

Transport von Wasserstoff in Stahlrohren des Verteilnetzes bis 16 bar

Von Georg Golisch und Holger Brauer

Klimaschutz ist derzeit eines der maßgebenden Themen in Politik und Wirtschaft. Dabei geht es um die Dekarbonisierung vieler Wirtschaftszweige. Deutschland und andere europäische Länder haben in diesem Zusammenhang die Schlüsselposition des Wasserstoffs (H_2) erkannt und treiben den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft voran.

Einleitung

Produktion und Verbrauch von Wasserstoff erfolgt oftmals nicht am gleichen Ort. Folglich ist es notwendig, Wasserstoff auch über lange Distanzen zu transportieren. Als wirtschaftlich sinnvolle Transportmöglichkeit von Wasserstoffdruckgas bieten sich hierbei Rohrleitungen an, aufgeteilt in Fernleitungen und Verteilnetze [1]. Erdgas wird bereits seit vielen Jahrzehnten mittels Gasleitungsnetzen verteilt, so dass Rohrleitungen nach einer Umwidmung die notwendige Infrastruktur bieten können. Unter welchen Bedingungen die Bestandsleitungen jedoch für den Transport von H_2 /Erdgas-Gemischen oder 100 % H_2 genutzt werden dürfen, wird derzeit diskutiert und geregelt, da Wasserstoff aufgrund möglicher Werkstoffversprödung zu einer Verringerung der Betriebszeit führen könnte.

Wie an exemplarischen Berechnungen bereits gezeigt wurde [2], spielen die Betriebsbedingungen wie Druck und Druckschwankungen eine entscheidende Rolle für die Lebensdauer einer Rohrleitung. Generell gilt, dass bei Auslegung für einen potenziell höheren Gasdruck das Rohrleitungsmaterial als stärker beansprucht betrachtet wird. Dafür sind eine genauere Kenntnis und Einbeziehung der Materialeigenschaften sinnvoll. So beschreibt

die ASME B31.12(2019) [3] zwei Optionen, die für die Auslegung genutzt werden können. PL-3.7.1 Option A nutzt eine Reihe an Designfaktoren, die den zulässigen Gasdruck einer H_2 -Leitung stark einschränken. PL-3.7.1 ermöglicht jedoch mit Option B eine Auslastung der Rohrleitungen bis maximal 20 MPa bzw. 200 bar Innendruck, sofern Rohrmaterial, Schweißnaht und Wärmeeinflusszone der Stahlrohrleitung den Schwellenwert der Spannungsintensität K_{IH} nicht unterschreitet. Zusätzlich verlangt Option B die Berechnung einer bruchmechanischen Lebensdaueranalyse. Für Hochdruckleitungen ist diese Herangehensweise plausibel, da der hohe Druck und Druckschwankungen zur Ermüdung des Leitungswerkstoffs beitragen.

So weist der DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches) in seinem Entwurf des Merkblatts G 463 [4] auf eine Druckgrenze von 16 bar hin. Oberhalb dieser Grenze ist eine bruchmechanische Lebensdaueranalyse durchzuführen. Ein Großteil des Verteilnetzes wird jedoch nur mit einem Druck von maximal 16 bar betrieben.

Dieses Paper greift diesen Zusammenhang mit dem Ziel auf, eine Empfehlung für die Betrachtung von Rohrleitungen bis 16 bar zu geben. Dazu werden Ergebnisse von Lebensdauerberechnungen einer Hochdruckleitung bei

