

Untersuchungen der Wasserstoffverträglichkeit von Bestandsarmaturen (UKoBaRi H2) Untersuchung von Schweißnähten an Bestands- armaturen unter Wasserstoffatmosphäre (UKoBaRiS H2)

Abschlussbericht

Volker Skrzypczak

DNV – Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Hamburg

Carl Fischer

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg

Igor Varfolomeev

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg

Frank Schweizer

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg

Ken Wackermann

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg

Tomás Freitas

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg



Untersuchungen der Wasserstoffverträglichkeit von Bestandsarmaturen
(UKoBaRi H2)

Untersuchung von Schweißnähten an Bestandsarmaturen unter Wasserstoffatmosphäre
(UKoBaRiS H2)

Abschlussbericht

März 2024

DVGW-Förderkennzeichen G 202108

DVGW-Förderkennzeichen G 202311

Inhaltsverzeichnis

Abschlussbericht G 202108 UKoBaRi H2.....11

Untersuchungen an Konstruktionen von Bestandsarmaturen hinsichtlich
Rissansatzbildung unter Wasserstoff

Abschlussbericht G 202311 UKoBaRiS H2.....140

Untersuchungen des Einflusses von Schweißseigenspannungen in
Bestandsarmaturen auf bruchmechanische Auswirkungen

Untersuchungen der Wasserstoffverträglichkeit von Bestandsarmaturen (UKoBaRi H2)

Abschlussbericht

Volker Skrzypczak

DNV – Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Hamburg

Carl Fischer

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg

Igor Varfolomeev

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg

Frank Schweizer

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg

Ken Wackermann

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg

Tomás Freitas

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg



Untersuchungen der Wasserstoffver- träglichkeit von Bestandsarmaturen (UKoBaRi H2)

Abschlussbericht

Dezember 2022

DVGW-Förderkennzeichen G 202108

Zusammenfassung

Zur Umstellung der Gasinfrastruktur, insbesondere des Fernleitungsnetzes auf einen Betrieb mit Wasserstoff ist es maßgeblich, dass sämtliche Bauteile einer Leitung sicher mit Wasserstoff betrieben werden können. Zu diesen Bauteilen gehören auch Armaturen. Dieses Projekt soll dazu beitragen, Grundlagen für die Qualifizierung von Bestandsarmaturen für den Wasserstofftransport zu schaffen.

Dazu gehörte es, den gültigen Rechtsrahmen abzustecken sowie herauszuarbeiten, welche Normen und Regelwerke maßgeblich sind, insbesondere hinsichtlich der Auslegung von Armaturen. Es konnte festgestellt werden, dass das Energiewirtschaftsgesetz und die Gashochdruckleitungsverordnung den Rahmen für die Umstellung auf und den Betrieb mit Wasserstoff bilden. Zur technischen Umsetzung dieser Vorgaben und um der Vermutung entsprechend Gashochdruckleitungsverordnung gerecht zu werden, dass Errichtung und Betrieb dem Stand der Technik entsprechen, wenn das Regelwerk des DVGW eingehalten wird, wird vorgenanntes Regelwerk an den Betrieb mit Wasserstoff angepasst, so dass zurzeit entsprechende Merk- und Arbeitsblätter existieren, die jedoch noch nicht alle Aspekte detailliert abbilden. Offen ist insbesondere die Fragestellung nach dem Integritätsnachweis von Bestandsarmaturen unter bruchmechanischen Gesichtspunkten.

Die durchgeführte Literaturrecherche gibt Auskunft über mögliche Versagensmechanismen und liefert mechanisch-technologische Werte, einschließlich bruchmechanischer Kennwerte, zu verwendeten Werkstoffen. Es wurde festgestellt, dass primär für Pipelinewerkstoffe bruchmechanische Kennwerte vorliegen, für Werkstoffe zur Herstellung von Armaturen die Daten jedoch sehr begrenzt sind.

