ bar, $a_0 \leq 20\%$ bzw. $a_0 = 35\%$ und 30% Wasserstoff Partialdruck

4.2 Auslegung für Anlagen nach DVGW-Arbeitsblatt G 491, DIN 30690-1

Für die untersuchten Auslegungsszenarien zeigte sich, dass für $MOP \leq 16$ bar qualitativ vergleichbare Ergebnisse ermittelt wurden, wie bei der Auslegung nach DVGW-Arbeitsblatt G 462. Aufgrund des anzunehmenden dynamischeren Betriebs wurde im Rahmen der bruchmechanischen Bewertung auch für Drücke $p \geq 16$ bar mit einer mindestens zu erreichenden Lastwechselzahl von $N_{safe} = 100\,000$ gerechnet.

4.3 Auslegung nach DVGW-Arbeitsblatt G 463, DIN EN 1594, Hochdruckbereich $P > 16$ bar

Für Rohrleitungen im Transportnetz (Druckbereich $p > 16$ bar) erfolgt die Auslegung gemäß des DVGW-Arbeitsblatt G 463. Dieses gibt einen Mindestsicherheitsbeiwert $S_0 = 1,6$ (Auslastungsfaktor $f_0 = 0,625$) an. Die Berechnung der Mindestwanddicke erfolgt nach DIN EN 1594.

Die Durchführung der bruchmechanischen Bewertung für Gashochdruckleitungen erfolgt analog den voran gestellten Kapiteln. Für den Hochdruckbereich fordern die Regelwerke allerdings zusätzliche Maßnahmen hinsichtlich der Inspektion während des Betriebes, der regelmäßigen Integritätsanalysen und der Fertigung von Rohren. Daher kann eine initiale Risstiefe/Rissgeometrie in vielen Fällen abgeschätzt werden und wird in den nachfolgenden Bewertungen berücksichtigt (siehe auch DVGW-Merkblatt G 464). Die Abbildung 4.3 stellt den Bereich der Nenndurchmesser in Abhängigkeit des MOP dar, in dem das Kriterium für die kritische Lastwechselzahl (N_{safe}) erfüllt wird. Dieses Kriterium ist in dem Bereich unterhalb der eingetragenen Linien erfüllt. Die einzelnen Linien geben dabei unterschiedliche initiale Risstiefen an. Bei einer initialen Risstiefe $a_0 \geq 10\%$ ist der Einfluss des Rohrwerkstoffes auf die erhaltenen Ergebnisse vernachlässigbar.

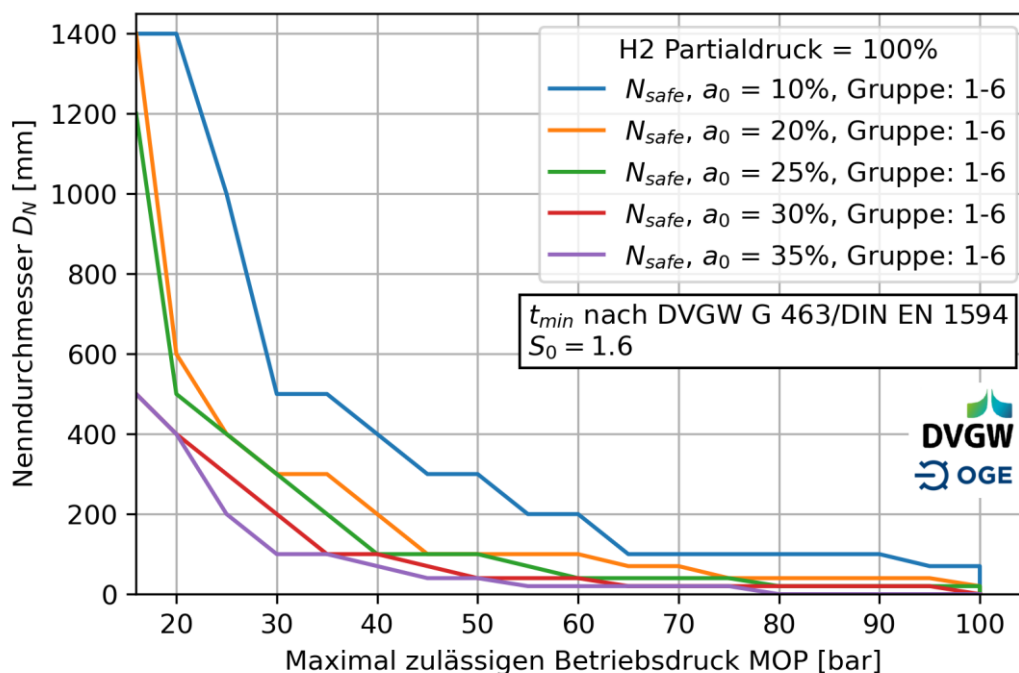


Abbildung 4.3: Darstellung des zulässigen Auslegungsbereichs in Abhängigkeit von der initialen Risstiefe

