

Bruchmechanische Bewertung von Imperfektionen in Schweißnähten von Offshore-Rohrleitungen

R. Hamann, Germanischer Lloyd, Hamburg

Kurzfassung

Die zerstörungsfreie Bauteilprüfung soll sicherstellen, dass eine Konstruktion seine mit der Auslegung geprüfte Funktion mit ausreichender Sicherheit beziehungsweise akzeptabler Ausfallhäufigkeit erfüllt. Dementsprechend muss die angewendete zerstörungsfreie Prüfmethode geeignet sein, die für die Sicherheit eines Bauteils relevanten Fehlstellen beziehungsweise Fehlstellen von unzulässiger Größe zu finden. Doch was sind Fehlstellen unzulässiger Größe?

In nationalen (zum Beispiel AD-Merkblätter HP5/3) und internationalen Standards beziehungsweise Normen (zum Beispiel EN 12732, API 1104) sind Grenzwerte für unterschiedliche Fehlertypen und Prüfmethoden angegeben, das heißt, die maximal zulässige Größe wird definiert. Dabei handelt es sich in der Regel um Grenzwerte, die für alle Bauteile des Anwendungsgebietes gültig sind. Diese Normen gestatten jedoch keine Berücksichtigung der tatsächlichen Gegebenheiten zum Beispiel hinsichtlich der Beanspruchungen oder der erreichten Zähigkeit im Schweißnahtbereich. Lediglich bei der Betriebsfestigkeitsanalyse werden Grenzwerte der Fehlstellenabmessungen in Verbindung mit der Wöhlerlinie (Beanspruchungen, Lastwechsel) definiert (zum Beispiel EUROCODE III, 1990).

Als Ergänzung oder Alternative zu diesen Standards und Normen bietet die Bruchmechanik die Möglichkeit, Bewertungskataloge mit Fehlstellengrenzwerten speziell für die gestellte Prüfaufgabe zu entwickeln beziehungsweise auch Anforderungen an die Prüfmethode zu definieren.

In diesem Beitrag wird für ein Beispiel aus dem Offshore Bereich, der Schweißnahtprüfung der Umfangsnähte, die Vorgehensweise bei der Definition eines Bewertungskataloges kurz erläutert und einige Vorteile gegenüber den traditionellen Kriterien aufgeführt. Ferner wird aufgezeigt welche Bereiche durch die Entwicklung bruchmechanisch basierter Schweißnahtabnahmekriterien berührt und welche Eingangsgrößen benötigt werden. Durch einen Vergleich zwischen Messung und Rechnung für Berstversuche an Druckbehältern wird die gegenwärtig erreichbare Vorhersagegenauigkeit für Rohrleitungsfehlstellen demonstriert.

1 Beitrag der Bruchmechanik zur zerstörungsfreien Prüfung

Die Aufgabe der zerstörungsfreien Prüfung ist es, diejenigen Fehlstellen im Werkstoff eines Bauteils aufzufinden, von denen erwartet wird, dass sie in dem angestrebten Nutzungszeitraum zu einem lokalen oder globalen Versagen führen können.

Die hierzu eingesetzten Prüfmethoden, wie Farbeindringung, Magnetpartikel, Durchstrahlung oder Ultraschall unterscheiden sich so zum Beispiel hinsichtlich der identifizierbaren Fehlstellentypen (eingeschlossene – oberflächliche), der Bestimmungsgenauigkeit der Abmessungen und der Entdeckungswahrscheinlichkeit. So besteht zum Beispiel die Möglichkeit mit dem Ultraschallverfahren die Fehlstellenabmessungen Höhe und Länge sowie bei eingeschlossenen Fehlstellen

deren Lage bezüglich der Bauteiloberfläche zu ermitteln, wobei jedoch keine Unterscheidung zwischen Poren, Bindefehlern und Schlackeeinschlüssen möglich ist. Diese Differenzierung erlaubt die Durchstrahlungsprüfung ohne jedoch genaue Angaben zur Fehlstellenhöhe zu gestatten.

Da sich in jedem Bauteil, ob Guss oder Schweißkonstruktion, herstellungsbedingte Fehlstellen befinden, die bei ausreichend genauer Prüfung auch gefunden werden, ist mit der zerstörungsfreien Prüfung auch immer eine Bewertung der identifizierten Fehler verbunden. Ziel der Bewertung ist es, eine Entscheidung über Reparatur oder Verbleib der Fehlstelle zu treffen.

Eine Möglichkeit der Bewertung für Schweißkonstruktionen aus Stahl ist der Vergleich mit den oftmals empirisch definierten Grenzwerten für Fehlstellenabmessungen, so genannter Workmanship Kriterien, wie sie in unterschiedlichen nationalen und internationalen Standards zu finden sind (AD-Merkblätter, API 1104 (1999), EN 25817(1992)). So werden zum Beispiel in der API 1104 Angaben für Grenzwerte gemacht unter Berücksichtigung unterschiedlicher Prüfverfahren. Grundvoraussetzung für eine Anwendung solcher Standards ist die Erfüllung von Anforderungen, so zum Beispiel bezüglich der Schweißnahteigenschaften und des Grundwerkstoffes (Zähigkeit, Streckgrenze, Härte, ...) bis hin zur Bauteildicke. Hierbei handelt es sich um Mindestanforderungen. Die zulässigen statischen und dynamischen Beanspruchungen sind ebenfalls durch den jeweiligen Standard beziehungsweise deren Kontext limitiert. Für die statischen Beanspruchungen werden in der Regel obere Beanspruchungsgrenzwerte auf Basis der Streckgrenze, der Zugfestigkeit und Sicherheitsfaktoren definiert.