Bruchmechanische Berechnungen wurden exemplarisch für zwei ausgewählte Armaturen durchgeführt, zu denen von Armaturenherstellern Unterlagen zur Verfügung gestellt wurden. Hierbei wurden für mehrere Bereiche der Armaturengehäuse kritische Rissgrößen und Restlebensdauern bestimmt. Die hierzu erforderlichen Spannungen infolge vom Betriebsdruck wurden mittels Finite-Elemente-Simulationen ermittelt, während Schweißeigenstressungen an Schweißnähten mittels Regelwerkempfehlungen konservativ abgeschätzt wurden. Die Festigkeitskennwerte wurden als Mindestwerte gemäß Werkstoffdatenblättern, die bruchmechanischen Kennwerte nach ASME B31.12 als geforderter Mindestwert der Risszähigkeit bzw. als obere einhüllende zyklische Rissfortschrittskurve angenommen. Für eine der Armaturen mit der Nennweite von DN 300 wurde dabei eine hinreichende Sicherheit gegen das spröde Versagen bzw. eine große Anzahl von Vollastwechseln nachgewiesen. Für die größere Armatur mit der Nennweite von DN 800 wurden hingegen deutlich geringere Vollastwechsel ermittelt. Dies liegt primär an höheren Spannungen infolge vom Betriebsdruck sowie an nach gängigen Regelwerken angenommenen Schweißeigenstressungen. Eine genauere, wenig konservative Bestimmung von Schweißeigenstressungen sowie die Verwendung von für Armaturenwerkstoffe experimentell ermittelten Risszähigkeiten erscheinen zielführend für eine verbesserte Integritätsbewertung und Lebensdauerprognose von Armaturen.

Service-Hinweis

Die in Großarmaturen relevanten verbauten Werkstoffe wurden in Form einer Werkstoffliste auf Initiative des *G-PK-1-6-4 H2-Readiness Bestandsarmaturen* von den Fern- und Verbundnetzbetreiber zusammengetragen und für das Forschungsprojekt UKoBaRi H2 zur Verfügung gestellt. Für diese wurden repräsentative Werkstoffkennwerte aus einer umfassenden Literaturrecherche zusammengetragen, digitalisiert und in Excel-Vorlagen überführt. Die werkstoff-spezifischen Daten im Einzelnen sind:

- Zugversuche,
- bruchmechanische Kennwerte wie Charpy-Tests, K_{Ic} , K_Q , ...,
- J_R -Kurven und
- Risswachstumsversuche (da/dN)

Diese Werkstoffkennwerte können bei Interesse beim DVGW als zip-Verzeichnis zum Download angefordert werden. Hierzu bitten wir um eine E-Mail an tim@dvgw.de mit folgendem Betreff:

DVGW-Forschungsbericht G 202108 UKoBaRi H2 – zip-Verzeichnis-Werkstoffkennwerte

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Rechtliche und normative Grundlagen.....	2
2.1	Energiewirtschaftsgesetz und Gashochdruckleitungsverordnung	2
2.2	DVGW-Regelwerk	4
2.2.1	DVGW G 221 (M).....	4
2.2.2	DVGW G 409 (M).....	5
2.2.3	DVGW G 463 (A).....	5
2.2.4	DVGW G 265-3 (A)	5
2.2.5	DVGW G 260 (A)	5
2.2.6	DVGW G 464 (A)	6
2.3	Druckgeräterichtlinie	7
2.4	Harmonisierte Normen.....	9
2.4.1	DIN EN 12516.....	9
2.4.2	EN 13445-3.....	9
2.5	AD 2000 Regelwerk.....	9
2.6	Nicht harmonisierte europäische Normen	9
2.6.1	DIN EN 14141	10
2.6.2	EN 13942	10
2.7	Internationale Normen	10
2.7.1	ASME B31.12	10
2.7.2	API 6D	12
2.7.3	ASME B16.34	12
2.7.4	ASME BPVC Section VIII Division 1	13
2.7.5	ASME BPVC Section VIII Division 2	13
2.7.6	ASME BPVC Section VIII Division 3.....	13
2.8	Weitere Regelwerke und Richtlinien	13
2.8.1	FKM-Richtlinien.....	13
2.8.2	EIGA-Richtlinien.....	13
3	Rohrfernleitungsanlagen	14
3.1.1	Rohrfernleitungsverordnung.....	14
3.1.2	TRFL.....	14
4	Umstellung auf Wasserstoff.....	18
4.1	Literaturrecherche Umstellung von Gas-Fernleitungsnetzen auf den Wasserstofftransport mit Fokus auf Armaturen	18
4.1.1	Beimischungsanteile in das Erdgasnetz	18
4.1.2	Konstruktive und materialtechnische Maßnahmen	19
4.1.3	Dichtheit von Armaturen für den Wasserstofftransport	19
4.1.4	Prüfung von Neu- und Bestandsarmaturen	21
4.1.5	Betrieb, Inspektion und Wartung	22
4.2	Projektliste zu Umstellungsprojekten und deren Vorgehensweise	22
5	Schädigungsmechanismen und Wasserstoffaufnahme	26
5.1	Absorption und Adsorption von Wasserstoff in Metallen	26
5.2	Mechanismen der Wasserstoffversprödung	27