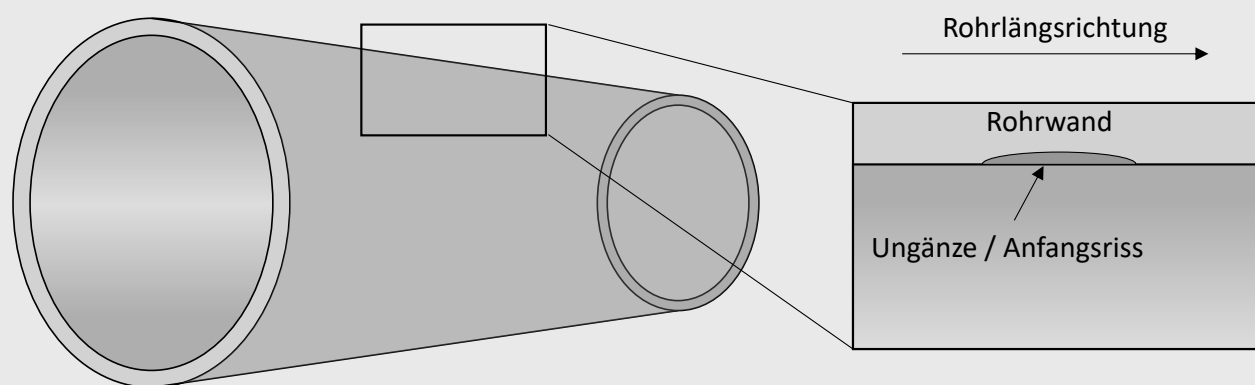


Bild 1: Lage der Ungänze / des Anfangsrisses in der Rohrleitung an der Rohrrinnenseite für eine konservative bruchmechanische Lebensdaueranalyse

Tabelle 1: Randbedingungen und Ergebnisse zur Berechnung der Zyklenzahlen

| Fall | Rohrmaße | | Inbetriebnahme | | P | % SMYS | „end-of-life“ K_{IH} | kritische Fehlergröße | | Zyklenzahl **) | |
|-------------|----------|-----|----------------|-------|-----|--------|---------------------------|-----------------------|-------------|----------------|--------------|
| | OD | WT | zfP | a_0 | | | | a_{crit} | $2c_{crit}$ | N_{crit} | N_{design} |
| i | mm | mm | - | mm | bar | - | MPa \sqrt{m} | mm | mm | - | - |
| 1 | 323,9 | 5 | N10 | 0,5 | 16 | 21% | 55 | 3,61 | 50,08 | 40.660.000 | 20.320.000 |
| 2 | 323,9 | 5 | - | 1 | 16 | 21% | 55 | 3,34 | 50,07 | 9.960.000 | 4.830.000 |
| 3 | 323,9 | 5 | N5 | 0,25 | 16 | 21% | 55 | 3,47 | 50,08 | 100.650.000 | 50.310.000 |
| 4 | 323,9 | 7,5 | - | 0,5 | 16 | 14% | 55 | 5,84 | 50,44 | 234.150.000 | 117.050.000 |
| 5 | 114,3 | 5 | N10 | 0,5 | 16 | 7% | 55 | 3,61 | 50,18 | 1.214.000.000 | 606.500.000 |
| vgl. 85 bar | 406,4 | 8 | N10 | 0,8 | 85 | 50% *) | 55 | 4,56 | 50,10 | 48.450 | 24.220 |

*) Annahme eines L415 für die Berechnung bei 85 bar

**) Eigenspannungen nicht berücksichtigt

85 bar mit einer 16 bar Leitung verglichen. Eine Parameterstudie zeigt die detaillierteren Einflüsse auf die Lebensdauer, wie angenommene Anfangsrisstiefe, Wanddicke, Rohrdurchmesser und Streckgrenzauslastung.

Bewertung der Lebensdauer eines Rohres

Eine bruchmechanische Lebensdaueranalyse bedarf vieler verschiedener Annahmen und Parameter. Generell unterteilt die Lebensdaueranalyse den Lebenszyklus eines Bauteils in drei Aspekte: Inbetriebnahme, Betrieb und „end of life“. Eine genaue Erläuterung dieser Aspekte ist in [2] gegeben, und wird unten nochmals kurz zusammengefasst.

Für die Inbetriebnahme nimmt die Lebensdaueranalyse eine Ungänze (Riss) an, die bei der Ultraschall-Prüfung, z. B. während der Rohrproduktion, unterhalb der Nachweisgrenze liegt. Die Größe der Anfangsrisstiefe ist dabei ein entscheidender Faktor für die Lebensdauer eines Bauteils. Generell können nach entsprechender Kalibrierung mittels Ultraschall Risstiefen mit 10 % der Wanddicke (N10) oder 5 % der Wanddicke (N5) erkannt werden. Der Anfangsrisss wird an der Innenseite des Rohres in Längsrichtung angenommen (**Bild 1**). Der Innendruck wirkt am stärksten in Rohrumfangsrichtung und übt so den größten Einfluss auf den Riss aus. Die Annahme ist folglich konservativ.