Die oben gemachten Ausführungen zu den Workmanship Kriterien verdeutlichen, dass sie einerseits eine effiziente Bewertung von Schweißnahtfehlstellen ermöglichen, andererseits die tatsächlichen Werkstoffeigenschaften oder Beanspruchungen nur hinsichtlich der Grenzwernerfüllung berücksichtigt werden (Anwendbarkeit). Eine Übererfüllung der Anforderungen, zum Beispiel eine erhöhte Werkstoffzähigkeit, hat jedoch keinen weiteren Einfluss auf die zulässigen Fehlstellenabmessungen. Die Schweißparameter und Werkstoffeigenschaften können somit nur eingeschränkt für die Optimierung eines Bauteils oder eines Fertigungsprozesses herangezogen werden. Ferner ist zu berücksichtigen, dass wenn nur einer der zu prüfenden Parameter außerhalb des zulässigen Bereiches liegt, so ist eine Anwendung in der Regel vollständig ausgeschlossen.

Eine Alternative beziehungsweise Ergänzung zu diesen traditionellen Workmanship Kriterien bietet die Definition von Bewertungskatalogen unter Verwendung bruchmechanischer Methoden. Dieses Vorgehen ermöglicht eine Optimierung der Fertigung und zerstörungsfreien Prüfung unter Berücksichtigung der Schweißparameter, Werkstoffeigenschaften, Beanspruchungen, Fertigungstoleranzen etc. und eröffnet damit deutlich mehr Möglichkeiten.

2 Bruchmechanische Bestimmung zulässiger Fehlstellenabmessungen

In diesem Abschnitt sollen kurz die Grundlagen einer bruchmechanischen Berechnung zulässiger Fehlstellenabmessungen vorgestellt werden. Notgedrungen ist dazu eine starke Vereinfachung des gesamten Berechnungsablaufes notwendig. Umfassende Erläuterungen zur Einführung in die Bruchmechanik sind unter anderem in Schwalbe (1980), Kanninen & Popelar (1985) oder Keller (1990) enthalten. Verfahrensanweisungen zur Durchführung bruchmechanischer Bewertungen geben zum Beispiel BS 7910 (1999), SINTAP (1999) oder der neuen DVS Richtlinie (2004)

In der Bruchmechanik wird, wie generell bei der Bauteilbemessung, die Bewertung durch einen Vergleich zwischen Beanspruchung (S) und Werkstoffwiderstand (R) durchgeführt, wobei generell die drei Fälle:

$$\begin{array}{ll} <0 & \text{zulässige Beanspruchung} \\ S - R = 0 & \text{Grenzfall} \\ >0 & \text{unzulässige Beanspruchung (Versagen)} \end{array} \quad (1)$$

unterschieden werden. In diesem Fall entsprechen der Werkstoffwiderstand dem Risswiderstand (K_{mat} oder δ_{mat}) im Fehlstellenbereich und die Beanspruchungen der Rissspitzenbeanspruchung (K_I ¹). Für den Fall der linear elastischen Bruchmechanik² (LEBM) und der rein statischen Beanspruchung wächst der Riss solange nicht, so lange der Risswiderstand größer oder gleich der Rissspitzenbeanspruchung ist, das heißt eine Fehlstelle kann verbleiben so lange gilt:

$$K_{mat} \geq K_I \quad (2)$$

Die Rissspitzenbeanspruchung ist abhängig von den Abmessungen der Fehlstelle (Tiefe a und Länge $2 \cdot c$), der Bauteilgeometrie und den Beanspruchungen (σ)