5.2.1	Drucktheorie der Wasserstoffversprödung	28
5.2.2	HEDE – Hydrogen-Enhanced Decohesion	28
5.2.3	HELP – Hydrogen-Enhanced Localized Plasticity	28
5.2.4	AIDE – Adsorption-Induced Dislocation Emission	29
6	Einfluss von Druckwasserstoff auf die Werkstoffeigenschaften von ferritischen Stählen	30
6.1	Quasistatische Verformung.....	37
6.2	Kerbschlagbiegeversuche.....	51
6.3	Bruchmechanische Kennwerte	51
6.4	Risswachstum	57
6.5	Einfluss des Gasdrucks	68
6.5.1	Quasistatische Verformung	68
6.5.2	Bruchmechanische Kennwerte.....	68
6.5.3	Risswachstum.....	68
6.6	Identifikation von geeigneten Testbedingungen zur konservativen Messung von Werkstoffeigenschaften	68
7	Bruchmechanische Betrachtungen unter Zuhilfenahme der FEM	70
7.1	Allgemeines Vorgehen, Referenzdokumente	70
7.2	Bruchmechanische Nachweise unter statischer und zyklischer Beanspruchung.....	70
7.3	Eingabegrößen für bruchmechanische Analysen.....	72
7.3.1	Anfangsrissgröße	72
7.3.2	Werkstoffkennwerte	72
7.3.3	Beanspruchung.....	73
7.4	Referenzarmaturen.....	74
7.5	Spannungsanalysen	77
7.6	Rissmodelle	80
7.7	Bruchmechanische Berechnungen für Referenzarmatur #1.....	82
7.7.1	Spannungen und Spannungsintensitätsfaktoren	82
7.7.2	Ermittlung der kritischen Rissgrößen und Lebensdauern	86
7.8	Bruchmechanische Berechnungen für Referenzarmatur #2.....	87
7.8.1	Spannungen und Spannungsintensitätsfaktoren	87
7.8.2	Ermittlung der kritischen Rissgrößen und Lebensdauern	93
8	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	96
	Literaturverzeichnis	100
	Abbildungsverzeichnis.....	116
	Tabellenverzeichnis.....	119

Untersuchung an Konstruktionen von Bestandsarmaturen hinsichtlich Rissansatzbildung in Schweißnähten unter Wasserstoffatmosphäre

Abschlussbericht

Florian Dittmann
Igor Varfolomeev
Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg



**Untersuchung an Konstruktionen von
Bestandsarmaturen hinsichtlich
Rissansatzbildung in Schweißnähten
unter Wasserstoffatmosphäre**

Abschlussbericht

März 2024

DVGW-Förderkennzeichen G 202311

Zusammenfassung

In der aktuellen Studie wurde das Risswachstumsverhalten in nicht durchgeschweißten Schweißnähten von Armaturengehäusen unter Einfluss von Druckwasserstoff rechnerisch untersucht. Insbesondere für Risspostulate in der Nahtwurzel wurde der Einfluss von Schweiß-eigenspannungen sowie deren Wechselwirkung mit Lastspannungen auf die Risspitzenbeanspruchung und Rissfortschrittsraten quantifiziert. Die hierbei benötigten Schweiß-eigenspannungen wurden mittels numerischer Simulationen für vier repräsentative Armaturenmodelle ermittelt. Die bruchmechanischen Berechnungen erfolgten analog zur Vorgehensweise im DVGW-Projekt UKoBaRi H2 [1], in welchem jedoch Schweiß-eigenspannungen konservativ als abdeckende Tiefenprofile nach [2] angenommen wurden.

Es wurden Schweißverbindungen in Armaturen verschiedener Bauweise mit Nennweiten von DN 300 bis DN 1400 aus Werkstoffen mit Festigkeiten entsprechend P355 bis P460 untersucht. Je nach Armaturengröße variierte die Anzahl der Schweißraupen zwischen 10 und 37. In mehrstufigen numerischen Simulationen wurden sowohl die Eigenspannungen im Schweiß-zustand als auch deren Umlagerung infolge von Belastungszyklen durch Druckprüfung und Betriebslast ermittelt. Die dabei unterstellten Prüfdrücke betragen 150 % bis 200 % des Auslegungsdruks, während der Auslegungsdruks mit $p_A = 100$ bar angenommen wurde.

