

H₂



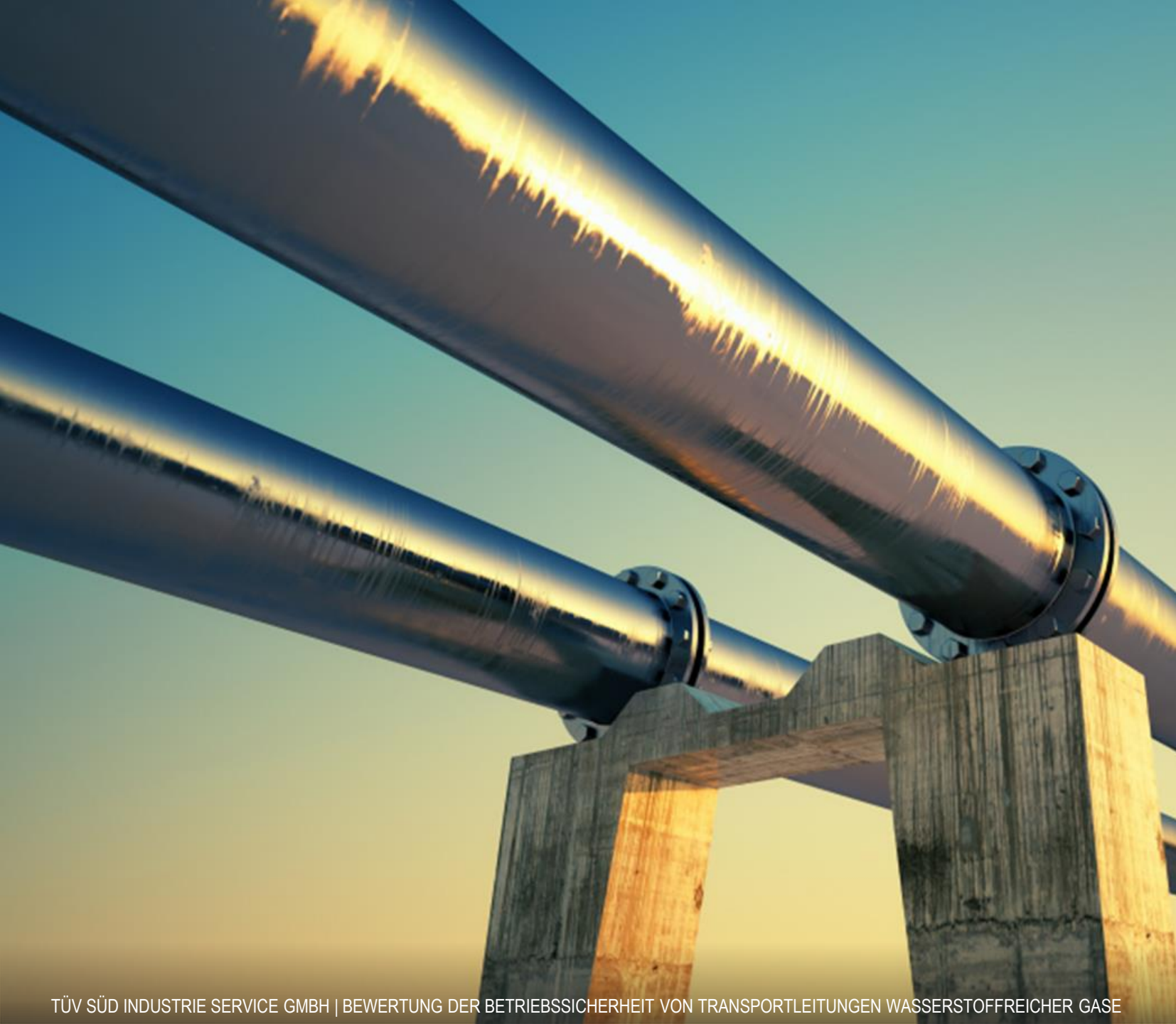
Mehr Wert.
Mehr Vertrauen.

Bewertung der Betriebssicherheit

von Transportleitungen
wasserstoffreicher Gase
(Erdgas-Wasserstoff-Gemische)

Dr. Jörg Sager

TÜV SÜD Industrie Service GmbH



Mehr Wert.
Mehr Vertrauen.

H₂-PIMS –

Pipe Integrity Management System (PIMS) zur Bewertung vorhandener Erdgasleitungen für den Transport von Wasserstoff

Inhalt

- Ausgangssituation und Herangehensweise
- Wasserstoff und Werkstoffeigenschaften
- Bewertung nach Fatigue Assessment Diagram
- Spannungsbewertung mit Finiter Elemente Methode (FEM)
- Rissbewertung mit Bruchmechanik
- Lebensdauerüberwachung durch Rissfortschrittberechnung am Beispiel
- Probalistische Bewertung
- Zusammenfassung und Ausblick

HYPOS-PIMS – Umwidmung von Erdgasleitungen für den Transport von Wasserstoff

Ausgangssituation, Herangehensweise

Ausgangssituation

- Wasserstoff ist ein zentrales Element der Energiewende, um regenerativ erzeugte Elektroenergie in eine speicherfähige und einfach transportierbare Energieform zu transformieren. Die vorhandene Erdgas-Infrastruktur soll für Transport und Speicherung von Wasserstoff verwendet werden.

