



Industrie Service

**Mehr Wert.
Mehr Vertrauen.**

Gutachterliche Äußerung

zur

Eignung des Werkstoffs L485ME bei Transport von Wasserstoff
über die Süddeutsche Erdgasleitung SEL DN 1200 / 1000, DP 100
der terranets bw GmbH

Gashochdruckleitung: SEL – Süddeutsche Erdgasleitung
DN 1200 / 1000, DP 100

Auftraggeber: terranets bw GmbH, Am Wallgraben 135, 70565 Stuttgart

Auftragsnummer: 23198946

Errichter: terranets bw GmbH, Am Wallgraben 135, 70565 Stuttgart

Betreiber: terranets bw GmbH, Am Wallgraben 135, 70565 Stuttgart

Erstellt am: 19.01.2023

Umfang: 14 Seiten

Datum: 19.01.2023

Unsere Zeichen:
IS-AN1-ESS/CE

Das Dokument besteht aus
14 Seiten.
Seite 1 von 14

Die auszugsweise Wiedergabe
des Dokumentes und die
Verwendung zu Werbezwecken
bedürfen der schriftlichen
Genehmigung der

TÜV SÜD Industrie Service
GmbH.

Die Prüfergebnisse beziehen sich
ausschließlich auf die
untersuchten Prüfgegenstände.

Sitz: München
Amtsgericht München HRB 96 869
USt-IdNr. DE129484218
Informationen gemäß § 2 Abs. 1 DL-InfoV
unter www.tuvsud.com/impressum

Aufsichtsrat:
Reiner Block (Vors.)
Geschäftsführer:
Ferdinand Neuwieser (Sprecher),
Thomas Kainz, Simon Kellerer

Telefon: +49 201 52329 -
Telefax: +49 201 52329-
www.tuvsud.com/de-is



TÜV SÜD Industrie Service GmbH
Niederlassung Essen
Abteilung Anlagensicherheit
Grugaplatz 2-4
45131 Essen
Deutschland



Industrie Service

Inhalt

1	Einführung und Aufgabenstellung	3
2	Prüfgrundlagen und Unterlagen	3
3	Voraussetzungen	4
4	Werkstoffauswahl	4
5	Werkstoffvergleich	5
5.1.	Beständigkeit und Eignung.....	5
5.2.	Wanddicken.....	8
5.3.	Verarbeitung und Prüfung	10
5.4.	Zerstörungsfreie Prüfungen.....	12
5.5.	Prüfumfang.....	12
5.6.	Volumenprüfung	12
5.7.	Kosten	12
5.8.	Sicherheit	12
6	Zusammenfassung.....	13



1 Einführung und Aufgabenstellung

Die Süddeutsche Erdgasleitung SEL der terranets bw soll im Sinne einer zukunftssträchtigen und nachhaltigen Investition so geplant und errichtet werden, dass sie aktuell mit Erdgas betrieben, aber zukünftig möglichst ohne umfassende Änderungen auch mit Wasserstoff betrieben werden kann.

Da die Planung der SEL noch aus einer Zeit stammt, in der ein Wasserstoffbetrieb nicht in Erwägung gezogen wurde, ist der Rohrwerkstoff bereits für die meisten Leitungsabschnitte planfestgestellt. Für den Planfeststellungsabschnitt II wird eine Planfeststellung im Jahr 2023 neu beantragt. Bei dem planfestgestellten Rohrwerkstoff handelt es sich um den Werkstoff L485MB entsprechend der zum Zeitpunkt der Planfeststellung gültigen Norm DIN EN 10208-2 aus dem Jahr 2009. In der aktuell gültigen Fassung der Nachfolgenorm DIN EN ISO 3183 trägt der Werkstoff die Bezeichnung L485ME. Auch für den neu zu beantragenden Planfeststellungsabschnitt II ist dieser Werkstoff vorgesehen.

In dieser Gutachterlichen Äußerung soll bewertet werden, ob der planfestgestellte Werkstoff L485MB bzw. der aktuell verfügbare entsprechende Werkstoff L485ME für den Betrieb mit Wasserstoff geeignet ist. Zusätzlich soll über eine Alternativenprüfung ein Vergleich mit anderen potenziell möglichen Werkstoffen vorgenommen werden. Bei der Untersuchung sollen folgende Aspekte berücksichtigt werden: Eigenschaften des Fördermediums (Erdgas / reiner Wasserstoff), Grundsätzliche Eignung des Rohrwerkstoffs, Rohrtransport, Bauausführung, Schweißen und Verarbeitung, Vorgaben aus dem Regelwerk, Sicherheit, Kosten.

Die Bewertung erfolgt für die Gashochdruckleitung SEL (Süddeutsche Erdgasleitung) von der Station Lampertheim bis zur Station Amerdingen (Bissingen)

Länge:	ca. 254 km
Durchmesser:	1.016 mm (230 km) / 1.220 mm (24 km)
Auslegungsdruck DP:	100 bar
Maximal zulässiger Betriebsdruck MOP:	100 bar

2 Prüfgrundlagen und Unterlagen

Die Gutachterliche Äußerung basiert auf den folgenden Unterlagen:

Verordnung über Gashochdruckleitungen (GasHDrLtgV) vom 18.05.2011, zuletzt geändert am 13.05.2019

DVGW-Arbeitsblatt G 409 vom September 2020

DVGW-Arbeitsblatt G 463 vom Oktober 2021

DVGW-Arbeitsblatt G 466-1 vom Dezember 2021

DVGW-Arbeitsblatt G 260, vom September 2021

DIN EN 1594, Ausgabe Dezember 2013

DIN EN ISO 3183, Ausgabe Februar 2020

Hydrogen Transportation Pipelines, IGC Doc 121/04/E der EIGA (European Industrial Gases Association)