Die untersuchten Referenzarmaturen weisen qualitativ ähnliche Verläufe der rissöffnenden axialen Eigenspannungen auf. Für alle Armaturen wurden sowohl im Schweißzustand als auch nach der Druckprüfung Druckeigenspannungen in einer Tiefe von bis zu ca. 5 % bis 40 % der Wanddicke ermittelt. Die im Anschluss an die Druckprüfung folgenden Betriebslastzyklen rufen keine nennenswerten Änderungen des Eigenspannungsfelds hervor. Somit kann von einem stabilisierten Eigenspannungszustand bereits nach einem Druckprüfungszyklus ausgegangen werden.

Eine Überlagerung der stabilisierten Eigenspannungen mit der Betriebslast von bis zu 100 bar führt zu einer Erhöhung der rissöffnenden Spannung über nahezu die gesamte Wanddicke. Dabei liegen für die Referenzarmaturen #2, #4 und #5 die resultierenden rissöffnenden Gesamtspannungen im Zugbereich. Lediglich für die Referenzarmatur #3 entstehen bei Volllast Druckspannungen im Bereich der Nahtwurzel bzw. im Bereich des postulierten Anrisses bis zu einer Tiefe von ca. 10 % der Wanddicke. Diese Druckspannungen wirkend rissschließend.

Konsistent mit den Ergebnissen der Eigenspannungssimulationen ergibt sich in den bruchmechanischen Berechnungen kein Risswachstum für die Referenzarmatur #3. Lediglich unter Vernachlässigung der Druckeigenspannungen lässt sich ein zyklisches Risswachstum in der Referenzarmatur #3 nachweisen, wobei die dabei berechneten Restlebensdauern unkritisch sind.

Unter Berücksichtigung der numerisch ermittelten Eigenspannungen und der Rissfortschrittskurven nach SyWeSt H2 [26] sowie unter Annahme eines vorliegenden halbelliptischen Oberflächenrisses mit den Abmessungen nach DVGW G 464 [25] ergeben sich für die Referenzarmaturen #2, #4 und #5 Restlebensdauern von >3.000 Volllastwechseln mit $\Delta p = 100$ bar. Die Annahme eines deutlich konservativeren Anfangsrisspostulats, eines umlaufenden Risses, führt zu einer Abnahme der Restlebensdauer um den Faktor von ca. 2,5 bis 4. Bei der Verwendung der Rissfortschrittskurven nach ASME B31.12 [3] verringert sich die Anzahl der Lastwechsel etwa um den Faktor 2 bis 3, während eine Verringerung der Druckschwingbreite auf $\Delta p = 70$ bar zu einer Erhöhung der Restlebensdauer um den Faktor 3,5 bis 4 führt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Zielsetzung und methodischer Ansatz	4
3	Stand der Technik	6
3.1	Bisherige Untersuchungen an Bestandsarmaturen	6
3.2	Ermittlung von Schweißeigenstressspannungen.....	6
3.3	Abschätzung von Schweißeigenstressspannungen	7
3.4	Bruchmechanische Berechnungen unter Berücksichtigung von Schweißeigenstressspannungen.....	9
4	Numerische Simulationen von Schweißeigenstressspannungen und Druckbelastung	12
4.1	Untersuchte Armaturen	12
4.2	Vorgehensweise.....	12
4.2.1	Materialmodell.....	12
4.2.2	FE-Modelle.....	17
4.2.3	Simulation des Schweißprozesses	20
4.2.4	Simulation von Druckbelastungen	20
4.3	Ergebnisse	22
4.3.1	Referenzarmatur #2	23
4.3.1.1	Allgemeine Untersuchung	23
4.3.1.2	Einfluss der Druckprüfung	25
4.3.1.3	Variation der Fließgrenze	26
4.3.1.4	Variation der Druckprüfung	28
4.3.2	Referenzarmatur #3	30
4.3.3	Referenzarmatur #4	34
4.3.4	Referenzarmatur #5	36
4.3.5	Validierung der Ergebnisse mittels SYSWELD	38
4.3.6	Zusammenfassende Betrachtung.....	39
5	Bruchmechanische Analysen	46
5.1	Vorgehensweise.....	46
5.2	Eingabegrößen.....	46
5.2.1	Anfangsrissspostulate	46
5.2.2	Bruchmechanische Werkstoffkennwerte.....	46
5.2.3	Beanspruchung.....	48
5.3	Bruchmechanische Ersatzmodelle	48
5.4	Ergebnisse	51
5.4.1	Referenzarmatur #2	52
5.4.2	Referenzarmatur #3	54
5.4.3	Referenzarmatur #4	55
5.4.4	Referenzarmatur #5	56
6	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	57
7	Literaturverzeichnis	59
8	Symbol- und Abkürzungsverzeichnis.....	61
9	Abbildungsverzeichnis.....	64

10 Tabellenverzeichnis68