$$K_I = Y(a, c) \cdot \sigma \cdot \sqrt{a \cdot \pi} \quad (3)$$

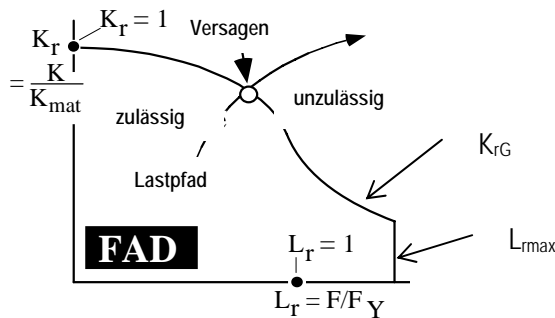
In Gl.(3) wird der Einfluss der Bauteilgeometrie und das Verhältnis von Risslänge zu Risstiefe durch die so genannte Formfunktion ($Y(a, c)$) berücksichtigt. Für die LEBM existiert eine Vielzahl von Formfunktionen für unterschiedliche Bauteilgeometrien und Rissformen (u.a. Murakami et al. 1987, 1987a, 1992). Wie bereits oben erwähnt, ist die Anwendung der LEBM beschränkt, die Entwicklung von Formfunktionen außerhalb der LEBM jedoch sehr aufwendig. Um die verfügbaren Formfunktionen auch außerhalb des Anwendungsbereiches der LEBM einsetzen zu können wurden Korrekturfunktionen eingeführt, die zu dem inzwischen weit verbreiteten FAD (Failure Assessment Diagram) führten (Abbildung 1). Die Korrektur wird dabei nicht in der Formfunktion oder Berechnung von K_I durchgeführt sondern bei der Bewertung von K_I . In dem FAD wird auf der Abszisse die normierte Beanspruchung ($L_r = F/F_Y$) aufgetragen und auf der Ordinate die normierte Rissspitzenbeanspruchungen ($K_r = K_I/K_{mat}$). In diesem Diagramm repräsentiert die Abszisse den Grenzfall des plastischen Werkstoffverhaltens und die Ordinate den Grenzfall der LEBM. Die dargestellte Grenzfunktion (K_{rG})

¹ Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf den als Mode I bezeichneten Belastungszustand. Erläuterungen zu den Belastungsmoden finden sich im Schrifttum.

² Die LEBM ist durch eine kleine plastische Zone an der Riss Spitze charakterisiert. Ist die plastische Zone groß im Verhältnis zur Risstiefe, so muss dieser Einfluss zusätzlich berücksichtigt werden.

$$K_{rG}(L_r) = (1 - 0,14 \cdot L_r^2) \cdot (0,3 + 0,7 \cdot e^{-0,65 \cdot L_r^6}) \quad (4)$$

trennt zulässigen und unzulässigen Bereich und erlaubt eine Bewertung von Fehlstellen außerhalb der LEBM unter Verwendung der bekannten Formfunktionen.



Entsprechend der Darstellung im FAD lautet die Bewertungsgleichung nun:

$$K_{rG}(L_r) \geq \frac{K_I}{K_{mat}} \quad (5)$$

Da diese Grenzfunktion theoretisch für $L_r \rightarrow \infty$ gilt, wird mit L_{rmax} ein zusätzlicher, werkstoffabhängiger Grenzwert eingeführt, durch den die plastischen Verformungen im Fehlstellenbereich begrenzt werden:

$$L_{rmax} \geq \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_Y} = \frac{F}{F_Y} \quad (6)$$

Abbildung 1: Failure Assessment Diagram zur bruchmechanischen Bewertung von Fehlstellen.

In Gl.(6) ist σ_{ref} die Referenzspannung in der Fehlstellenebene unter Berücksichtigung der durch die Fehlstelle bedingten Querschnittsverringerung und σ_Y die Werkstoffstreckgrenze im Fehlstellenbereich. Thermische oder herstellungsbedingte Zusatzspannungen werden bei der Berechnung von K_I berücksichtigt, nicht jedoch bei der Berechnung von σ_{ref} , da diese zur Rissinitiierung beitragen in der Regel jedoch nicht zum globalen Versagen.

Ist der Risswiderstand für einen Werkstoff bekannt, so kann durch Einsetzen der Gleichungen (3) und (4) in (5) eine Bestimmungsgleichung, beziehungsweise unter Berücksichtigung von (6) eine Gleichungssystem, für die zulässigen Fehlstellenabmessungen in Abhängigkeit der Beanspruchungen entwickelt werden:

$$K_{rG}(L_r) \geq \frac{Y(a,c) \cdot \sigma \cdot \sqrt{a \cdot \pi}}{K_{mat}} \quad (7)$$

Diese Gleichung ist nur in Sonderfällen nach a auflösbar. Aus Gleichung (7) ist ersichtlich, dass nun Risswiderstand und Beanspruchungen Optimierungsparameter sind. Da der Risswiderstand im Schweißnahtbereich unter anderem von Schweißzusatzwerkstoff und der Streckenenergie des Schweißvorgangs abhängen, ist die Anzahl der für die Optimierung zur Verfügung stehenden Parameter gegenüber dem Workmanship Kriterium deutlich angewachsen. Darüber hinaus besteht nun ein stetiger Zusammenhang zwischen den Beanspruchungen sowie den Werkstoffparametern und der zulässigen Fehlstellengröße.

3 Schweißnahtabnahmekriterium für Rohrleitungen

Anhand eines Beispiels soll der in Abschnitt 2 kurz beschriebene Ablauf einer bruchmechanischen Bewertung etwas detaillierter erläutert werden. Für dieses Beispiel wird die Definition eines Schweißnahtabnahmekriteriums für die Umfangsnähte einer Offshore Gastransportleitung betrachtet. Die Daten der betrachteten Rohrleitung sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Daten für die Beispielrohrleitung

Bezeichnung	Wert	Einheit
Außendurchmesser	729	mm
Wanddicke	17,5	mm
Werkstoff	API 5L X65	
Maximale axiale Spannung aus Verlegung und Betrieb	250	MPa

Im Folgenden sind einige zur Berechnung benötigte Angaben zusammengefasst:

- aufgrund des Rohrdurchmessers wird die Bauteilgeometrie mit der im BS 7910 für die ebene Platte vorgeschlagenen Formfunktion approximiert,
- Schweißbeigenspannungen werden konservativ, das heißt, als reine Zugspannungen angenommen (Sekundärspannungen),
- betrachtet wird eine eingeschlossene Fehlstelle,
- die Referenzspannung wird entsprechend Fall P.3.4 aus BS 7910 berechnet.