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen des Projektes BAG464 sollte identifiziert werden, unter welchen Randbedingungen eine bruchmechanische Bewertung entsprechend DVGW-Merkblatt 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 12 bar MOP ist grundsätzlich keine bruchmechanische Bewertung erforderlich; je nach weiteren spezifischen Leitungs- und/oder Betriebsparametern (z.B. Leitungsdurchmesser, Beimischung von Wasserstoff) ist in vielen Fällen sogar bis zu einem MOP 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. Die erhaltenen Ergebnisse unterstützen somit auch sinngemäße Aussagen, die der einschlägigen Literatur (z.B. [11]) entnommen werden können.

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.

In dem durchgeführten Forschungsprogramm wurden somit Randbedingungen identifiziert, unter denen keine bruchmechanische Bewertung entsprechend dem DVGW-Merkblatt G 464 erforderlich ist. Diese basieren auf der Annahme der kleinsten zulässigen Wändicken nach geltendem Regelwerk. Die Ergebnisse geben daher eine sehr konservative Aussage wieder. In vielen Fällen, in denen $N_{crit} < N_{safe}$ ist, besonders in dem Grenzbereich, ist ein sicherer Betrieb auch möglich, welcher in diesen Fällen mit der bruchmechanischen Bewertung nachgewiesen werden kann.

Die Maßnahmen, die für eine Umstellung einer Gashochdruckleitung > 16 bar erforderlich sind, sind in dem DVGW-Merkblatt G 409 beschrieben. Die bruchmechanische Bewertung entsprechend DVGW-Merkblatt G 464 ist in diesem Zusammenhang lediglich eine von mehreren durchzuführenden Maßnahmen. Insbesondere mit Blick auf die Umstellung von Leitungen mit $MOP \leq 16$ bar ist es angebracht, die erforderlichen Maßnahmen für diesen Druckbereich im DVGW-Merkblatt G 407 [12] neu zu definieren, da eine analoge Vorgehensweise entsprechend DVGW-Merkblatt G 409 nicht notwendig ist und daher deutlich zu aufwendig erscheint.

6 Literaturverzeichnis

- [1] *DVGW-Merkblatt G 409: Umstellung von Gashochdruckleitungen aus Stahlrohren für einen Auslegungsdruck von mehr als 16 bar; Planung und Errichtung, 2021.*
- [2] *DVGW-Arbeitsblatt G 463: Gashochdruckleitungen aus Stahlrohren für einen Auslegungsdruck von mehr als 16 bar; Planung und Errichtung, 2021.*
- [3] *DVGW-Arbeitsblatt G 466-1: Gashochdruckleitungen aus Stahlrohren für einen Auslegungsdruck von mehr als 16 bar; Betrieb und Instandhaltung, 2021.*
- [4] *DVGW-Projekt SyWeSt H2: Stichprobenhafte Überprüfung von Stahlwerkstoffen für Gasleitungen und Anlagen zur Bewertung auf Wasserstofftauglichkeit, 2023.*
- [5] *DVGW-Merkblatt G 464: Bruchmechanisches Bewertungskonzept für Gasleitungen aus Stahl mit einem Auslegungsdruck von mehr als 16 bar für den Transport von Wasserstoff, 2023.*
- [6] *DVGW-Arbeitsblatt G 462: Gasleitungen aus Stahlrohren bis 16 bar Betriebsdruck, Errichtung, 2020.*
- [7] *DIN EN 12007-3: Gasinfrastruktur - Rohrleitungen mit einem maximal zulässigen Betriebsdruck bis einschließlich 16 bar - Teil 3: Besondere funktionale Anforderungen für Stahl, 2015.*
- [8] *DVGW-Arbeitsblatt G 491: Gas-Druckregelanlagen für Eingangsdrücke bis einschließlich 100 bar, 2022.*
- [9] *DIN 30690-1: Bauteile in Anlagen der Gasversorgung - Teil 1: Anforderungen an Bauteile in Gasversorgungsanlagen, 2017.*
- [10] *DIN EN 1594: Gasinfrastruktur - Rohrleitungen für einen maximal zulässigen Betriebsdruck über 16 bar - Funktionale Anforderungen, 2013.*
- [11] *Georg Golisch und Holger Brauer: Transport von Wasserstoff in Stahlrohren des Verteilnetzes bis 16 bar, Zeitschrift 3R, 10-11/2021, S. 40-43.*
- [12] *DVGW-Arbeitsblatt G 407: Umstellung von Gasleitungen aus Stahlrohren bis 16 bar Betriebsdruck für die Verteilung von wasserstoffhaltigen methanreichen Gasen und Wasserstoff, 2022.*