

Absicherung zulässiger Fehlergrößen mit bruchmechanischen Methoden

Richard HUBER
TVFA WIEN GmbH
Karlsplatz 13, 140 Wien, Austria
richard.huber@tuwien.ac.at
www.tvfa.tuwien.ac.at

Kurzfassung. Die zulässigen Fehlergrößen sind in Bewertungsnormen und technischen Liefervorschriften festgelegt und in der Regel auf der sicheren Seite. Die bruchkritischen Fehlergrößen können mit den Methoden der rechnerischen Bruchmechanik bestimmt werden. Im Referat wird erörtert, welchen Einfluß die drei bezüglich der kritischen Fehlergröße maßgeblichen Parameter Beanspruchung, Bauteilgeometrie und Bruchzähigkeit auf die innewohnende Sicherheit haben. Besonderer Schwerpunkt dabei sind die höherfesten, thermomechanisch gewalzten bzw. wasservergüteten Stähle, die im Druckrohrleitungsbau die allgemeinen Baustähle weitgehend verdrängt haben.

1. Einleitung

Die Sicherung der Bauteilqualität mit zerstörungsfreien Prüfmethoden ist seit geraumer Zeit ein wichtiger Aspekt bei der Bauteilfertigung und im Betrieb. Für die Erhebung des Innenbefundes nimmt die Ultraschallprüfung einen wesentlichen Platz ein. Mit Hilfe dieses Verfahrens ist es möglich, im Bauteil verborgene Ungängen, im folgenden Fehler genannt, in Ihrer Lage und Größenordnung festzustellen. Die detektierten Fehler werden für die weitere Beurteilung als Anzeigen mit Vermerk ihrer Lage im Bauteil registriert. Stand der Technik ist nach wie vor, daß eine reale Anzeige mit jener eines Ersatzreflektors verglichen und damit auf die Fehlergröße zurückgeschlossen wird.

Mit den technischen Liefervorschriften für das jeweilige Bauteil werden die zulässigen Ersatzfehlergrößen festgelegt. Werden bei der Ultraschallprüfung gemäß Liefervorschrift unzulässige Anzeigen festgestellt, ist über Neufertigung, Reparatur oder Tolerierung der die Anzeigen verursachenden Fehler zu entscheiden.

Im Fall der angestrebten Tolerierung können die Methoden der rechnerischen Bruchmechanik angewandt werden. Andererseits sind die in den Spezifikationen zugelassenen Fehler- bzw. Anzeigengrößen in der Regel nicht bruchmechanisch auf das konkrete Bauteil bezogen, sondern auf oft jahrzehntelanger Erfahrung basiert. Dabei wird meist größter Wert darauf gelegt, daß die Bauteile gute Ausführungsqualität haben. Mit dieser Philosophie wurden Hand in Hand mit der Weiterentwicklung des Standes der Technik beste Erfahrungen gemacht.

Im komplexen System Bauteilauslegung – Fertigung – Betrieb kann es jedoch auch dazu kommen, daß bei gleichbleibenden Qualitätsanforderungen durch technische Innovationen die Sicherheit geschmälert wird. Beispiel dafür ist der Ersatz niederfester durch höherfeste Stähle beim Bau von druckführenden Teilen, wie zum Beispiel Druckrohrleitungen. Während die zulässigen Spannungen in den Wandungen enorm gestiegen sind, sind die Zulässigkeitsgrenzen für Fehler im wesentlichen gleich geblieben.



In der gegenständlichen Arbeit wird erörtert, welchen Einfluß die drei maßgeblichen Parameter Beanspruchung, Bauteilgeometrie und Bruchzähigkeit auf die innewohnende Sicherheit von fehlerbehafteten Bauteilen haben. Der Schwerpunkt wird dabei auf geschweißte, druckführende Teile aus höherfesten Stählen gelegt.