Im Betrieb wächst der Anfangsrisss auf Basis der Rissfortschrittsrate da/dN und der zugehörigen Schwankungsbreite der Spannungsintensität ΔK . Die Rissfortschrittsrate ist in ASME B31.12 als „upper bound“-Rate festgelegt. Sie ist konservativ und basiert auf einer Vielzahl von Ergebnissen zum Rissfortschritt an Stahlwerkstoffen unter Wasserstoffeinfluss [5]. Für eine genauere und weniger konservative Rissfortschrittsrate kann für jedes Rohrleitungsmaterial eine eigene Rissfortschrittsrate bestimmt werden. Die Schwankungsbreite der Spannungsintensität ΔK wird für jeden Belastungszyklus N , bestehend aus Oberlast und Unterlast, bestimmt. ΔK berechnet sich auf

Basis von Regelwerken wie BS7910 [6] und bezieht Rohr-abmessungen, Druck, Druckschwankungen, Risstiefe und -breite mit ein.

Der „end of life“-Zustand wird durch Abbruchkriterien definiert. Nach ASME B31.12 wird das Lebensende einer Leitung über zwei Kriterien bestimmt. Entweder wird der bei der Qualifizierung des Rohrleitungswerkstoffes verlangte Schwellenwert K_{IH} erreicht, oder die Risstiefe a erreicht ein Viertel der Wanddicke. ASME BPVC Sec VIII Div 3 [7] nutzt weitere Kriterien, um eine sicher nutzbare Lebensdauer für den Leitungsbetrieb zu gewährleisten. Diese Designlebensdauer bezieht nur einen Anteil der Gesamtlebensdauer mit ein. Mit Überschreiten der Designlebensdauer wird dann die rechnerische Sicherheitsreserve genutzt. Daher ist es generell sinnvoll, die Lebensdauer durch regelmäßige Inspektion der Gasleitung (tatsächlich vorliegende Ungängen) sowie Berücksichtigung der tatsächlichen Drücke und Druckschwankungen zu verifizieren.

Randbedingungen der konkreten Vergleichsberechnungen

Die Randbedingungen der hier durchgeführten bruchmechanischen Lebensdaueranalyse zur Berechnung der Gesamtlebensdauer und der Designlebensdauer lauten wie folgt:

- » Berechnung für eine Stahlgüte L235,
- » Verhältnis von Unterlast zu Oberlast pro Lastzyklus: $R = 0,5$,
- » Anfangsrisssbreite $2c_0 = 50$ mm nach DVGW G 463, Entwurf,
- » der Anfangsrisss ist als wachstumsfähig definiert,
- » Parameter der Rissfortschrittsrate nach ASME B31.12 (2019),
- » Schwellenwert der Spannungsintensität K_{IH} mit 55 MPa \sqrt{m} nach ASME B31.12 (2019).

Die restlichen Randbedingungen sind in **Tabelle 1** zusammenfassend aufgeführt. Weiterhin zeigt Tabelle 1 die Berechnungsergebnisse zur kritischen Fehlertiefe a_{crit} und -breite $2c_{crit}$ beim Erreichen der Gesamtlebensdauer