ASME B31.12.-2019 – Hydrogen Piping and Pipelines

Bruchmechanische Prüfungen von Werkstoffen für Gasleitungen zur Bewertung der Wasserstofftauglichkeit: Erste Ergebnisse von Christian Engel, Ulrich Marewski, Guntram Schnotz, Horst Silcher, Michael Steiner erschienen in der Zeitschrift Energie-Wasser-Praxis 12/2020 und in 3R 10-11/2020

Qualifizierung von Gashochdruckleitungen für den Transport von Wasserstoff von: Dr. Michael Steiner, Dr. Ulrich Marewski (beide: Open Grid Europe GmbH) & Christian Engel (TÜV SÜD Industrie Service GmbH) erschienen in der Zeitschrift Energie-Wasser-Praxis 01/2022

3 Voraussetzungen

Die für die Errichtung von Gashochdruckleitungen einsetzbaren Rohrwerkstoffe ergeben sich aus den geltenden technischen Regeln (DVGW Arbeitsblatt G 463 in Verbindung mit der DIN EN 1594). Beide Dokumente verweisen hinsichtlich der Rohrwerkstoffe auf die DIN EN ISO 3183 in Verbindung mit Anhang A. Im DVGW-Arbeitsblatt G 463 finden sich diese Anforderungen im Kapitel 6.2.2, in der DIN EN 1594 im Kapitel 8.1.1. Abweichungen hiervon sind grundsätzlich möglich, wenn die Eignung anderer Werkstoffe sowie die Einhaltung des Stands der Technik durch ein Einzelgutachten eines Sachverständigen gemäß § 11 Gas-HDrLtGv bestätigt wird.

Für Erdgastransportleitungen sind somit entsprechend den zuvor genannten Regelwerken ohne weitere Untersuchungen und Begutachtungen die Werkstoffe L245ME, L290ME, L360ME, L415ME, L450ME, L485ME und L555ME oder die Werkstoffe L245NE, L290NE, L360NE, L415NE gemäß der DIN EN ISO 3183 in Verbindung mit dem Anhang A einsetzbar.

Dies gilt grundsätzlich auch beim Transport von Wasserstoff, hier ist jedoch zusätzlich der Anhang C des DVGW Arbeitsblatts G 463 zu beachten. Einschränkungen hinsichtlich der einzusetzenden Werkstoffe beim Transport von Wasserstoff sind im Anhang C des DVGW Arbeitsblatts G 463 nicht formuliert. Es ist aber bei Betrieb mit Wasserstoff grundsätzlich eine bruchmechanische Bewertung mit Berücksichtigung der auftretenden Drucklastwechsel durchzuführen. Die bruchmechanische Bewertung kann entfallen, wenn alle folgenden Voraussetzungen erfüllt sind:

- Der Rohrwerkstoff weist eine Mindeststreckgrenze $\leq 360 \text{ N/mm}^2$ auf.
- Der Nutzungsgrad f_0 beträgt höchstens 0,5.
- Es liegt eine vorwiegend ruhende Beanspruchung vor.

Weitere Anforderungen an Rohrleitungen zum Wasserstofftransport sind im Dokument „Hydrogen Transportation Pipelines, IGC Doc 121/04/E der EIGA (European Industrial Gases Association) und in der ASME B31.12.-2019 – Hydrogen Piping and Pipelines zu finden.

4 Werkstoffauswahl

Von den unter Nr. 3 aufgeführten Rohrwerkstoffen haben wir neben dem planfestgestellten Werkstoff L485ME die Werkstoffe L290ME / NE, L360ME / NE und L415ME / NE für den weiteren Werkstoffvergleich ausgewählt, da dies die gängigsten Werkstoffe für die Errichtung von Gashochdruckleitungen sind. Höher-feste Werkstoffe aus der DIN EN ISO 3183 wie z.B. den Werkstoff L555ME haben wir nicht berücksichtigt, da bei der Nutzung von Rohrfernleitungen für den Wasserstofftransport von Werkstoffen mit Zugfestigkeiten von mehr als 800 N/mm^2 abgeraten wird und dieser Werkstoff auch für Erdgastransportleitungen in Deutschland bisher nur sehr vereinzelt getestet worden ist. Der Werkstoff L450ME wurde nicht berücksichtigt, da dieser sehr selten zum Einsatz kommt. Der im Durchmesserbereich ab etwa DN 900 am häufigsten eingesetzte Werkstoff für Erdgastransportleitungen ist der L485MB.



5 Werkstoffvergleich

5.1. Beständigkeit und Eignung

Die Bewertung der Beständigkeit und der Eignung des Rohrmaterials sollte gemäß der Aufgabenstellung unter dem Aspekt eines zukünftigen Transports von reinem Wasserstoff erfolgen. Bei der Bewertung der Beständigkeit der Rohre sind wir weiterhin davon ausgegangen, dass das transportierte Gas keine relevanten Verunreinigungen aufweist und einen sehr niedrigen Taupunkt hat (Wassergehalt $< 50 \text{ mg/m}^3$ gemäß DVGW-Arbeitsblatt G 260/09-2021).

Stahl ist ein Werkstoff, der im Allgemeinen gut für den Transport von Wasserstoff geeignet ist. Rohrfernleitungen zum Transport von reinem Wasserstoff werden in Deutschland und weltweit seit vielen Jahrzehnten sicher betrieben. Eine sinnvolle Werkstoffmodifizierung zur Erhöhung der Eignung und Beständigkeit gegenüber Wasserstoff ist die Begrenzung der Phosphor- und Schwefelgehalte auf weniger als 0,015 %. In der DIN EN ISO 3183 ist allerdings der Schwefelgehalt ohnehin auf maximal 0,015 % festgelegt. Rohre guter Qualität weisen in der Regel auch Phosphorgehalte unter 0,015 % auf.