In Abbildung 2 sind die zulässigen Fehlstellenabmessungen in Form Fehlstellenhöhe über Fehlstellenlänge für vier Risswiderstände zwischen 0,1 mm und 0,4 mm dargestellt. Um den Einfluss beider Grenzen im FAD zu demonstrieren, ist die Begrenzung von L_r zunächst vernachlässigt worden. Dieses Bild zeigt recht deutlich, wie mit zunehmendem Risswiderstand die zulässigen Fehlstellenabmessungen ansteigen. Dabei nimmt der Einfluss der Zähigkeit mit Zunahme des Risswiderstandes sowohl relativ als auch absolut ab.

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse unter Berücksichtigung der L_r Begrenzung. Wie gezeigt, wirkt sich eine Zunahme der Zähigkeit nur noch im Bereich niedriger Risswiderstände aus. Für höhere Risswiderstände ist nicht mehr der Risswiderstand sondern die Begrenzung der plastischen Verformungen das entscheidende Kriterium und die Grenzkurven liegen demzufolge übereinander. Bezogen auf Abbildung 1 bedeutet dies, dass wir uns im FAD mit steigendem Risswiderstand nach rechts bewegen.

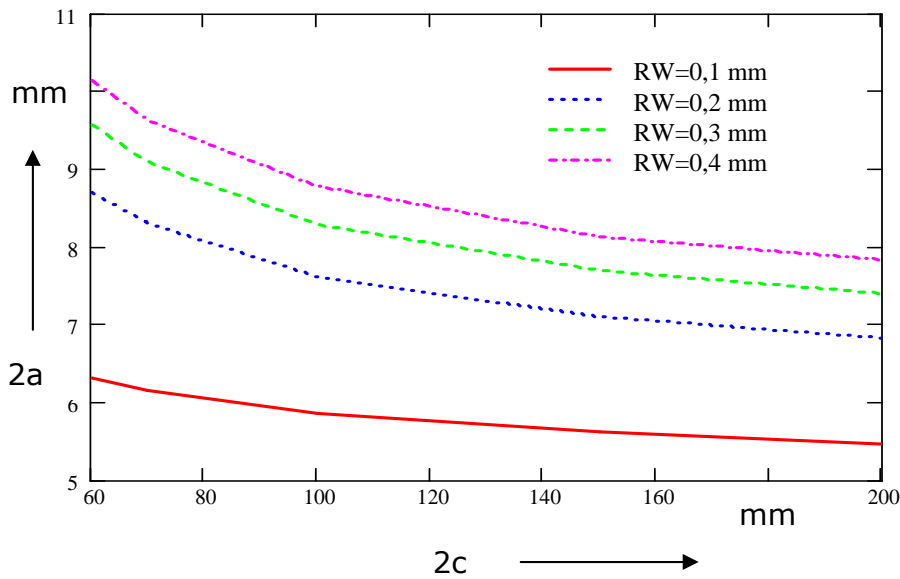


Abbildung 2: Grenzkurven für zulässige Fehlstellenabmessungen für die Risswiderstände 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm und 0,4 mm ohne Berücksichtigung der plastischen Grenzlast.

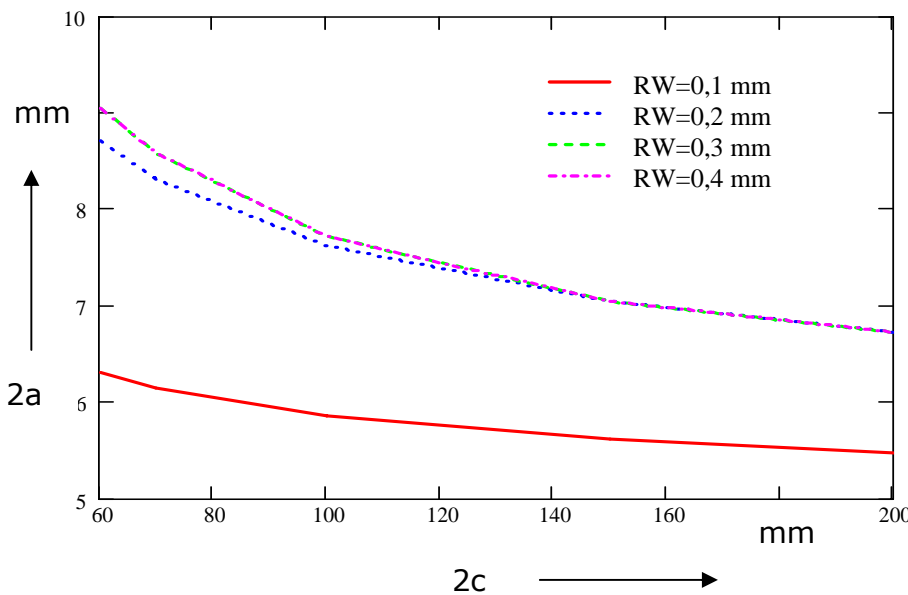


Abbildung 3: Grenzkurven für zulässige Fehlstellenabmessungen für die Risswiderstände 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm und 0,4 mm mit Berücksichtigung der plastischen Grenzlast.