Herangehensweise

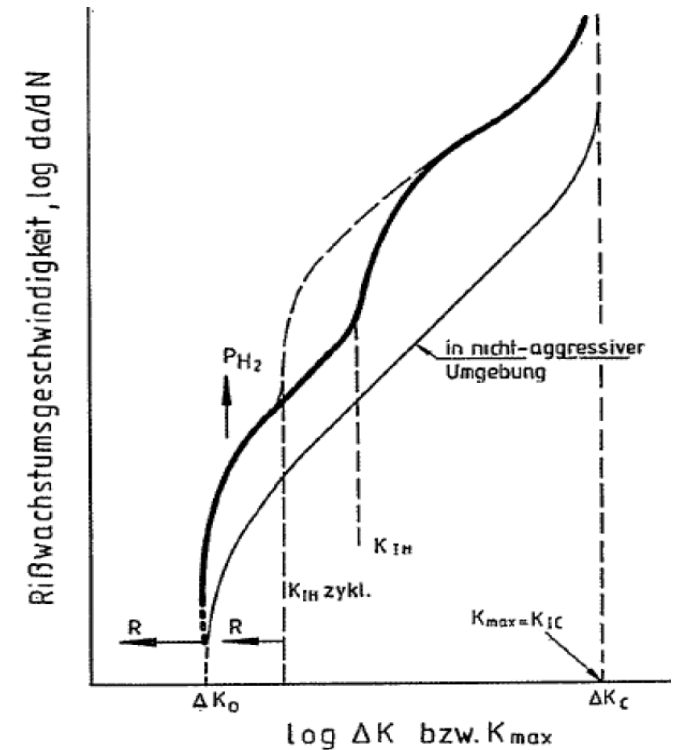
- die Bewertung des aktuellen und künftigen Zustands des Gastransportnetzes sowie daraus abgeleitete Maßnahmen zur Ertüchtigung erfolgt durch Pipe Integrity Management Systeme (PIMS) nach deterministischen (oder probabilistischen) Verfahren.
- in die Bewertung mittels zustandsbeschreibender Modelle und Algorithmen fließen ein
 - Dimensionierung (Geometrische Parameter)
 - Belastung (Drücke / Druckschwankungen)
 - Werkstoffeigenschaften (Bruchzähigkeit)
 - festgestellte / unterstellte Fehler (Risse, Kerben)

HYPOS-PIMS – Umwidmung von Erdgasleitungen für den Transport von Wasserstoff

Wasserstoff und Werkstoffeigenschaften

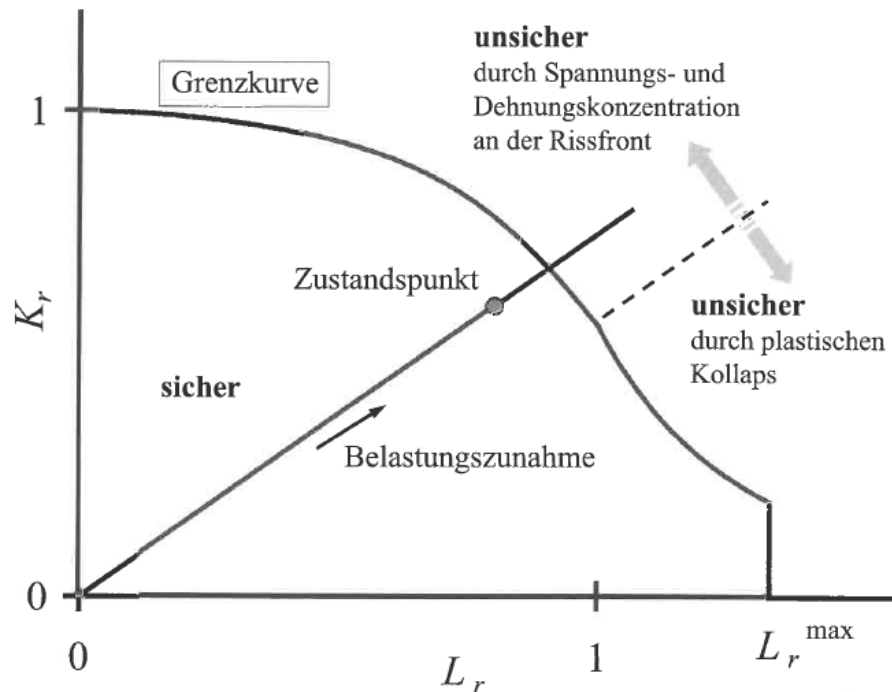
- ein Einfluss von Wasserstoff auf Werkstoffeigenschaften ist zu berücksichtigen, wenn folgende Kriterien zutreffen:
 - atomarer Wasserstoff liegt vor
 - hochfeste Stähle (ferritische Stähle, Zugfestigkeit ≥ 800 MPa)
 - Ungängen (Risse, Kerben) sind vorhanden
 - Relevante Lastwechsel treten auf
 - Festigkeitskennwerte (Streckgrenze, Zugfestigkeit) nehmen ab
 - Bruchzähigkeit nimmt ab
- der Einfluss von Wasserstoff wird über die Werkstoffeigenschaften berücksichtigt, die durch Werkstoffuntersuchungen (z. B. Zugversuche, Kerbschlagbiege- und Risswachstumsversuche) an Bestandswerkstoffen der Gasindustrie ermittelt werden
- vor diesem Hintergrund wurde das Forschungsprojekt HYPOS initiiert.

<http://www.hypos-eastgermany.de/>



HYPOS-PIMS – Umwidmung von Erdgasleitungen für den Transport von Wasserstoff

Bewertung nach FAD-Kurve (Fatigue Assessment Diagram) – FAD-Kurve nach API 579



FAD-Kurve (Fatigue Assessment Diagram)

(Quelle: FKM-Richtlinie Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile)

Zustandsbewertung von Rohrleitungen und Komponenten anhand der Parameter Spannungsintensität und Lastintensität

Spannungsintensität an der Rissspitze

$$K_r = \frac{K_I}{K_{IC}} = \frac{\text{Spannungsintensität}}{\text{Bruchzähigkeit}}$$

Lastintensität im tragenden Restquerschnitt

$$L_r = \frac{\sigma_{Ref}}{\sigma_{ys}} = \frac{\text{Referenzspannung}}{\text{Streckgrenze (yield stress)}}$$

Spannungsintensität

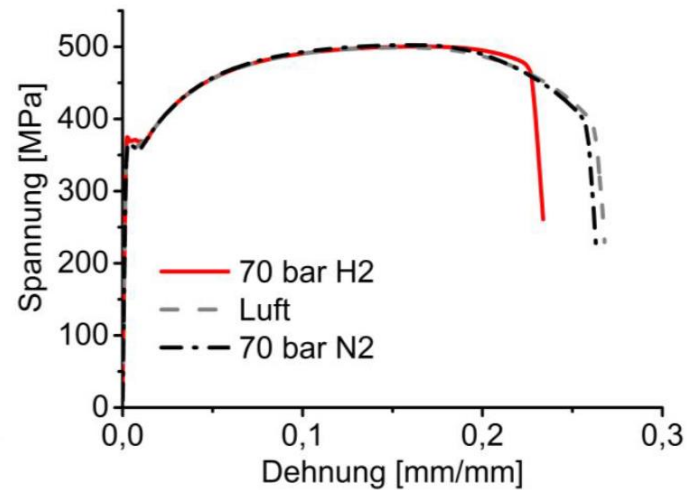
$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} Y \text{ in } \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$$