Unter bestimmten Voraussetzungen können Stähle durch die Aufnahme von Wasserstoff aus der Umgebung verspröden. Man spricht dann von der sogenannten Wasserstoffversprödung (Hydrogen embrittlement) oder der wasserstoffinduzierten Spannungsrisskorrosion. Hier sind insbesondere Werkstoffe mit höherer Zugfestigkeit gefährdet. Die Fachliteratur geht davon aus, dass Werkstoffe mit Zugfestigkeiten von weniger als 1.000 N/mm^2 bzw. Rockwell-Härten von weniger als 30 im Allgemeinen nicht durch Wasserstoffversprödung gefährdet sind. Beim Transport von Gasen mit hohem Wasserstoffgehalt bis hin zu reinem Wasserstoff sollte deshalb grundsätzlich auf den Einsatz höherfester Werkstoffe mit Streckgrenzen von mehr als 800 N/mm^2 und/oder Zugfestigkeiten von mehr als 1.000 N/mm^2 verzichtet werden. Die folgende Tabelle zeigt den Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Härte.

Zugfestigkeit in N/mm^2 (MPa)	Brinellhärte HB	Vickershärte HV	Rockwellhärte HRC
255	76	80	-
285	85,5	90	-
350	105	110	-
415	124	130	-
480	143	150	-
770	228	240	20,3
800	238	250	22,2
900	266	280	27,1
1030	304	320	32,2

Tabelle 1: Umrechnung Zugfestigkeit – Härte aus DIN EN ISO 18265: 2014-02

Hinweise auf geeignete Werkstoffe für den Transport von Wasserstoff findet man unter anderem im Dokument „Hydrogen Transportation Pipelines“, IGC Doc 121/04/E der EIGA (European Industrial Gases Association). Die im Anhang C dieses Dokuments aufgeführte Liste enthält auch Werkstoffe, die gemäß dem DVGW



Arbeitsblatt G 463 als Werkstoffe für Gashochdruckleitungen empfohlen werden. Im Einzelnen sind dies die Werkstoffe L245, L290, L360. Die in der DIN EN ISO 3183 aufgeführten Werkstoffe mit höherer Festigkeit wie z.B. L415ME / NE oder L485ME werden von der EIGA nicht bzw. nur mit starken Einschränkungen empfohlen. Sie können gemäß EIGA z.B. eingesetzt werden, wenn die Auslastung auf etwa 30 % der möglichen Belastbarkeit reduziert wird. Dies würde einem Ausnutzungsgrad von 0,3 und somit einem Sicherheitsbeiwert von 3,33 entsprechen.

Der gemäß EIGA empfohlene Werkstoff mit der höchsten Streckgrenze, der Werkstoff L360NE / ME darf gemäß der DIN EN ISO 3183 eine maximale Zugfestigkeit von 760 N/mm² aufweisen und besitzt damit am oberen Bereich der Toleranz eine Zugfestigkeit von weniger als 800 N/mm². Dies gilt allerdings auch für die in der DIN EN ISO 3183 aufgeführten Werkstoffe mit höheren Streckgrenzen bis zum Werkstoff L485ME, der ebenfalls eine maximale Zugfestigkeit von 760 N/mm² aufweisen darf. Die Einschränkungen der EIGA für diese Werkstoffe sind somit aus unserer Sicht nicht ausreichend begründet.

Eine aktuelle Quelle, die Hinweise für die Materialeigenschaften und die Auslegung von Wasserstoff-Pipelines enthält ist der amerikanische Standard ASME B31.12-2019 – Hydrogen Piping and Pipelines, welche auch im DVGW-Arbeitsblatt G 463 ausdrücklich aufgeführt ist. Das ASME B31.12 berücksichtigt alle verfügbaren Pipelinewerkstoffe und bietet grundsätzlich zwei unterschiedliche Optionen („Option A“ und „Option B“) für das Design von Wasserstoff-Pipelines an. Während die Option A die spezifizierte Mindeststreckgrenze der Werkstoffe durch Verwendung von Abminderungsfaktoren bei der Wanddickenberechnung berücksichtigt, besteht bei der Option B die Möglichkeit der Auslegung ohne die Verwendung von Abminderungsfaktoren. Bei der Option B wird die Eignung der Werkstoffe anhand bruchmechanischer Untersuchungen beurteilt.

Bei Anwendung der oben beschriebenen Option A sind die anzuwendenden Abminderungsfaktoren in Tabelle IX-5A des ASME B 31.12 zu finden. Für Werkstoffe mit spezifizierten Mindeststreckgrenzen bis einschließlich 360 N/mm² ist der Abminderungsfaktor = 1, d.h. diese Werkstoffe können ohne Einschränkung auch für Wasserstoff verwendet werden. Für Werkstoffe mit spezifizierten Mindeststreckgrenzen von mehr als 360 N/mm² bis 555 N/mm² betragen die Abminderungsfaktoren zwischen 0,874 und 0,694, dies entspricht zusätzlichen Sicherheiten von 1,14 bis 1,44. Dies führt bei vorgegebenem Auslegungsdruck zu einer Erhöhung der Wanddicken der Rohre oder bei Rohren mit vorgegebener Wanddicke zu einer Reduzierung des zulässigen Betriebsdrucks. Die Option A des ASME B 31.12 verwendet demnach ebenfalls höhere Sicherheitsbeiwerte bei härtesten Werkstoffen, diese sind jedoch nicht so groß, wie im Dokument der EIGA vorgeschlagen.