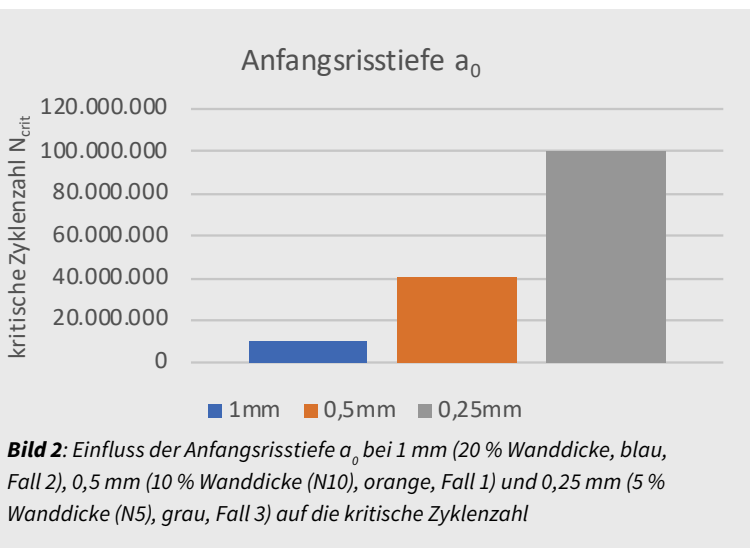


Bild 2: Einfluss der Anfangsrisstiefe a_0 bei 1 mm (20 % Wanddicke, blau, Fall 2), 0,5 mm (10 % Wanddicke (N10), orange, Fall 1) und 0,25 mm (5 % Wanddicke (N5), grau, Fall 3) auf die kritische Zyklenzahl

mit der kritischen Zyklenzahl N_{crit} . Die Designlebensdauer mit zugehöriger Designzyklenzahl wurde anhand der in ASME BPVC Sec VIII Div 3 gegebenen Kriterien ermittelt, siehe Gleichungen (1) und (2). Als zulässige Risstiefe a_{design} werden sowohl ein Viertel der Wanddicke und ein Viertel der kritischen Risstiefe a_{crit} ermittelt. Die kritische Risstiefe a_{crit} definiert sich anhand des nach ASME B31.12 (2019) geforderten Schwellenwertes der Spannungsintensität K_{IH} . Von beiden Werten gilt die kleinere Risstiefe als ausschlaggebend.

Die Ermittlung der Designzyklenzahl N_{design} bezieht die Zyklenzahl bei Erreichen der Risstiefe a_{design} und die Hälfte der Zyklen bis zum Erreichen der kritischen Risstiefe a_{crit} mit ein. Der kleinere der beiden Werte bestimmt dann die Designzyklenzahl:

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

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

mit

- a_{crit} : kritische Risstiefe, berechnet auf Basis des Schwellenwertes der Spannungsintensität K_{IH} ,
- a_{design} : für das Design / die Auslegung zulässige Risstiefe,
- N_{crit} : kritische Zyklenzahl, berechnet auf Basis des Schwellenwertes der Spannungsintensität K_{IH} ,
- N_{design} : für das Design / die Auslegung zulässige Zyklenzahl.

Ergebnisse

Fall 1 zeigt eine Berechnung für ein Leitungsrohr mit 16 bar Innendruck mit konservativen Parametern (Anfangsrisstiefe auf Basis einer N10 Prüfung, Rissfortschrittsparameter nach ASME B31.12, $R = 0,5$). Die kritische Lebensdauer ist mit über 40 Mio. Zyklen erwartungsgemäß sehr hoch. Im Vergleich dazu erträgt eine Hochdruckleitung mittlerer Rohrgröße bei 85 bar eine ca. 800-mal geringere Zyklenzahl.

Bild 2 zeigt die kritischen Zyklenzahlen bei verschiedenen Anfangsrisstiefen (Fall 1, 2 und 3). Fall 2 (blau) zeigt die Berechnung der Lebensdauer auf Basis einer angenommenen Fehlertiefe von 1 mm. Das entspricht bei 5 mm Rohrwand 20 % der Wanddicke. Eine solche Fehlertiefe ist untypisch und dient nur dem Vergleich in der vorliegenden Parameterstudie. Die berechnete kritische Zyklenzahl beträgt ca. ¼ gegenüber dem Ergebnis für Fall 1 (orange, N10) mit einer Anfangsrisstiefe von 0,5 mm. Fall 3 (grau, N5) zeigt die kritische Zyklenzahl bei einer Anfangsrisstiefe von 0,25 mm. Gegenüber dem größeren zulässigen Fehler bei einer Ultraschall-Prüfung mit N10 errechnet sich mit der geringeren Risstiefe die 2,5-fache Zyklenzahl.