Referenzspannung

$$\sigma_{Ref} = \sqrt{\sigma_{tan}^2 + 3\tau^2}$$

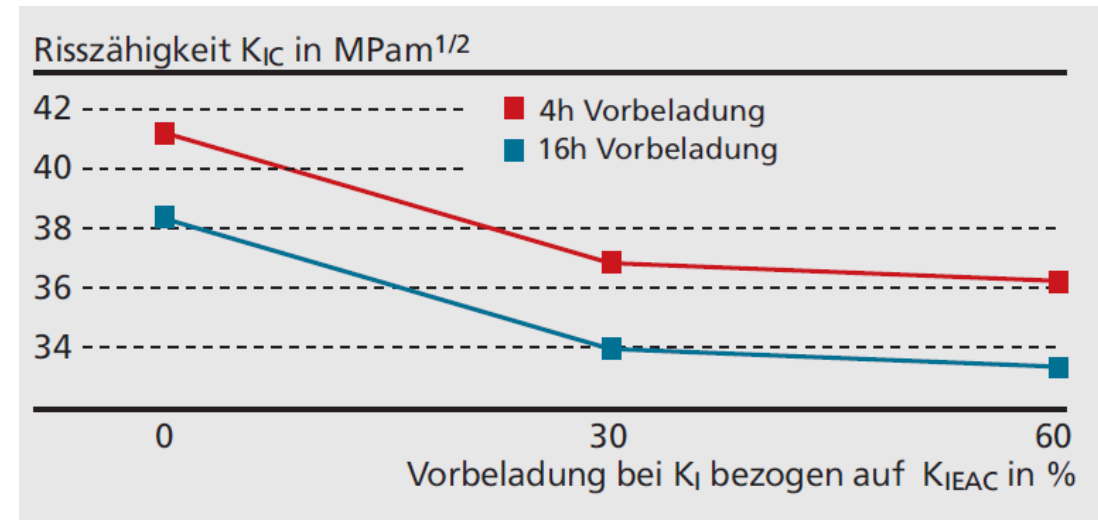
HYPOS-PIMS – Umwidmung von Erdgasleitungen für den Transport von Wasserstoff

Werkstoffuntersuchungen der FHG IWM Freiburg



Quelle: FHG IWM Freiburg

- Streckgrenze bleibt unbeeinflusst
- Zugfestigkeit bleibt unbeeinflusst



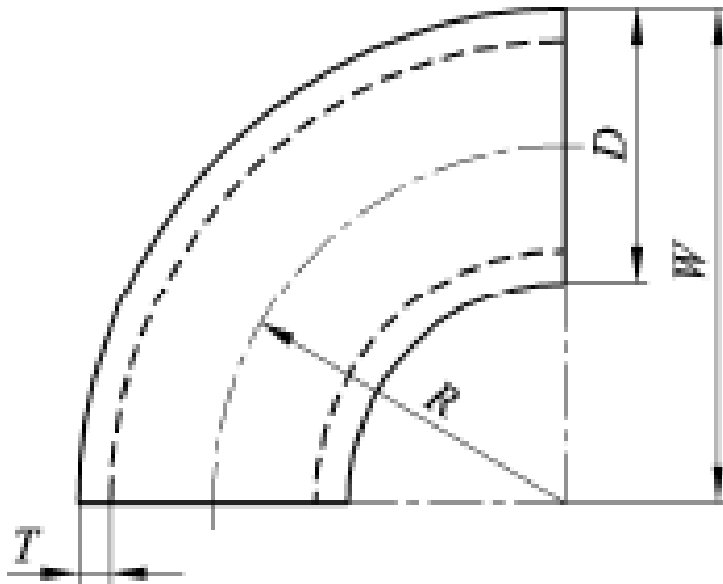
Quelle: FHG IWM Freiburg

- Bruchzähigkeit sinkt mit zunehmender H2-Beladung
- Bruchzähigkeit sinkt mit zunehmender Spannungsintensität

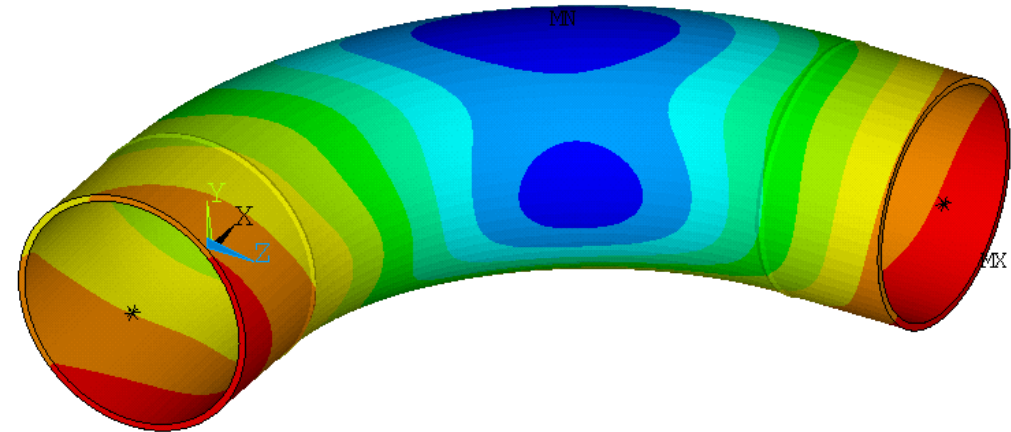
HYPOS-PIMS – Umwidmung von Erdgasleitungen für den Transport von Wasserstoff