2. Kritische und zulässige Fehlergröße

Alle real ausgeführten technischen Strukturen haben mehr oder weniger ausgeprägte Fehler mit bestimmter Größe, in bestimmter Lage. Die scharfkantigen Fehlertypen können Spannungskonzentrationen erzeugen, womit ihnen eine bruchmechanische Wirkung zu unterstellen ist. Bei Schweißnähten sind das Risse, ungenügende Aufschmelzungen und Durchschweißungen, weiters Einbrand- und Wurzelkerben, aber in gewissem Maße auch Poren, Lunker und feste Einschlüsse.

Wird in einem Bauteil eine Fehlergröße erreicht, bei dem das Bauteil oder die gesamte Struktur unbrauchbar wird, oder – zum Beispiel durch Bruch – versagt, dann ist das jedenfalls die kritische Fehlergröße. Die kritische Fehlergröße kann aber auch rechnerisch definiert sein, indem ein gewisses Ereignis – zum Beispiel das Erreichen der Streckgrenze – als kritisch behauptet wird.

Die zulässige Fehlergröße ist mit einem gewissen Sicherheitsabstand kleiner als die kritische Fehlergröße. Üblicherweise wird jedoch nicht die zulässige Fehlergröße, sondern eine zulässige Anzeigengröße, also das was mit geeigneten, zerstörungsfreien Prüfmethoden festgestellt werden kann, in den technischen Spezifikationen vorgeschrieben. Im folgenden wird zur Eingrenzung des Themenbereiches von innenliegenden Fehlern in Schweißnähten bzw. deren Ultraschall-Anzeigen ausgegangen, die mittels herkömmlicher Ultraschalltechnik gefunden wurden.

ISO 5817 (2006/2007, Entwurf 2012) definiert die Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten in Schweißverbindungen. Für völlig untergeordnete Schweißnähte mit sehr geringen Beanspruchungen kann die schlechteste Gruppe D genommen werden. Sollen innenliegende, bruchmechanisch wirksame Fehler, wie Risse oder Bindefehler ausgeschlossen werden, ist Gruppe B vorzuschreiben. ISO 5817 bewertet wahre Fehlergrößen und ist damit nicht geeignet, mit Ultraschall gefundene Anzeigen zu bewerten. Dafür ist dann die Norm **ISO 11666** (Zulässigkeitsgrenzen) in Zusammenwirken mit **ISO 17640** (Prüfklassen, Einschallpositionen) und **ISO 23279** (Anzeigencharakterisierung) zuständig.

Für Bewertungsgruppe B nach ISO 5817 ist nach ISO 11666 die Zulässigkeitsgrenze „2“, wobei nach ISO 17640 ein Mindestaufwand gemäß Prüfklasse B oder mehr anzuwenden ist. Grob gesagt und ohne näher ins Detail zu gehen liegt die zulässige Größe für Ultraschallanzeigen mit dieser Bewertung bei einem Kreisscheibenreflektordurchmesser von 2 mm (Bezugsschwelle $D_{KSR} = 1.5 \div 3.0$ mm je nach Wanddicke, Prüfkopffrequenz, Wellentechnik, Längenausdehnung). ISO 11666 schließt nun nicht mehr aus, daß es sich bei zulässigen Anzeigen auch um solche herrührend von Rissen oder Bindefehlern handeln kann. Das wird erst dann ausgeschlossen, wenn zusätzlich eine Charakterisierung nach ISO 23279 verlangt ist, wonach flächige Anzeigen unzulässig sind.

Die Feststellung eines der Ultraschallanzeige äquivalenten Kreisscheibenreflektordurchmessers reicht zwar für die Zulässigkeitsbewertung nach ISO 11666, jedoch nicht für eine bruchmechanische Bewertung, wenn die Anzeige nach Norm unzulässig ist. Für die bruchmechanische Bewertung ist die wahre Fehlergröße, oder eine konservative Annäherung an diese, notwendig.

Ist der Fehler in Größe und Lage schließlich ausreichend bestimmt, ist für die weitere bruchmechanische Behandlung fast immer eine Recharakterisierung des Fehlers notwendig. Mit der Recharakterisierung wird der Fehler in einen bruchmechanisch bewert-

baren Riß umgewandelt. Dies geschieht nach Regelwerk, wie zum Beispiel BS 7910, ASME-Code oder FKM-Bruchmechanikrichtlinie.