In der aktuellen Version der ASME B31.12 aus dem Jahr 2019 wurden zur Anwendung der „Option B“ (d.h. insbesondere zur Anwendbarkeit härtester Werkstoffe) gegenüber den früheren Ausgaben der ASME B 31.12 deutliche Vereinfachungen eingebracht. Die Verwendung von härteren Werkstoffen ist nun ohne die Durchführung bruchmechanischer Werkstoffprüfungen (und ohne die Verwendung von Abminderungsfaktoren) möglich, da in dem Standard selbst bereits eine Risswachstumsbeziehung hinterlegt ist, die alle Werkstoffkombinationen in konservativer Weise beschreibt. Diese konservative Risswachstumsbeziehung kann daher als Grundlage für einen Betriebsfestigkeitsnachweis von Transportleitungen für Wasserstoff verwendet werden. Alternativ dazu bietet die Option B auch – wie in der vorhergehenden Ausgabe der ASME B31.12 – die Möglichkeit, die Eigenschaften der im konkreten Fall verwendeten Werkstoffe im Rahmen bruchmechanischer Werkstoffprüfungen zu verifizieren und für den Betriebsfestigkeitsnachweis zu verwenden.

Aktuell führt der DVGW ein Forschungsprojekt zur systematischen Ermittlung bruchmechanischer Kennwerte gängiger aktueller und alter Pipelinewerkstoffe durch. Die Veröffentlichung des Abschlussberichts wird im ersten Quartal 2023 erfolgen. In einem weiteren Projektkreis beim DVGW wird ein bruchmechanisches Bewertungskonzept für Wasserstofftransportleitungen erarbeitet. Dieses bruchmechanische Bewertungskonzept wird im Frühjahr 2023 veröffentlicht. Nach Abschluss dieser beiden DVGW-Projektkreise liegt ein



schlüssiges und allgemein akzeptiertes Verfahren zur Bewertung von Pipeline-Werkstoffen für Wasserstofftransportleitungen vor. Nach derzeitigem Stand der Forschungsprojekte ist nicht zu erwarten, dass Werkstoffe mit spezifizierten Mindeststreckgrenzen von mehr als 360 N/mm², wie z.B. der Werkstoff L485ME nicht für den Einsatz mit Wasserstoff geeignet sein könnten. Erste Ergebnisse der bruchmechanischen Untersuchungen mit dem Werkstoff L485 zeigen im Vergleich zum Werkstoff X52 (vergleichbar mit dem Werkstoff L360) kein signifikant anderes Risswachstum. Einzelheiten sind den unter Nr. 2 aufgeführten Zeitschriftenartikeln zu entnehmen.

Für Rohrformstücke wie z.B. Rohrbögen, Reduzierungen, T-Stücke sind die obengenannten Anforderungen an die Rohre sinngemäß zu erfüllen. Für andere Bauteile wie z.B. Armaturen, Isolierkupplungen, Messgeräte muss die Eignung für Wasserstoff individuell nachgewiesen werden.

5.1.1. Bruchmechanisches Bewertungskonzept

Unter bestimmten Bedingungen (z.B. bei dem Vorliegen sehr scharfkantiger Fehler an der Rohrinnenoberfläche) und dem gleichzeitigen Auftreten von Drucklastwechseln kann es bei Stählen unter Betrieb von Wasserstoff zu einem – z.B. gegenüber Erdgas oder inertem Gas – erhöhten Risswachstum kommen. Im Anhang C des DVGW-Arbeitsblatts G 463 vom Oktober 2021 ist grundsätzlich bei Betrieb mit Wasserstoff mittels bruchmechanischer Rissfortschrittsberechnungen der Nachweis zu führen, dass der Betrieb mit dem Medium Wasserstoff nicht zu kritischen Rissgrößen führen kann sofern die in Kapitel 3 beschriebenen Ausnahmen nicht gelten. Die nachfolgenden Eingangsgrößen für eine solche Berechnung sind erforderlich oder zu definieren:

- Auftretende Drucklastwechsel unter Wasserstoff

Es ist die Anzahl und die Höhe der jeweilig auftretenden Druckamplituden unter dem Betrieb mit Wasserstoff in konservativer Weise abzuschätzen. Die Abschätzung der Drucklastwechselkollektive kann durch eine Prognose zukünftiger Drucklastwechsel erfolgen. Hierbei ist auch eine angemessene Anzahl von Sondersituationen z.B. notwendige Druckentlastungen infolge von Reparaturen zu berücksichtigen.

Die Auswertung der uns von der terranets bw zur Verfügung gestellten Druckaufzeichnungen der Nordschwarzwaldleitung NOS ergab für einen Zeitraum von 1523 Tagen (01.01.2017 bis 04.03.2021) 1451 positive Drucklastwechsel mit Werten zwischen 1,5 bar und 28 bar. Der Druck schwankte im oben angegebenen Zeitraum zwischen 34,5 bar und 64 bar.

Umgerechnet auf eine Häufigkeit von 1 pro Tag ergab sich eine Amplitude von 11,7 bar. Diese Druckschwankung ist praktisch als ruhender Betrieb zu bewerten. Rechnet man die akkumulierte Schädigung der ermittelten täglichen Druckamplitude von 11,7 bar nach der Vorschrift über die lineare Schadensakkumulationshypothese nach Miner auf Vollastwechsel mit 70 bar um, so ergibt sich ein Vollastwechsel in ca. 8 Jahren. Rechnet man konservativ einen weiteren Vollastwechsel für eine notwendige Druckentlastung infolge einer Reparatur hinzu, so ergibt sich umgerechnet eine tägliche Druckschwankung von 13,7 bar. Es kann davon ausgegangen werden, dass auch beim Betrieb mit Wasserstoff die Druckwechsel in einer ähnlichen Größenordnung liegen.

- Materialspezifische Kenngrößen

Zur Berechnung erforderlich sind die bruchmechanischen Kenngrößen K_{oH} (unterer Schwellwert für Risswachstum unter Wasserstoff), da/dN (Risswachstumsgesetz für Risswachstum des Werkstoffes unter Wasserstoff) und K_{ICH} (Bruchzähigkeit unter Wasserstoff). Mit der Bruchzähigkeit K_{ICH} ist die kritische Fehlergröße verknüpft, welche die maximale, rechnerische Lebensdauer begrenzt.