Die kritischen Zyklenzahlen errechnet für verschiedene Wanddicken (Fälle 1 und 4) sind in **Bild 3** links aufgetragen. Bei gleicher Anfangsrisstiefe a_0 von 0,5 mm ergibt sich für den Fall von 7,5 mm Wanddicke eine kritische Zyklenzahl von ca. 235 Mio. Das entspricht fast dem sechsfachen gegenüber Fall 1 mit einer Wanddicke von 5 mm. **Bild 3** rechts zeigt die kritische Zyklenzahl auf Basis verschiedener Rohrdurchmesser (Fall 1 und Fall 5). Die zu erwar-

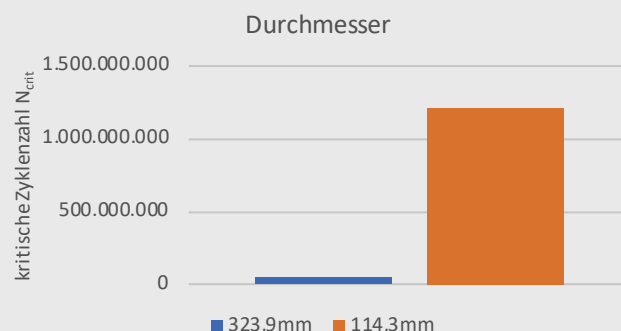
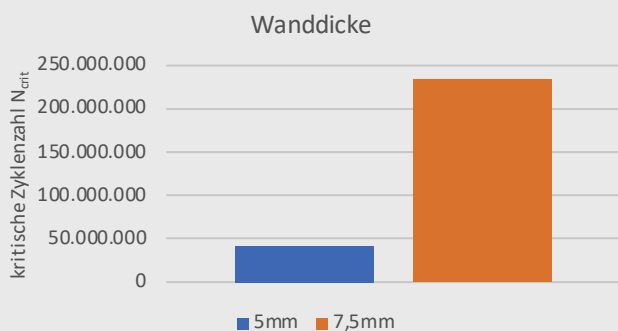


Bild 3: Einfluss der Rohrabbmessungen auf die kritische Zyklenzahl; links bildet die kritischen Zyklenzahlen auf Basis einer Wanddicke von 5 mm (blau, Fall 1) und 7,5 mm (orange, Fall 4) ab; rechts zeigt die kritischen Zyklenzahlen bei unterschiedlichen Durchmessern 323,9 mm (blau, Fall 1) und 114,3 mm (orange, Fall 5)

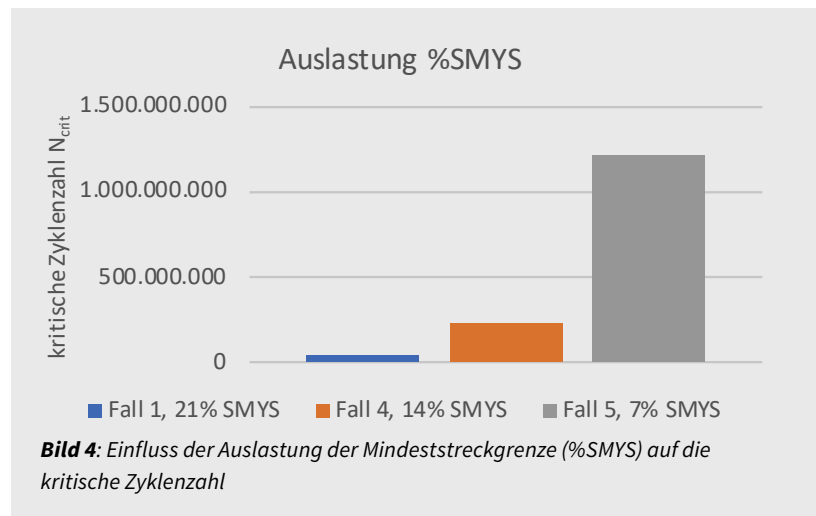
tende kritische Zyklenzahl beim kleineren Durchmesser (114,3 mm) ist ca. 30-mal höher als beim Durchmesser 323,9 mm.