Zur Entwicklung eines Schweißnahtabnahmekriteriums wird diese Berechnung für oberflächliche und eingeschlossene Fehlstellen durchgeführt und die Ergebnisse zum Beispiel in tabellierter Form zusammengefasst (Tabelle 1). Um eine konservative Definition zu erreichen, sollten dafür die Extremwerte für die Beanspruchungen und die Werkstoffeigenschaften verwendet werden. Komplettiert wird das Schweißnahtabnahmekriterium durch Definition der Fehlstelleninteraktionen³ und der Unterscheidung zwischen eingeschlossener sowie oberflächlicher

³ Definition bei welchen Abständen zueinander Fehlstellen interagieren und zusammengelegt werden müssen. Legt auch die Ermittlung der resultierenden Fehlstellenabmessungen fest.

Fehlstelle. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und Eindeutigkeit sollte die Mess-toleranz in die Grenzwerte integriert werden. Bei dynamischen Beanspruchungen muss die Möglichkeit des Risswachstums betrachtet werden.

Tabelle 2: Beispiel eines Schweißnahtabnahmekriteriums

Akzeptanzkriterium für Rohrleitung XY basierend auf $\delta = \dots$		
Fehlstellenhöhe (a)	Zulässige Fehlstellenlänge (2c)	
	Oberfläche	Eingeschlossen
$a \leq 5,0 \text{ mm}$	90 mm	90 mm
$5,0 \text{ mm} < a \leq 6,0 \text{ mm}$	50 mm	90 mm
$6,0 \text{ mm} < a \leq 7,0 \text{ mm}$	40 mm	90 mm

4 Vorhersagegenauigkeit

Im Zusammenhang mit den bisherigen Ausführungen stellt sich die Frage, welche Vorhersagegenauigkeit mit den theoretischen Methoden der Bruchmechanik erzielt wird. Um hiervon einen Eindruck zu geben sind im Folgenden einige Validierungsbeispiele zusammengestellt. Diese Ergebnisse sind ein Auszug aus den vom Germanischen Lloyd im Rahmen der Erprobung von SINTAP (Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry) durchgeführten Berechnungen⁴ (Hamann & Zerbst, 2002 und 2002a). SINTAP bietet je nach Datenlage unterschiedliche Bewertungsniveaus. In dem diesen Ergebnissen zugrunde liegenden Projekt wurden die Niveaus angewendet:

- Level 0 KV: nur die Fließgrenze des Werkstoffs (geforderter Mindestwert) ist bekannt. Der Risswiderstand wird aus der Kerbschlagarbeit abgeschätzt,
- Level 0: nur die Fließgrenze des Werkstoffs (geforderter Mindestwert) und der Risswiderstand sind bekannt,
- Level 1: Streckgrenze und Zugfestigkeit des Werkstoffs (geforderter Mindestwert) sowie der Risswiderstand sind bekannt,
- Level 3: zusätzlich zu Level 1 steht die gesamte Risswiderstandskurve zur Verfügung.

Die Angaben zu den bei diesen Validierungsberechnungen betrachteten 88 Fehlstellen sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

In den Untersuchungen wurde auch der Einfluss unterschiedlicher Formfunktionen sowie Werkstoffangaben auf die Vorhersagegenauigkeit untersucht.

In Abbildung 4 sind die für den Rohrleitungswerkstoff API5L X60 und die Oberflächenfehlstelle mit dem Level 0 berechneten Ergebnisse gezeigt. Aufgetragen ist

⁴ Die bruchmechanische Prozedur SINTAP ist das Ergebnis eines zwischen 1996 und 1999 durchgeführten Brite Euram Forschungsprojektes. Mit Hilfe dieses Projektes wurden die Vorteile der beiden europäischen Prozeduren ETM und R6/PD 6493 (BS 7910) zusammengeführt.

für jeden Versuch das Verhältnis von theoretischen und experimentellen Versagensdruck. Für die einzelnen Versuche lag die Kerbschlagarbeit zwischen 41 J und 69 J. Berechnet wurde der Versagensdruck unter Verwendung der Formfunktionen aus der PD 6493 (Newman und Raju) und der API 579. Im ersten Fall wurde die Berechnung zusätzlich zu den tatsächlichen Werkstoffdaten für Streckgrenze und Zugfestigkeit mit den spezifizierten Mindestwerten der API 5L durchgeführt.