Industrie Service

Hier kann voraussichtlich auf die im Rahmen des DVGW-Projekts ermittelten Werkstoffkenngrößen zurückgegriffen werden. Bei Unsicherheiten hinsichtlich der Beurteilung des Materials für die Verwendung unter Wasserstoff können exemplarisch bruchmechanische Prüfungen zur Ermittlung der Kennwerte durchgeführt werden.

- Anfängliche Fehlergröße

Die bruchmechanische Berechnung der Lebensdauer der Leitung erfordert die Annahme einer initialen Fehlergröße. Diese ist unter Berücksichtigung der vorgenommenen Druckprüfungen, der durchgeführten zerstörungsfreien Prüfungen, der Betriebserfahrungen und der Ergebnisse von Inspektionen in konservativer Weise festzulegen. Auch hier sind Festlegungen durch den DVGW-Projektkreis „Bruchmechanisches Bewertungskonzept“ zu erwarten. Bei neu errichteten Leitungen ergibt sich, wenn nichts anderes festgelegt wird, die anfängliche Fehlergröße aus dem Anhang C des DVGW-Arbeitsblatts G 463 vom Oktober 2021.

- Sicherheiten

Für die bruchmechanischen Berechnungen sind geeignete Sicherheiten festzulegen. So kann z.B. die Risstiefe begrenzt werden und / oder die Anzahl der Druckänderungen. Die anzusetzenden Sicherheiten werden durch den DVGW-Projektkreis „Bruchmechanisches Bewertungskonzept“ noch festgelegt und werden dem neuen DVGW-Merkblatt G 464 zu entnehmen sein.

Auf der Grundlage der oben beschriebenen Eingangsgrößen und Randbedingungen kann eine bruchmechanische Rissfortschrittberechnung durchgeführt werden. Hierbei werden ausgehend von der definierten Anfangsfehlergeometrie (welche konservativ als Riss angenommen wird), diejenige rechnerische Lebensdauer ermittelt, bei der die kritische Rissgeometrie bei der Bruchzähigkeit K_{ICH} erreicht wird.

Zur Verifizierung der Berechnungsannahmen und insbesondere des Lastspielkollektives ist es erforderlich die Druckspiele während des Betriebes mit Wasserstoff zu archivieren. Etwa 5-10 Jahre nach der Umstellung auf das Medium Wasserstoff sowie regelmäßig alle 10 Jahre sollten dann jeweils aktualisierte Berechnungen auf der Grundlage der tatsächlich stattgefundenen Druckwechsel erfolgen (Monitoring).

Mit den unter Nr. 5.2 berechneten Mindestwanddicken und einer Anfangsfehlerltiefe von 5% der Mindestwanddicke, sowie einer Anfangsfehlerlänge von 50 mm lassen sich mit den zurzeit festgelegten Berechnungsmethoden die folgende Anzahl von Vollastwechseln bis zum Versagen des Fehlers beim Betrieb mit reinem Wasserstoff konservativ abschätzen. Die Werte in Klammern wurden mit dem derzeitigen DVGW-Sicherheitskonzept (Sicherheit von 1,5 gegen die Risstiefe), welches noch nicht offiziell verabschiedet ist, berechnet.

DN 1200

Werkstoff	Rechnerische Mindestwanddicke	Anzahl der Vollastwechsel ca.	Theoretische Lebensdauer in Jahren bei einem Vollastwechsel in 2 Jahren ca.
L360ME / NE	27,1 mm	1.300 (1200)	2.600 (2.400)
L415ME / NE	23,5 mm	790 (720)	1.580 (1.440)
L485ME	20,1 mm	470 (410)	940 (820)

**DN 1000**

Werkstoff	Rechnerische Mindestwanddicke	Anzahl der Vollastwechsel ca.	Theoretische Lebensdauer in Jahren bei einem Vollastwechsel in 2 Jahren ca.
L360ME / NE	22,7 mm	1.500 (1400)	3.000 (2.800)
L415ME / NE	19,6 mm	900 (840)	1.800 (1.680)
L485ME	16,8 mm	550 (490)	1.100 (980)

Der Werkstoffvergleich ergibt unter Berücksichtigung des bruchmechanischen Verhaltens unter Wasserstoff für alle Werkstoffe ausreichend hohe Lebensdauern.

5.2. Wanddicken

Unter Berücksichtigung der Anforderungen des DVGW-Arbeitsblatts G 463 und der DIN EN 1594 ergeben sich für die SEL mit einem Auslegungsdruck DP von 100 bar, einem Außendurchmesser von 1220 mm bzw. 1016 mm und der Wanddickentoleranz gemäß DIN EN ISO 3183 Anhang A (Ausgabe Februar 2020) für die unter Nr. 4 aufgeführten Werkstoffe die folgenden Wanddicken:

Werkstoff	DN 1200 Rechnerische Mindestwand- dicke	DN 1200 Nennwanddicke einschließlich Toleranz	DN 1000 Rechnerische Mindestwand- dicke	DN 1000 Nennwanddicke einschließlich Toleranz
L290ME / NE	33,6 mm	34,6 mm	28,1 mm	29,1 mm
L360ME / NE	27,1 mm	28,1 mm	22,7 mm	23,7 mm
L415ME / NE	23,5 mm	24,5 mm	19,6 mm	20,6 mm
L485ME	20,1 mm	21,1 mm	16,8 mm	17,7 mm

Aufgrund der Wanddicke von mehr als 30 mm für den Werkstoff L290ME / NE scheidet dieser bei der Nennweite DN 1200 für die weiteren Untersuchungen aus, da eine Verarbeitung nicht sinnvoll durchzuführen ist. Bei der Nennweite DN 1000 ergeben sich hinsichtlich der Wanddicken keine Einschränkungen.