Rohrbogen mit charakteristischen Abmessungen

Spannungsverteilung am FEM-Modell



Quelle: DIN EN 10253-2:2008-09



Quelle: eigene Berechnungen

HYPOS-PIMS – Umwidmung von Erdgasleitungen für den Transport von Wasserstoff

Datensatz der Spannungsverteilung im Bauteil

Da1 = 324. mm
 sld2 = 6. mm
 p_bar = 25. bar

| n_konf | lfd N | Knoten | Radius | Winkel | Axiale | SEQV | S1 | S2 | S3 | SX | SY | SZ | SXY | SYZ | SXZ |
|--------|-------|------------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|----------|---------|--------|---------|
| 1. | 1. | 47926.0000 | 155.6500 | 0.0000 | 500.3209 | 129.6135 | 146.1553 | 56.7011 | -2.4859 | -2.4852 | 56.7013 | 146.1543 | 0.0053 | 0.1528 | 0.3213 |
| 1. | 2. | 47928.0000 | 155.6500 | 0.0000 | 492.6418 | 132.6678 | 149.6323 | 57.8576 | -2.4803 | -2.4776 | 57.8579 | 149.6293 | 0.0007 | 0.1604 | 0.6407 |
| 1. | 3. | 47930.0000 | 155.6500 | 0.0000 | 484.9626 | 137.6606 | 155.3732 | 60.1918 | -2.4709 | -2.4653 | 60.1921 | 155.3673 | 0.0001 | 0.1602 | 0.9443 |
| 1. | 4. | 47932.0000 | 155.6500 | 0.0000 | 477.2835 | 144.3115 | 163.1423 | 64.2622 | -2.4565 | -2.4479 | 64.2625 | 163.1334 | -0.0001 | 0.1590 | 1.1934 |
| 1. | 5. | 47934.0000 | 155.6500 | 0.0000 | 431.2088 | 147.1485 | 147.9491 | 140.9420 | -2.5778 | -2.3491 | 140.9454 | 147.7170 | -0.0006 | 0.1538 | -5.8631 |
| 1. | 6. | 49487.0000 | 155.8043 | 0.0000 | 423.8026 | 141.8579 | 155.2536 | 115.8232 | -2.1482 | -1.8676 | 155.2529 | 115.5432 | -0.0029 | 0.1569 | -5.7472 |
| 1. | 7. | 49489.0000 | 156.2660 | 0.0000 | 416.4092 | 151.3748 | 171.5433 | 100.5172 | -2.2838 | -2.1586 | 171.5429 | 100.3924 | -0.0034 | 0.1623 | -3.5858 |
| 1. | 8. | 49491.0000 | 157.0348 | 0.0000 | 409.0414 | 162.9840 | 185.9845 | 93.4736 | -2.2043 | -2.1260 | 185.9842 | 93.3956 | -0.0040 | 0.1669 | -2.7373 |
| 1. | 9. | 49493.0000 | 158.1124 | 0.0000 | 401.7124 | 172.2035 | 196.4123 | 89.3065 | -2.2279 | -2.1503 | 196.4120 | 89.2292 | -0.0048 | 0.1703 | -2.6637 |
| 1. | 10. | 49495.0000 | 159.5025 | 0.0000 | 394.4362 | 177.4283 | 201.9236 | 84.8222 | -2.2165 | -2.1117 | 201.9233 | 84.7177 | -0.0057 | 0.1722 | -3.0182 |

Datensatz für eine Bauteil-Konfiguration enthält

- Position (Parameter x, r, j)
- Spannungen (Vergleichsspannung, Hauptspannungen S1-S3, Spannungskomponenten σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz})

HYPOS-PIMS – Umwidmung von Erdgasleitungen für den Transport von Wasserstoff

Risskategorisierung nach FKM-Richtlinie “Bruchmechanik“

Hohlzylinder unter variabler Spannung mit axialen Rissen

- Langer Oberflächenriss innen (1) / außen (2)
- Halbelliptischer Oberflächenriss innen (3) / außen (4)

Hohlzylinder unter variabler Spannung mit azimuthalen Rissen

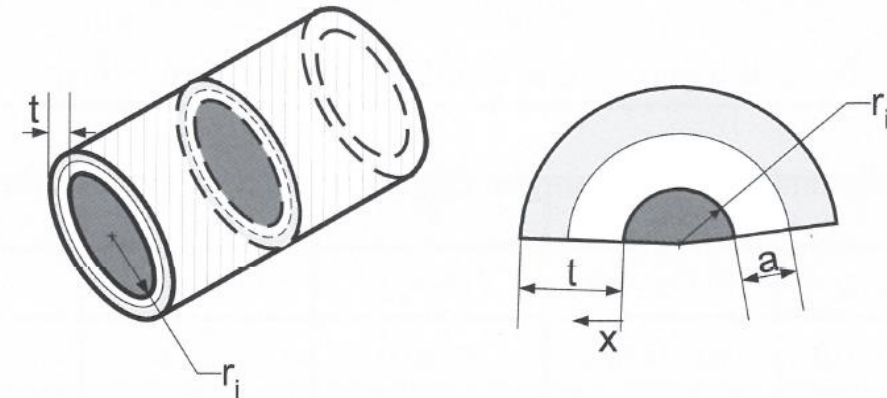
- Langer Oberflächenriss innen (5) / außen (6)
- Halbelliptischer Oberflächenriss innen (7) / außen (8)

Hohlzylinder unter Innendruck mit axialen Rissen

- Durchriss (9)
- Langer Oberflächenriss innen (10) / außen (11)
- Halbelliptischer Oberflächenriss innen (12) / außen (13)

Hohlzylinder unter Innendruck und Biegung mit azimuthalen Rissen

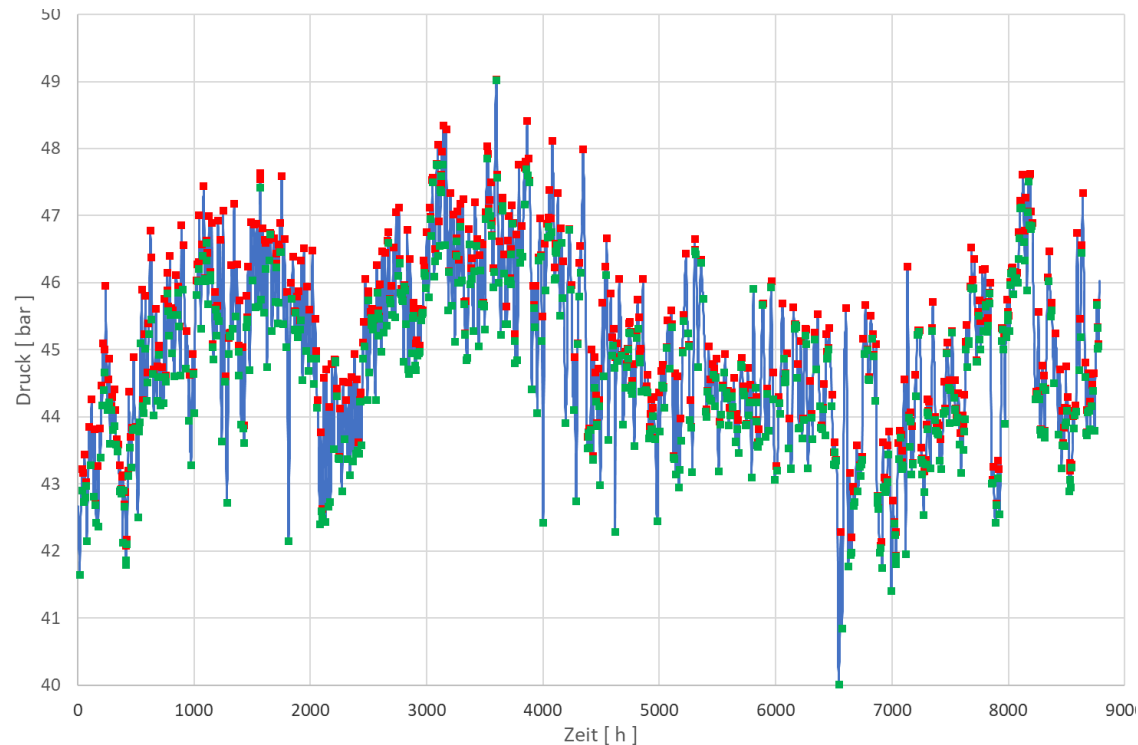
- Durchriss (14)
- Segmentförmiger Oberflächenriss mit konstanter Tiefe innen (15)
- Halbelliptischer Oberflächenriss innen (16) / außen (17)