Tabelle 3: Daten der experimentellen Untersuchungen

Datensatz	Anzahl	Rohrleitungsaußen durchmesser	Wanddicke	Werkstoff	Fehlstellentyp	Analyse Level
		mm	mm			
A	1	913	13	BS 4360 Grade 50D	Oberfläche	0,1,3
B	1	913	13	BS 4360 Grade 50D	Wanddurch.	0,1,1mod
C	1	795	47	20MnMoNi55	Oberfläche	0,1,1mod
D	3	800	48	20MnMoNi55	Wanddurch.	0,1,1mod
E	10	762	9,6 - 15,6	X52	Oberfläche	0
F	15	762 - 1068	9,7 - 11,3	X60, X60C, X60V	Oberfläche	0
G	24	406 - 787	7,1 - 12,7	X52	Wanddurch.	0
H	17	762- 964	6,8 - 11,1	X60V	Wanddurch.	0
I	16	762	8,3 - 9,3	X60C	Wanddurch.	0

Die zusammengestellten Ergebnisse (Abbildung 4) zeigen, dass alle Werte kleiner 1 sind, das heißt, das in allen Fällen auch ohne Verwendung eines Sicherheitsfaktors eine konservative Vorhersage erreicht wird. Hervorzuheben ist, dass trotz der wenigen zur Verfügung stehenden Daten (Abschätzung des Risswiderstandes aus der Kerbschlagarbeit), der berechnete Versagensdruck nur zwischen 38 % und 12 % unterhalb des experimentellen liegt. Die Streuung über alle Versuche ist relativ gering (Mittelwert 28 %, Standardabweichung ca. 6 %). Die Verwendung der tatsächlichen Werkstoffdaten führt zu einer genaueren Vorhersage. Die Unterschiede zwischen den beiden Formfunktionen sind nicht signifikant.

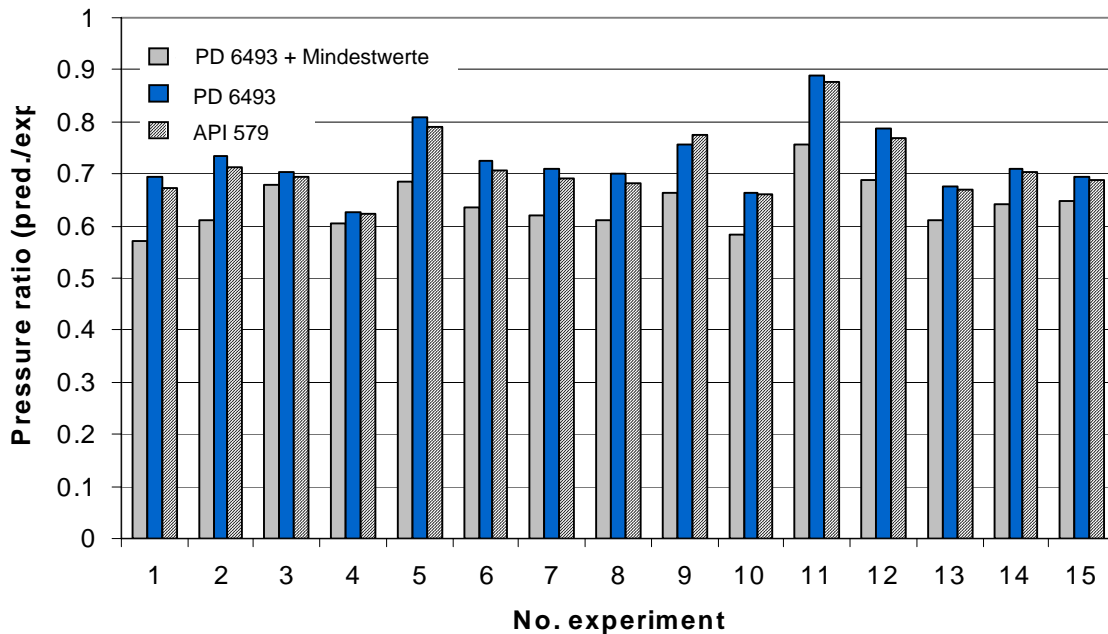


Abbildung 4: Level 0 SINTAP Bewertung für eine axiale Oberflächenfehlstelle in API 5L X60 Rohren (Datensatz F). Aufgetragen ist jeweils das Verhältnis von Vorhersage zu experimentellem Versagensdruck.

Stehen mehr Daten über die Werkstoffeigenschaften zur Verfügung, so bieten die bruchmechanischen Prozeduren alternative Bewertungsgleichungen, die im Fall der SINTAP Prozedur auch zu einer Steigerung der Vorhersagegenauigkeit führen, wie im folgenden Beispiel gezeigt.

Als Beispiel sind die Ergebnisse für die Datensätze A, B, C und D (Tabelle 3) in Abbildung 5 zusammengestellt. Gegenübergestellt sind die Ergebnisse für die Bewertungslevel 0 KV, 0, 1 und 3. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass in der Regel mit einer Verbesserung der Datenlage auch ein Anstieg der Vorhersagegenauigkeit erreicht wird, das heißt der höhere Aufwand zur Ermittlung der Daten sich auch positiv auswirkt, zum Beispiel auf die zulässigen Abmessungen einer Fehlstelle. In diesem Fall ist dies besonders bei der wanddurchdringenden Fehlstelle zu beobachten.