Mit den berechneten Nennwanddicken ergeben sich die folgenden Gewichte für jeweils einen Meter Rohr bzw. für ein Rohr mit 18 m Länge:

Werkstoff	Gewicht pro m DN 1200	Gewicht pro 18 m DN 1200	Gewicht pro m DN 1000	Gewicht pro 18 m DN 1000
L360ME / NE	846,9 kg	15,2 t	713,0 kg	12,8 t
L415ME / NE	738,6 kg	13,3 t	622,5 kg	11,2 t
L485ME	636,4 kg	11,5 t	534,2 kg	9,6 t



Industrie Service

Bei der derzeit größten Erdgasleitung in Deutschland mit einer Nennweite von DN 1400 aus dem Werkstoff L485ME mit einer Wanddicke von 22,3 mm hatten die Rohre ein Gewicht von 781,9 kg pro m Rohr und ein Gewicht von 14,1 t pro 18 m Rohrlänge.

Aufgrund der Wanddicken und Rohrgewichte verbleiben als sinnvoll einzusetzende Werkstoffe für die Nennweite DN 1200 somit nur L415ME / NE und L485ME für die weiteren Untersuchungen. Der L360ME/NE scheidet aufgrund zu hoher Rohrgewichte aus. Bei der Nennweite DN 1000 ergeben sich hinsichtlich des Rohrgewichts keine Einschränkungen.

5.3. Verarbeitung und Prüfung

5.3.1. Schweißtechnik

Alle oben aufgeführten Werkstoffe können ohne Einschränkungen mittels Schweißen zusammengefügt werden. Die dabei zu beachtenden technischen Anforderungen werden im DVGW Arbeitsblatt GW 350 spezifiziert. Aufgrund des Auslegungsdrucks der SEL ist unabhängig vom verwendeten Werkstoff die höchste Qualitätsanforderungsstufe „D“ des Regelwerks anzuwenden.

Materialspezifische Unterschiede bei der Verarbeitung und bei der Prüfung werden gemäß dem geltenden Regelwerk anhand der gewährleisteten Mindeststreckgrenze ($R_{t0,5}$) festgelegt. Gemeinhin sind für Stähle mit einer gewährleisteten Mindeststreckgrenze von mehr als 360 N/mm² (L415ME / NE, L450ME, L485ME) höhere Anforderungen definiert als für Stähle mit einer gewährleisteten Mindeststreckgrenze von 360 N/mm² und weniger (L290ME / NE, L360ME / NE).

Die Anforderungen betreffen im Wesentlichen die zulässigen Werte für Kerbschlagarbeit bei der Verfahrensprüfung, die zulässigen Maßnahmen bei zu großem Kantenversatz, das Vorwärmen sowie Sondermaßnahmen bei Zündstellen und bei der Verwendung von zelluloseumhüllten Schweißelektroden. Die Anforderungen aus dem DVGW Arbeitsblatt GW 350 sind nachfolgend auszugsweise aufgeführt.

5.3.2. Kerbschlagarbeit bei der Schweißverfahrensprüfung

Hinsichtlich der zulässigen Werte für die Kerbschlagarbeit bei der Verfahrensprüfung ergeben sich die folgenden Unterschiede:

Garantierte Mindeststreckgrenze Grundwerkstoff	Durchschnittswert	Einzelwert
$\leq 360 \text{ N/mm}^2$	$\geq 27 \text{ J}$	$\geq 20 \text{ J}$
$> 360 \text{ N/mm}^2$	$\geq 40 \text{ J}$	$\geq 30 \text{ J}$

5.3.3. Kantenversatz

Wurzelseitiger und decklagenseitiger Kantenversatz an Rohren und Rohrleitungsteilen ist gemäß der nachfolgenden Tabelle unabhängig vom Werkstoff für die Qualitätsanforderungsstufe D zulässig. Liegt der Versatz außerhalb dieses Bereiches, können die Stähle mit $R_{t0,5} \leq 360 \text{ N/mm}^2$ mit Zustimmung des Betreibers ausgerichtet oder durch die Anwendung spezieller Einrichtungen oder durch Übergangsstücke ausgeglichen werden.

Bei Stahlsorten mit $R_{t0,5} > 360 \text{ N/mm}^2$ darf ein Kantenversatz, der außerhalb des Toleranzbereiches liegt nur durch Übergangsstücke ausgeglichen werden.



Wanddicke	zulässiger Kantenversatz	
	Wurzellage	Decklage
≤ 10 mm	1 mm über den gesamten Rohrumfang	0,3 * Wanddicke
> 10 mm	2 mm über eine Länge von 508 mm	3 mm

5.3.4. Schweißarbeiten bei fließendem Medium

Um Aufhärtungen und Kaltrisse zu vermeiden ist insbesondere bei Leitungen aus Werkstoffen mit $R_{t0,5} > 360 \text{ N/mm}^2$ vorzuwärmen und die Vorwärmtemperatur während der Schweißarbeiten zu halten.

5.3.5. Weitere Anforderungen

Folgende weitere Anforderungen sind bei Stählen mit $R_{t0,5} > 360 \text{ N/mm}^2$ zu beachten:

- Bei Verwendung von zelluloseumhüllten Schweißelektroden dürfen die zerstörungsfreien Prüfungen der Rundnaht erst 24 Stunden nach Fertigstellung der Schweißnaht durchgeführt werden.
- Bei Garantienähten ist die Verwendung von zelluloseumhüllten Schweißelektroden nur mit Genehmigung des Betreibers zulässig.
- Bei Zündstellen neben der Schweißnaht ist die Fehlerfreiheit nach dem Ausfeilen durch eine Oberflächenrissprüfung nachzuweisen.