Quelle: FKM-Richtlinie “Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“

HYPOS-PIMS – Umwidmung von Erdgasleitungen für den Transport von Wasserstoff

Lastganganalyse



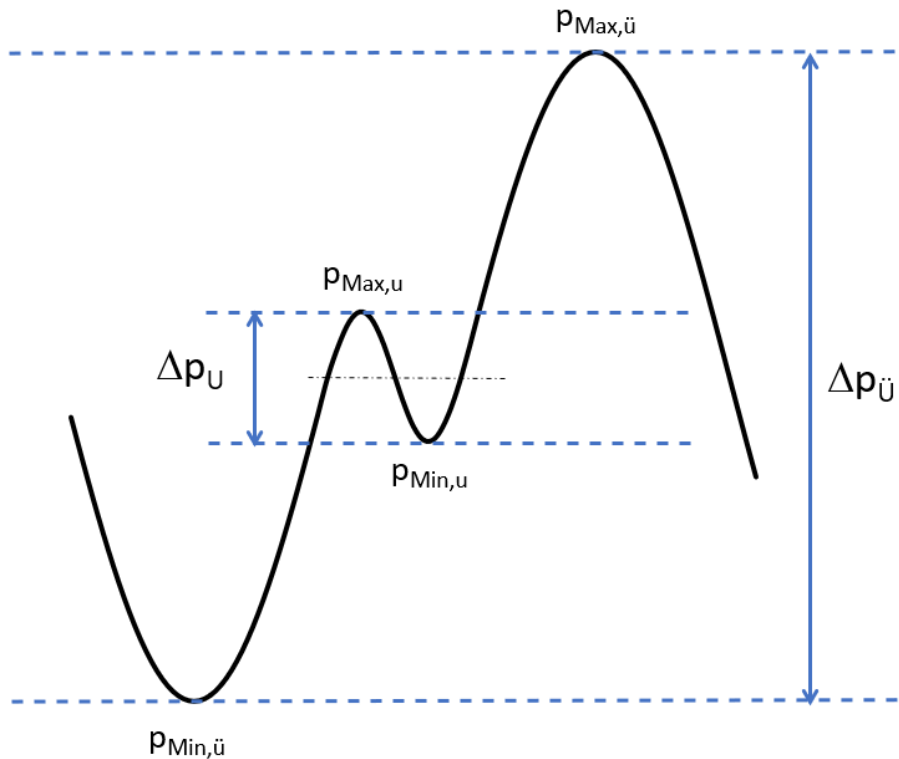
Auswertung des Lastprofils nach Amplitude und Anzahl der auftretenden Lastwechsel

- temporäres Maximum
- temporäres Minimum

Repräsentatives Lastprofil (Innendruck) einer Gashochdruckleitung

HYPOS-PIMS – Umwidmung von Erdgasleitungen für den Transport von Wasserstoff

Lastwechselanalyse



- Clusterung des Betriebsdruckes
- Zählung der Lastwechsel pro Cluster
- Umrechnung der Lastwechselzahl in äquivalente Lastwechsel der Referenzschwingbreite
- Referenzschwingbreite = Vollastwechsel (empfohlen)

$$\Delta N_{\text{äqui}} = \left(\frac{\Delta p_{\text{Ref}}}{\Delta p_i} \right)^n \quad n = 3 \dots 3,5$$

HYPOS-PIMS – Umwidmung von Erdgasleitungen für den Transport von Wasserstoff

Lastwechselzählung

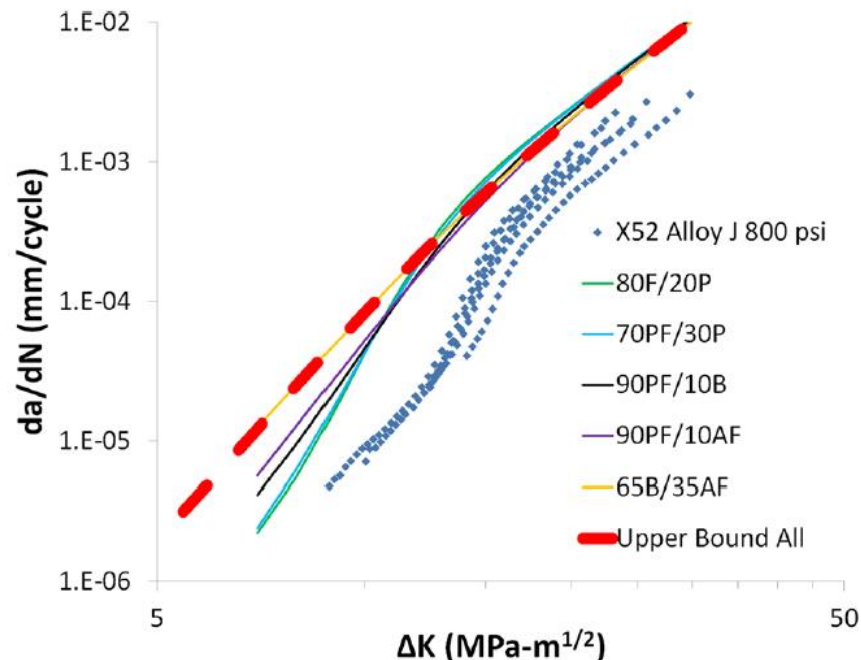
| Druckschwankung | Lastwechsel | | Umrechnungsfaktor | Äquivalente Lastwechsel Volllastschwankungen | |
|------------------|-------------|------------------------|-------------------|--|------------------------|
| | 2017 - 2019 | Lebensdauer (50 Jahre) | | 2017 - 2019 | Lebensdauer (50 Jahre) |
| Δp | Anzahl | Anzahl | [-] | Anzahl | Anzahl |
| 2 bar | 1043 | 26075 | 0,000064 | 0 | 2 |
| 4 bar | 54 | 1350 | 0,000512 | 0 | 1 |
| 6 bar | 132 | 3300 | 0,001728 | 0 | 6 |
| 8 bar | 11 | 275 | 0,004096 | 0 | 1 |
| 10 bar | 11 | 275 | 0,008 | 0 | 2 |
| 50 bar | (2) | (50) | 1 | (2) | (50) |
| Summe (2-10 bar) | 1.251 | 31.275 | | 0 | 11 |
| Summe | (1.253) | (31.325) | | 2 | 61 |