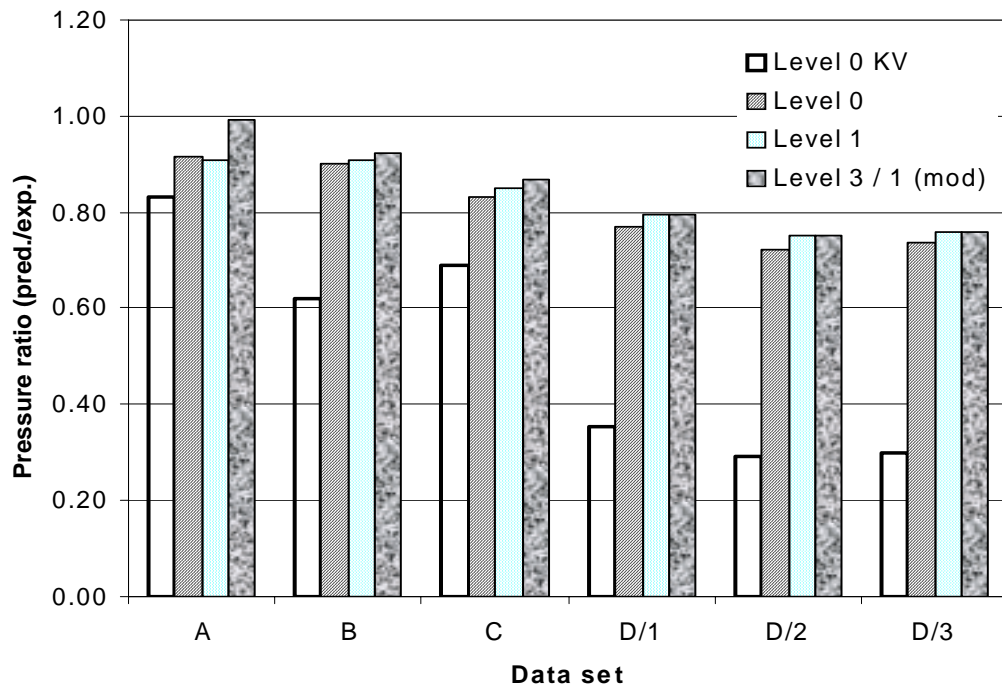


Abbildung 5: Mit unterschiedlichen SINTAP Level berechnete Versagenslasten (Datensätze A, B, C, D).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Aufgabe der zerstörungsfreien Prüfung ist es, diejenigen Fehlstellen im Werkstoff eines Bauteils aufzufinden, von denen erwartet wird, dass sie in dem angestrebten Nutzungszeitraum zu einem lokalen oder globalen Versagen führen können. Sie ist daher immer im Zusammenhang mit der Fehlstellenbewertung zu sehen.

Für die Bewertung von Fehlstellen stehen traditionell die als so genannte Workmanship Kriterien bezeichneten Grenzwerte für zulässige Fehlstellenabmessungen zur Verfügung. Für deren Anwendung sind Mindestanforderungen hinsichtlich Werkstoffzähigkeit, Bauteilabmessungen etc. zu erfüllen.

Wie in diesem Beitrag in stark komprimierter Form erläutert, gestattet die Bruchmechanik eine allgemeinere Betrachtung des Problems und damit die Berücksichtigung unter anderem der lokalen Werkstoffeigenschaften sowie der tatsächlichen Beanspruchungen. Dadurch erweitert sich die Anzahl der zur Verfügung stehenden Optimierungsparameter erheblich.

An dieser Stelle soll ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass sich größere zulässige Fehlstellenabmessungen nachteilig auf die Betriebsfestigkeit auswirken können und die Betrachtungsgrenzen für die Analysen jeweils adäquat zu setzen sind. Die Zusammenhänge bei einem bruchmechanischen Schweißnahtabnahmekriterium sind in Abbildung 6 grafisch dargestellt. So sind die zulässigen Fehlstellenabmessungen abhängig von den Beanspruchungen, den Schweißzugspannungen, dem Risswiderstand sowie den Werkstoffeigenschaften im Grundwerkstoff und Schweißnahtbereich. Dynamische Betriebsbeanspruchungen können zu einem stabilen Risswachstum führen und damit eine Fehlstelle bis zu ihren kriti-

schen Abmessungen wachsen lassen. Standardbewertungen zur Betriebsfestigkeit können dadurch unzulässig und eine Risswachstumsrechnung notwendig werden.