Hinsichtlich des Fördermediums Wasserstoff sind sowohl in den aktuell gültigen Ausgaben der einschlägigen DVGW-Arbeitsblätter als auch in den bereits vorliegenden Entwürfen keine zusätzlichen Anforderungen in Bezug auf Verarbeitung und Prüfung formuliert.

5.3.6. Fazit

Die Verarbeitung von höherfesten Werkstoffen mit $R_{t0,5} > 360 \text{ N/mm}^2$ ist mit modernen Schweißtechniken zwar gut möglich, insbesondere bei Instandhaltungs-, Einbinde- und Änderungsarbeiten sind Stähle mit niedriger Streckgrenze bis einschließlich 360 N/mm^2 jedoch deutlich leichter zu handhaben und auch hinsichtlich der Durchführung zerstörungsfreier Prüfungen unproblematischer.

Aufgrund des Außendurchmessers und des Auslegungsdrucks der SEL sind allerdings Werkstoffe mit $R_{t0,5}$ bis einschließlich 360 N/mm^2 aufgrund der hohen Wanddicken von z.T. über 30 mm und/oder des hohen Rohrgewichts nicht sinnvoll einsetzbar.

Für die Errichtung der SEL muss somit aus den zuvor genannten Gründen auf höherfeste Werkstoffe zurückgegriffen werden. Auch diese sind sowohl bei der Errichtung als auch bei Instandhaltungs- und Änderungsarbeiten seit vielen Jahrzehnten im Einsatz und können ohne Schwierigkeiten und bei gleicher Sicherheit verarbeitet werden.

Zusätzliche Anforderungen in Bezug auf Verarbeitung und Prüfung bei Nutzung der Leitung für den Wasserstofftransport sind in den aktuell gültigen Regelwerken nicht formuliert.



5.4. Zerstörungsfreie Prüfungen

5.5. Prüfumfang

Gemäß DVGW-Arbeitsblatt GW 350 sind bei Gashochdruckleitungen der Qualitätsanforderungsstufe D alle Schweißnähte zerstörungsfrei zu prüfen. Der Prüfumfang ist anhand folgender Tabelle dargestellt und gilt unabhängig vom verwendeten Werkstoff auch für den Transport von Wasserstoff:

Nahtart	Sichtprüfung	Volumenprüfung	Oberflächenrissprüfung
Rundnaht	100 %	100 %	
Längsnaht	100 %	100 %	
Kehlnaht (Abzweig/Stutzen)	100 %		100 %
Kehlnaht (Überlappstoß)	100 %	100 %	100 %
Reparatur	100 %	100 %	

5.6. Volumenprüfung

Grundsätzlich kommen für die Volumenprüfung die Verfahren Durchstrahlungsprüfung (RT) und Ultraschallprüfung (UT) oder TOFD zum Einsatz, wobei die Ultraschallprüfungen für zunehmend dickere und die Durchstrahlungsprüfung für zunehmend dünnere Wanddicken geeignet ist. Die Ultraschallprüfung kann nur bei Wanddicken ab etwa 8 mm mit hinreichend guter Aussagekraft eingesetzt werden und auch automatisiert durchgeführt werden.

Prinzipiell können bei jeder hier vorgeschlagenen Materialgüte und -dicke beide Verfahren eingesetzt werden, sodass eine wirtschaftliche Abwägung getroffen werden kann. Dabei sind ggf. auch die in Kapitel 5.3.5 aufgeführten Anforderungen bei Stählen mit $R_{t0,5} > 360 \text{ N/mm}^2$ zu beachten.

5.7. Kosten

Eine direkte Abschätzung der Gesamtkosten für unterschiedliche Rohrwerkstoffe ist schwierig, da die Marktverfügbarkeit hier entscheidend sein dürfte. Ein abschätzbarer Einflussfaktor für die Kosten im Rohrleitungsbau ist das Gewicht des verarbeiteten Stahls. Dabei fließen die Kosten für Schweißzusätze ggf. in die Kalkulation des Herstellers ein.

Wir haben deshalb für die unter 5.2 ermittelten Nennwanddicken das Rohrgewicht pro Meter ermittelt. Gegenüber dem Referenzrohr aus dem Werkstoff L485ME, beträgt das Mehrgewicht unabhängig von der Nennweite beim L415ME / NE 16% und beim L360ME 33%. Für das Gewicht des Schweißzusatzes ergeben sich ähnliche relative Mehrgewichte. Bei einem linearen Verhältnis zwischen Rohrgewicht und Preis ist davon auszugehen, dass die Preise sich annähernd proportional zum Rohrgewicht verhalten. Hinsichtlich der Gesamtkosten dürfte der L485MB somit am kostengünstigsten sein.

5.8. Sicherheit

Daten über die Sicherheit von Gashochdruckleitungen können den Schadensstatistiken der EGIG (European Gas Pipeline Incident Group) entnommen werden. Die EGIG veröffentlicht in regelmäßigen Abständen einen Bericht, in dem die Schäden an Gastransportleitungen in Europa ausgewertet werden.



In der EGIG werden zurzeit regelmäßig Daten von 17 großen Europäischen Gasversorgern mit einem Pipelinennetz von insgesamt ca. 143.000 km Länge gesammelt und ausgewertet. Es werden unabhängig von der Leckgröße alle Schäden mit Gasaustritt erfasst.

Der aktuelle 11. EGIG-Report von Dezember 2020 enthält wie auch die EGIG-Reports der Vergangenheit unter anderem statistische Auswertungen hinsichtlich des Einflusses der Wanddicke auf die Unfallhäufigkeit. Gemäß der statistischen Auswertung der EGIG hat die Wanddicke der Rohre insbesondere einen erheblichen Einfluss bei den Schäden durch äußere Einwirkung und durch Korrosion. Die Verwendung größerer Wanddicken erhöht immer auch die Sicherheit der Leitung.