- Anteil kleiner und mittlerer Lastschwankungen an Äquivalent-Lastwechselzahl gering
- vollständige Entlastungen bei Stillständen und Reparaturen etc. haben größten Anteil an Äquivalent-Lastwechselzahl
- Gashochdruckleitungen und Gasspeicher unterscheiden sich grundlegend

Äquivalente (Innendruck-) Lastwechsel einer Gashochdruckleitung

HYPOS-PIMS – Umwidmung von Erdgasleitungen für den Transport von Wasserstoff

Hydrogen Piping and Pipelines – ASME B31.12



Quelle: Journal of Pressure Vessel Technology, APRIL 2018, Vol. 140

Die Norm ASME B31.12 beschreibt die Prüfung der Integrität einer Rohrleitung für den Fall, dass bei der Inspektion der Leitung Fehler festgestellt werden.

“Aus Gründen der Praktikabilität wird das Risswachstum aller API-X-Stähle mit folgender konservativen oberen Grenzkurve da/dN_{total} definiert.“

Spezifischer Rissfortschritt nach ASME B31.12

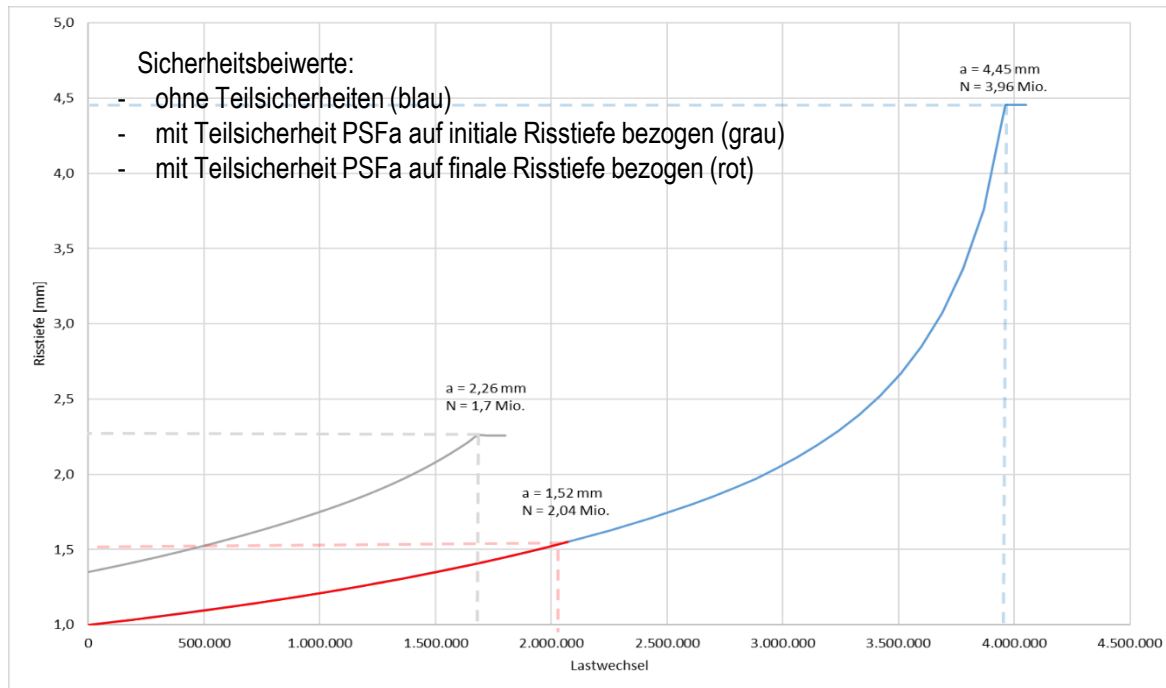
$$da/dN = f(\Delta K, a_i, b_i)$$

Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors

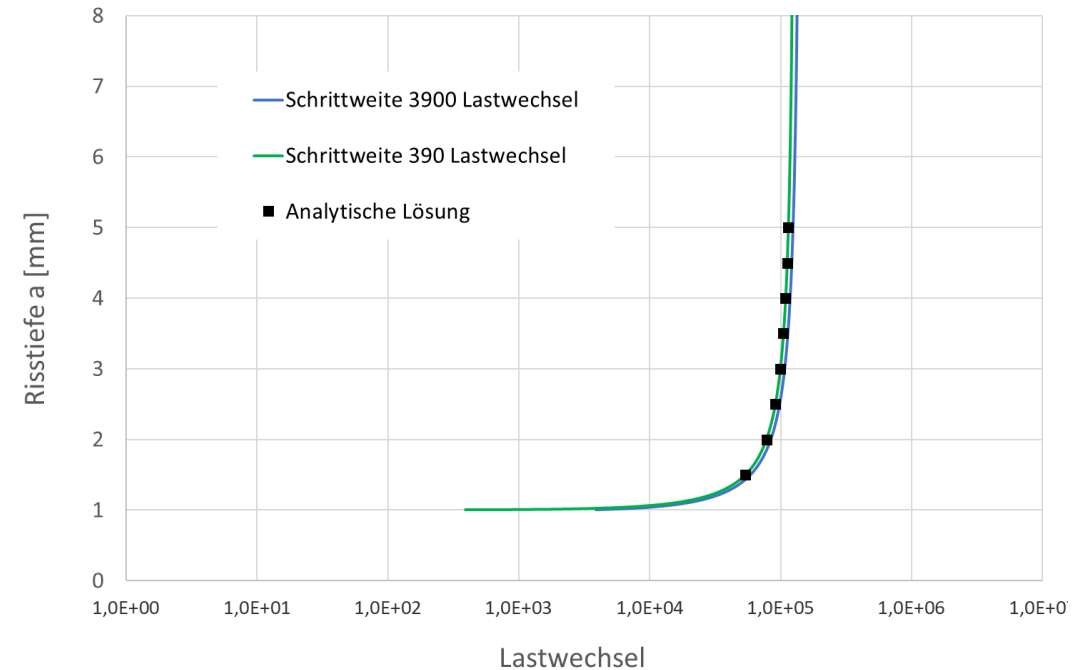
$$\Delta K = \Delta \sigma \cdot F \cdot \sqrt{\pi a}$$