Der Einfluss der Auslastung der Mindeststreckgrenze (%SMYS) auf die Ergebnisse der kritischen Zyklenzahlen (Fall 1, 4 und 5) kann **Bild 4** entnommen werden. Fall 1 (blau) zeigt mit 21 % SMYS die größte Auslastung. Mit sinkender Auslastung für Fall 4 (orange, 14 % SMYS) und Fall 5 (grau, 7 % SMYS) steigt die kritische Zyklenzahl exponentiell an. Eine geringere Auslastung des Rohrleitungswerkstoffes ist folglich der Verlängerung der Lebensdauer zuträglich.

Schlussfolgerungen

Die Randbedingungen zur Berechnung der bruchmechanischen Lebensdauer sind ausschlaggebend für die Lebensdauer von Rohrleitungen. Die Parameterstudie hat gezeigt, dass verschiedene Eingangsgrößen unterschiedlich starken Einfluss nehmen können. Zum einen erhöht die Reduzierung der Belastung der Rohrleitung durch den Innendruck bzw. Druckschwankungen deren Lebensdauer. Hierzu können eine Erhöhung von Rohrwanddicke sowie eine Reduzierung des Leitungsdurchmessers oder des Leitungsdrukkes beitragen. Bei den letzteren ergibt sich jedoch auch gleichzeitig eine Verringerung der durchgesetzten Menge des transportierten Mediums. Zum anderen spielt die Ultraschallprüfung vor Inbetriebnahme eine entscheidende Rolle. Je schärfer die Prüfkriterien sind, desto kleiner kann in der bruchmechanischen Berechnung der Lebensdauer die Anfangsrisstiefe angenommen werden, was zu einer Erhöhung der erreichbaren Zyklenzahlen führt.

Bei Nieder- oder Mitteldruckleitungen bis ca. 16 bar ist die Belastung durch Innendruck und Druckschwankungen in der Regel so niedrig, dass sich eine sehr lange Lebensdauer auch mit den Parametern aus ASME B31.12 (2019) bei den üblichen Abmessungen ergibt. Viele dieser Stahlleitungen profitieren von einer „Überdimensionierung“ der Rohrwanddicke. Ursache hierfür ist oftmals die Schwierigkeit, bei der Herstellung und Weiterverarbeitung (z. B. dem Rundnahtschweißen auf der Baustelle) von Leitungen, deren rechnerische Wanddicke im Bereich von etwa 2 mm liegt. Somit führt die erhöhte Wanddicke zu einer sehr geringen Auslastung bezogen auf die Streckgrenze des Rohrleitungsmaterials. Die Herangehensweise des DVGW-Entwurfs der G 463 auf eine bruchmechanische Analyse bei diesen Leitungen zu verzichten, ist folglich plausibel. Ebenso schreibt die ASME B31.12 (2019) bei einer Beanspruchung des Rohres in Umfangsrichtung durch den Betriebsdruck der Leitung von weniger als 40 % bezogen auf die Mindeststreckgrenze (SMYS) keine Lebensdaueranalyse auf Basis der Bruchmechanik vor. Für den Betrieb von Hochdruckleitungen mit Auslastungen von z. B. 72 % SMYS hingegen sind Lebensdaueranalysen und Inspektionen sinnvoll, da die Lebensdauer aufgrund der Betriebsbedingungen wesentlich kürzer ist. Beispielberechnungen und nähere Hintergründe der bruchmechanischen Analyse gibt [2].



Literatur

- [1] Hydrogen Council (2020). "Path to hydrogen competitiveness - A cost perspective"
- [2] Golisch, G.; Kalwa, C.; Brauer, H. (2021) „Wirkung von Wasserstoffgas auf Stahlrohre – eine bruchmechanische Betrachtung“. 3R (2021), Nr. 10/11
- [3] ASME B31.12 (2019) "Hydrogen Piping and Pipelines" The American Society for Mechanical engineers, New York, USA
- [4] DVGW G 463 Entwurf „Gashochdruckleitungen aus Stahlrohren für einen Auslegungsdruck von mehr als 16 bar; Errichtung" (2021-02)
- [5] Slifka, A. J. 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
- [6] BS 7910: 2019 - "Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures"
- [7] ASME BPVC (2013) „ASME BPVC Section VIII Division 3 (2013) Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels"

SCHLAGWÖRTER: Wasserstoff, H₂, Stahlrohre, Bruchmechanik

AUTOREN



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



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