3. Beanspruchung – Bauteilgeometrie – Bruchzähigkeit

Die Forderung für die Integrität einer Struktur ist, daß ein vorhandener Fehler innerhalb der Bauteillebensdauer nicht zum Bruch führen darf.

Die Schärfe oder Intensität des rissartigen Fehlers wird mit dem Spannungsintensitätsfaktor beschrieben, der durch die Parameter Beanspruchung, Bauteilgeometrie und Rissgröße bestimmt ist. Bruch tritt rechnerisch ein, wenn der kritische Spannungsintensitätsfaktor erreicht wird.

Bild 1 zeigt die bruchmechanische Grundgleichung in verallgemeinerter Form, ohne daß auf die Rissöffnungsarten (I+II)&III näher eingegangen wird. Als kritischer Spannungsintensitätsfaktor wird die Bruchzähigkeit eingesetzt. Wird der Spannungsintensitätsfaktor K durch die Bruchzähigkeit ersetzt, ergibt sich nach Umstellung der Formel die kritische Risslänge a_c .

$K = \sigma \times Y(a, G_{eo}) \times \sqrt{\pi \times a} < K_c \quad \Leftrightarrow \quad a_c \propto \frac{1}{Y^2(a_c, G_{eo})} \times \left(\frac{K_c}{\sigma}\right)^2$	
<p>K Spannungsintensitätsfaktor K_c kritischer Spannungsintensitätsfaktor = Bruchzähigkeit (→ Werkstoff) σ Spannung zufolge Belastung (→ Beanspruchung) $Y(a, G_{eo})$ Geometriefunktion (→ Bauteilgeometrie und Fehlerkonfiguration) a charakteristische Risslänge (→ Bauteilgeometrie und Fehlerkonfiguration) a_c kritische Risslänge</p>	
Bild 1: Grundgleichung der linearelastischen Bruchmechanik (LEBM)	

Spannung σ , Geometriefunktion Y und Risslänge a sind für ein konkretes Rissproblem gemeinsam definiert. Mit der Geometriefunktion wird die Bauteilgeometrie, der Lastangriff, die Form des Spannungsfeldes im ungerissenen Teil und die Geometrie der Rissausbreitung berücksichtigt. Die charakteristische Risslänge a kann sich auf die Ausbreitung des Risses in Tiefenrichtung oder an der Oberfläche beziehen. Die Rissformparameter (Länge an der Oberfläche, Tiefe) werden mit der Geometriefunktion berücksichtigt [1].

Die kritische Risslänge bzw. Rissgröße hängt daher zunächst quadratisch vom Verhältnis Bruchzähigkeit zu Spannung ab. Die weitere Abhängigkeit besteht zum Rissform bestimmten Teil der Geometriefunktion Y .

3.1 Bruchzähigkeit

Die nach Norm an einer Probe bestimmte Bruchzähigkeit (Risszähigkeit) ist ein vom Bauteil unabhängiger Werkstoffkennwert, der im Bruchmechanikversuch ermittelt wird.

Unlegierte Baustähle, von denen hier exklusiv die Rede sein soll, sind bei den üblichen Prüf- und Belastungstemperaturen so zäh, daß der klassische Bruchzähigkeitswert für den ebenen Dehnungszustand K_{Ic} nicht geprüft wird, sondern ein teilplastischer Kennwert (J_i , δ_i , J_c aus J-R). Die Umrechnung von J oder δ in eine Bruchzähigkeit K_c erfolgt dann näherungsweise mit Formeln, die streng genommen nur im rein elastischen oder elastisch – (ideal-)plastischen Zustand gelten [2]. Gültigkeitsverletzungen werden bewußt in Kauf genommen, um überhaupt Bruchzähigkeitswerte zu erhalten, mit denen dann die bruchmechanische Berechnung ausgeführt werden kann.