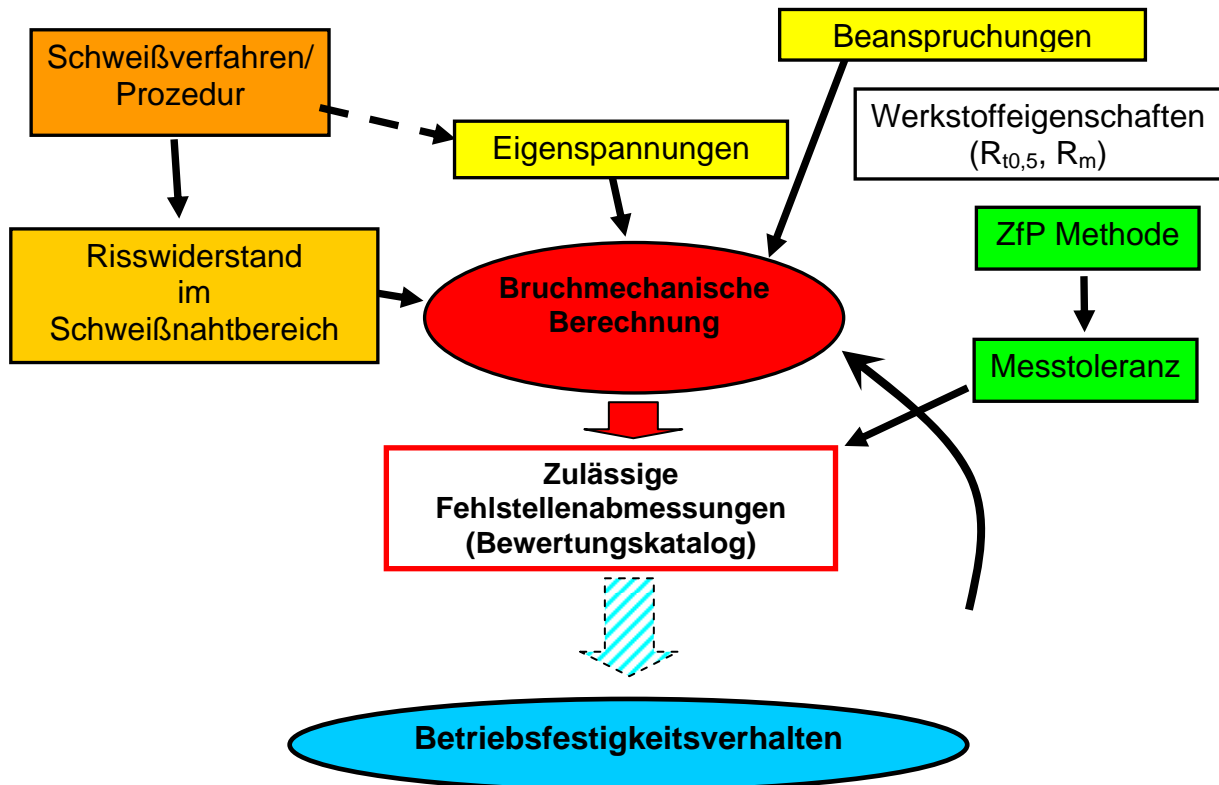


Abbildung 6: Problembereich bruchmechanisch basierter Schweißnahtabnahmekriterien.

Unter Beachtung der Auswirkungen auf andere Bereiche des Nachweises der Bauteilsicherheit kann die Bruchmechanik durch die gegenwärtig zur Verfügung stehenden Prozeduren einen relevanten Beitrag leisten bei der Entwicklung von Schweißnahtabnahmespezifikationen beziehungsweise bei der Definition der benötigten Prüfgenauigkeit.

6 Schrifttum

API 1104, 1999: Welding of Pipelines and Related Facilities. American Petroleum Institute, Washington, 19th Ed.

API 579, 2000: Fitness - for - Service. American Petroleum Institute, First Edition.

BS 7910, 1999: Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. British Standard, ISBN 0 580 33081 8.

DVS 2004: Bruchmechanische Bewertung von Fehlern in Schweißverbindungen. Merkblatt DVS 2401. ISBN 3-87155-213-5.

EN 25817, 1992: Lichtbogenschweißverbindungen an Stahl – Richtlinien für die Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten. Europäisches Komitee für Normung.

Hamann, R.; Zerbst, U., 2002: Assessment of typical pipeline flaws with SINTAP. ASME Pressure Vessels and Piping Conf., Vancouver, PVP2002-1205.

Hamann, R.; Zerbst, U., 2001: Assessment of pipeline flaws using the European SINTAP procedure. 5. Symposium Pipelinetechnik, Köln.

Kanninen, M.F.; Popelar, C.H., 1985: Advanced Fracture Mechanics. Oxford University Press, ISBN 0-19-503532-1.

H.P. Keller, 1990: Bruchmechanik druckbeanspruchter Bauteile. Carl Hanser Verlag, ISBN 3-446-15617-8.

Murakami, Y. et al. 1987: Stress Intensity Factors Handbook. Band 1.

Murakami, Y. et al. 1987a: Stress Intensity Factors Handbook. Band 2.

Murakami, Y. et al. 1992: Stress Intensity Factors Handbook. Band 3.

K.-H. Schwalbe, 1980: Bruchmechanik metallischer Werkstoffe. Carl Hanser Verlag, ISBN 3-446-12983-9.

SINTAP, 1999: Entwurf einer vereinheitlichten europäischen Fehlerbewertungsprozedur – eine Einführung. GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 99/E/65.