HYPOS-PIMS – Umwidmung von Erdgasleitungen für den Transport von Wasserstoff

Lebensdauerüberwachung durch Rissfortschrittberechnung – zulässige Lastwechsel bis zur kritischen Risttiefe



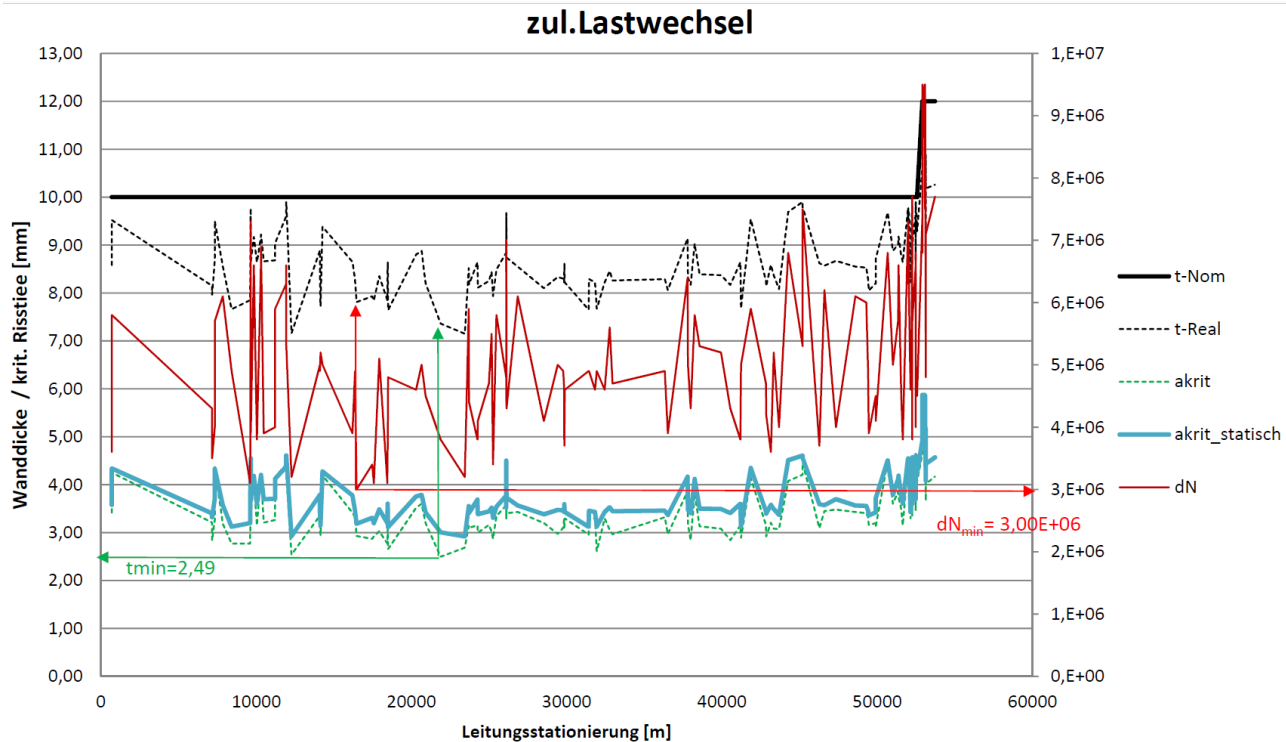
Quelle: Eigene Berechnungen nach API 579



Quelle: Eigene Berechnungen nach ASME B31.12

HYPOS-PIMS – Umwidmung von Erdgasleitungen für den Transport von Wasserstoff

Deterministische Leitungsbewertung mittels PIMS



Netzbewertung auf Basis von:

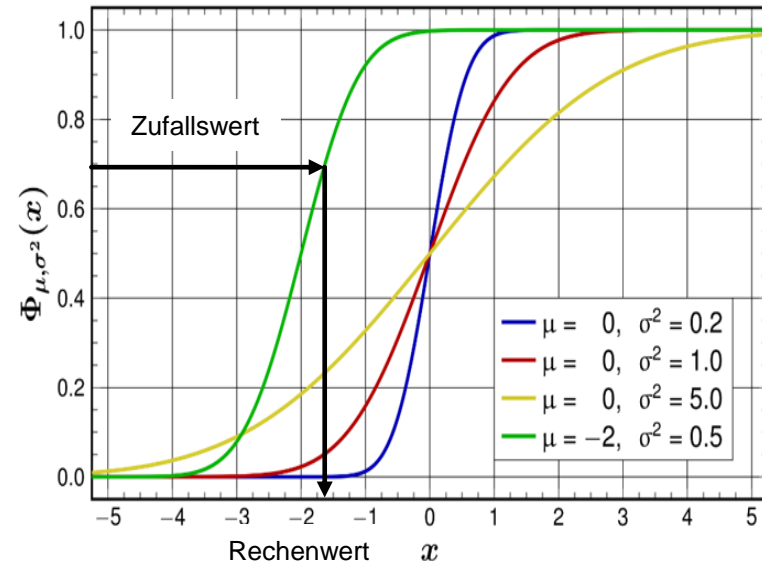
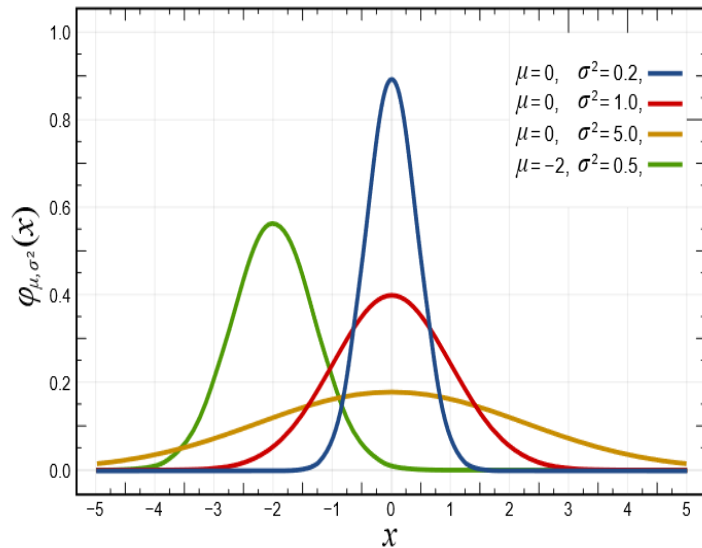
- Leitungsgeometrie
- Werkstoffeigenschaften (abhängig von H₂-%)
- Lastkollektiv
- festgestellter / postulierter Fehler