Wie im Kapitel 5.2 dargestellt hängt die Wanddicke unmittelbar vom verwendeten Werkstoff ab und liegt in dem hier untersuchten Fall bei Nennweite DN 1200 zwischen 21,1 mm und 28,1 mm und bei Nennweite DN 1000 zwischen 17,7 mm und 23,7 mm. Bei äußeren Einwirkungen und Korrosion sind bei Rohrleitungen mit einer Wanddicke von mehr als 15 mm im Zeitraum der letzten 50 Jahre von 1970 bis 2019 keine Schäden an Gastransportleitungen erfasst worden. Da alle ermittelten Wanddicken größer sind als 15 mm, schneiden alle untersuchten Werkstoffe in Bezug auf die Sicherheit der Leitung gegen äußere Einwirkungen oder Außenkorrosion sehr gut ab.

6 Zusammenfassung

Für die geplante Gashochdruckleitung SEL (Süddeutsche Erdgasleitung) DN 1200 / 1000, DP 100 haben wir einen Vergleich hinsichtlich der einzusetzenden Werkstoffe durchgeführt. Dabei wurden die folgenden Aspekte berücksichtigt: Eigenschaften des Fördermediums (Erdgas mit erhöhtem Wasserstoffgehalt bzw. reiner Wasserstoff), Grundsätzliche Eignung des Rohrwerkstoffs, Schweißen und Verarbeitung, Vorgaben aus dem Regelwerk, Sicherheit, Kosten.

Die einzelnen Untersuchungsaspekte führen zu folgenden Ergebnissen und Empfehlungen:

- Die maßgeblichen Regelwerke sehen für Gashochdruckleitungen für den Transport von Erdgas und Gasen mit erhöhtem Wasserstoffgehalt bis hin zu reinem Wasserstoff Rohre aus Werkstoffen gemäß der DIN EN ISO 3183 Anhang A vor. Einschränkungen hinsichtlich der maximalen Zugfestigkeit sind gemäß dem geltenden Regelwerk nicht vorgeschrieben. Allerdings ist die maximale Zugfestigkeit für den zum Einsatz kommenden L 485ME gemäß DIN EN ISO 3183 auf 760 N/mm² begrenzt. Damit werden auch die Empfehlungen der EIGA (European Industrial Gases Association) Werkstoffe mit Zugfestigkeiten von mehr als 800 N/mm² nicht für Wasserstoff einzusetzen erfüllt.
- Hinsichtlich der Verarbeitung und Prüfung der Rohrwerkstoffe sind Stähle mit niedriger Streckgrenze bis einschließlich 360 N/mm² insbesondere bei Instandhaltungs-, Einbinde- und Änderungsarbeiten leichter zu handhaben und auch hinsichtlich der Durchführung zerstörungsfreier Prüfungen unproblematischer. Auch bei höherfesten Werkstoffen sind alle erforderlichen Arbeiten problemlos und sicher auszuführen.
- Aufgrund des Außendurchmessers und des Auslegungsdrucks der SEL sind bei Nennweite DN 1200 Werkstoffe mit einer Streckgrenze bis 360 N/mm² wegen zu großer Wanddicken und/oder zu hoher Rohrgewichte nicht sinnvoll einsetzbar. Bei Nennweite DN 1000 gibt es hier keine Einschränkungen.
- Für die Errichtung der Leitungsabschnitte in DN 1200 der SEL muss somit aus den zuvor genannten Gründen auf höherfeste Werkstoffe L415ME / NE oder L485ME zurückgegriffen werden. Auch diese sind sowohl bei der Errichtung als auch bei Instandhaltungs- und Änderungsarbeiten seit vielen Jahrzehnten im Einsatz und können ohne Schwierigkeiten und bei gleicher Sicherheit verarbeitet werden.



Industrie Service

- Der Phosphorgehalt sollte einen Wert von 0,015 % nicht überschreiten, was aber bei qualitativ hochwertigen Rohren meist erfüllt ist.
- Für Rohrformstücke wie z.B. Rohrbögen, Reduzierungen, T-Stücke sind die obengenannten Anforderungen an die Rohre sinngemäß zu erfüllen. Für andere Bauteile wie z.B. Armaturen, Isolierkuppungen, Messgeräte muss die Eignung für Wasserstoff individuell nachgewiesen werden.
- Hinsichtlich der Kosten hat die Marktverfügbarkeit einen entscheidenden Einfluss auf die Gesamtkosten. Es ist hier also auch sinnvoll einen gängigen Werkstoff und gängige Wanddicken zu wählen.

Unter Berücksichtigung aller oben genannten Aspekte ist der planfestgestellte Rohrwerkstoff L485ME der Werkstoff mit den meisten Vorteilen. Er ist darüber hinaus uneingeschränkt auch für den Transport von Wasserstoff einsetzbar, wenn der Anhang C des DVGW-Arbeitsblatts G 463 beachtet wird und eine bruchmechanische Bewertung sowie ein Monitoring der Drucklastwechsel im Betrieb durchgeführt wird.

Der Werkstoff L415ME / NE ist unter Anwendung des Anhangs C des DVGW-Arbeitsblatts G 463 ebenfalls uneingeschränkt für den Transport von Wasserstoff einsetzbar und erreicht aufgrund der größeren Wanddicke eine etwas höhere Sicherheit und eine längere Lebensdauer und ist im Sinne einer nachhaltig errichteten Gastransportleitung bei etwas höheren Kosten ebenfalls sehr gut geeignet.

Essen, den 19.01.2023



A handwritten signature in blue ink, reading 'Engel'.

Der Sachverständige^{*)}

(Dipl.-Ing. Christian Engel)

^{*)} der akkreditierten Inspektionsstelle Typ A (Urkunde D-IS-14153-02-05), anerkannt gem. § 11 Abs. 1 GasHdRLtgV durch die Bezirksregierung Arnsberg Az. 66.III/B-47-10-115/15 vom 19.01.2021