Ergebnis

- Lastwechsel bis zum Erreichen kritischer Risstiefen
- Ableiten von Inspektions- und Wartungsintervallen

HYPOS-PIMS – Umwidmung von Erdgasleitungen für den Transport von Wasserstoff

Probabilistische Bewertung – Wahrscheinlichkeitsdichte und Verteilungsfunktion

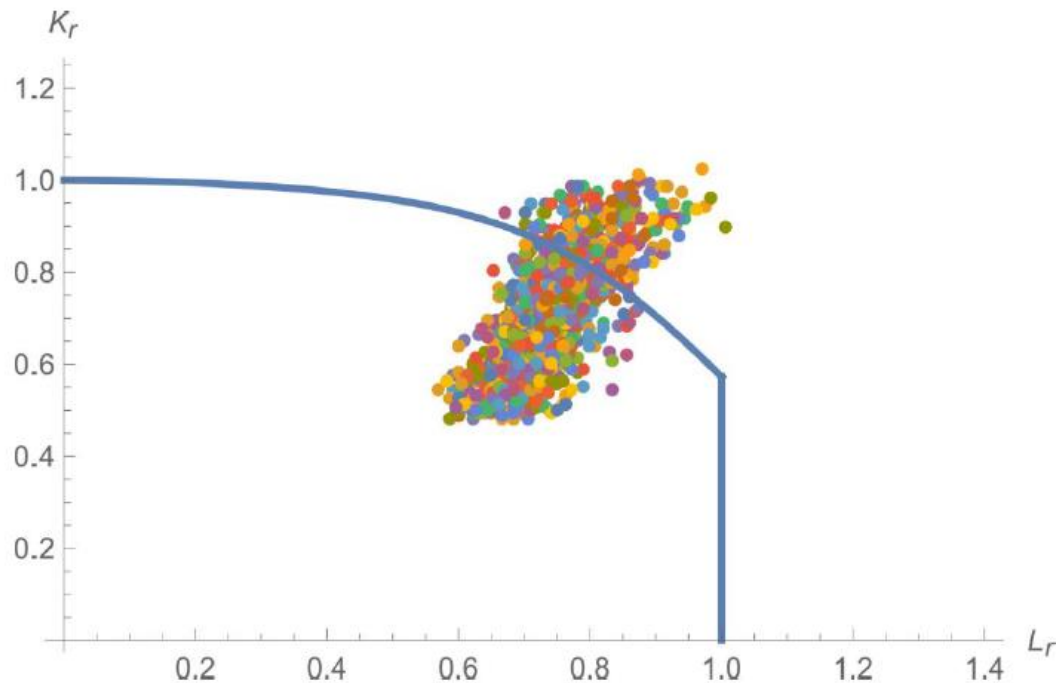


Quelle: Wikipedia

1. Definition von Einflussgrößen und deren Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
2. Integration der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zur Erlangung der Verteilungsfunktion
3. Ermittlung einer Zufallszahl x aus der Verteilungsfunktion und der stochastischen Variable

HYPOS-PIMS – Umwidmung von Erdgasleitungen für den Transport von Wasserstoff

Statistische Bewertung mittels FAD-Grenzkurve



Quelle: Ingenieurbüro Veenker

4. Deterministische Ermittlung der Parameter L_r und K_r zur Bewertung anhand des FAD-Konzeptes (Wiederholung für 1.000 // 10.000 // 100.000 Werte)
5. Bestimmung der Anzahl der zulässigen Konfigurationen im Verhältnis zur Gesamtzahl aller betrachteten Konfigurationen

$$P = \frac{n_{zul}}{N_{ges}} \quad (\text{Wahrscheinlichkeit des Überlebens})$$

6. Bei zulässigem Betrieb einer rissbehafteten Komponente folgt die Fragestellung nach der kritischen Risslänge bzw. der zulässigen Lastwechsel bis zum Kollaps

HYPOS-PIMS – Umwidmung von Erdgasleitungen für den Transport von Wasserstoff

Zusammenfassung und Ausblick

- Für die Bewertung der Betriebsfestigkeit vorhandener Gasleitungen zum Transport von Wasserstoff stehen deterministische und probabilistische Werkzeuge zur Verfügung.
- Der Einfluss von Wasserstoff auf die Werkstoffeigenschaften ist zu berücksichtigen und notwendige Voraussetzung für die Integritätsbewertung.
- Gesetzliche Regelungen (Normen) müssen diesbezüglich aktualisiert werden.
- Der Rückblick auf die Ausgangssituation zeigt:
Es liegt kein atomarer Wasserstoff vor, Leitungen bestehen nicht aus hochfesten Stählen, es gibt keine bekannte Schädigungen (sonst Reparatur), meist keine relevanten Lastwechselzahlen und es gibt keine festgestellte Reduzierung der Festigkeitskennwerte (bei ausstehender Bewertung bruchmechanischer Kennwert).
- Ziel der Integritätsbewertung:
Es ist nicht das Ziel, eine Leitung mit bekannten Rissen zuzulassen, sondern der Nachweis der Integrität von Leitungen für den nicht vorhersehbaren Fall vorhandener Risse.



Mehr Wert.
Mehr Vertrauen.

Kontakt

Dr. Jörg Sager

Niederlassung Dresden

Telefon +49 (0)351 4202-332

Mobil +49 (0)160 360 1646

E-Mail: joerg.sager@tuvsud.com

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.
Für Fragen stehe ich gern zur Verfügung.