Bild 2 zeigt die aus Basisdaten [2] rückgerechneten Bruchzähigkeiten für nieder- bis höherfeste Feinkornbaustähle (S235J2G3 bis S890Q). Die rückgerechneten Werte liegen je nach Prüfverfahren und zugrundeliegenden Prüfparametern zwischen 2500 und 11500 N/mm^{3/2} (80 und 360 MPa√m). In dieser Auswertung ist keine ausgeprägte Abhängigkeit der Streckgrenze, also der maßgeblichen Festigkeit, mit der Bruchzähigkeit zu erkennen. Es ist sogar eher die Tendenz zu sehen, dass die höherfesten Baustähle S690Q und S890Q geringere Bruchzähigkeiten haben als etwa S460, bzw. doch gleichwertig mit S355xx sind. Es sollte Aufgabe der Stahlhersteller sein, diesen Umstand von deren Seite her zu beleuchten.

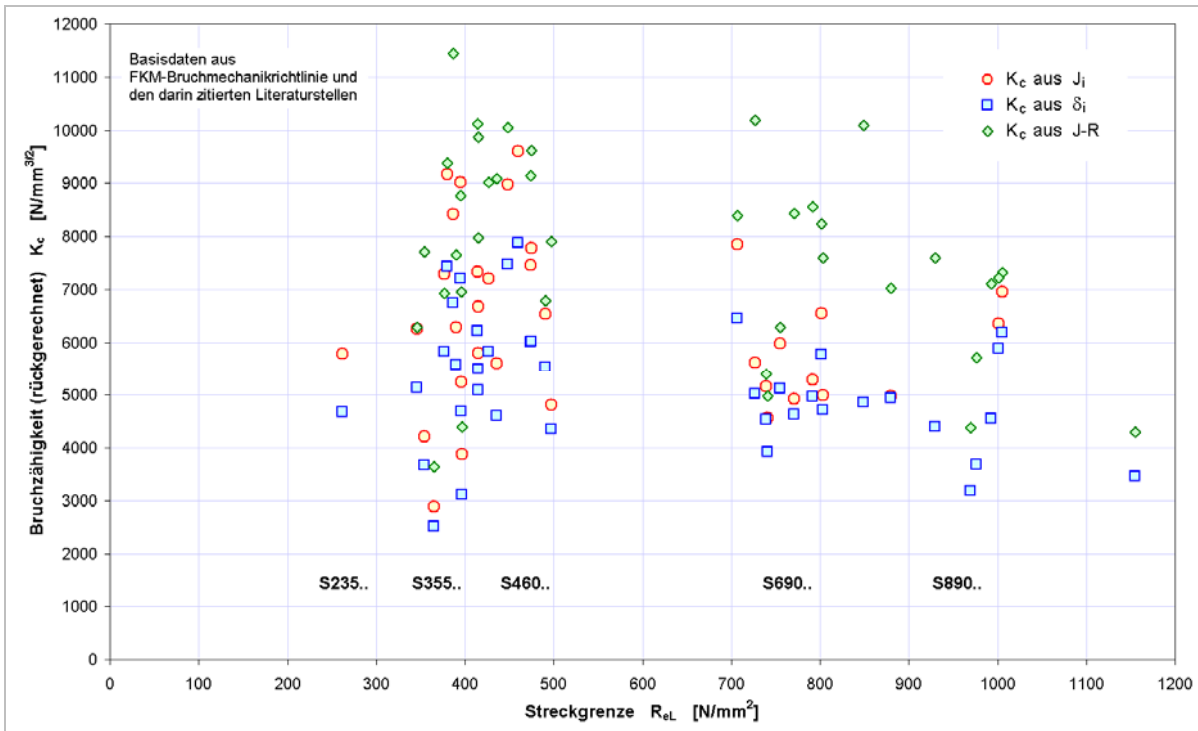


Bild 2: Rückgerechnete Bruchzähigkeiten für schweißgeeignete Stähle unterschiedlicher Festigkeit

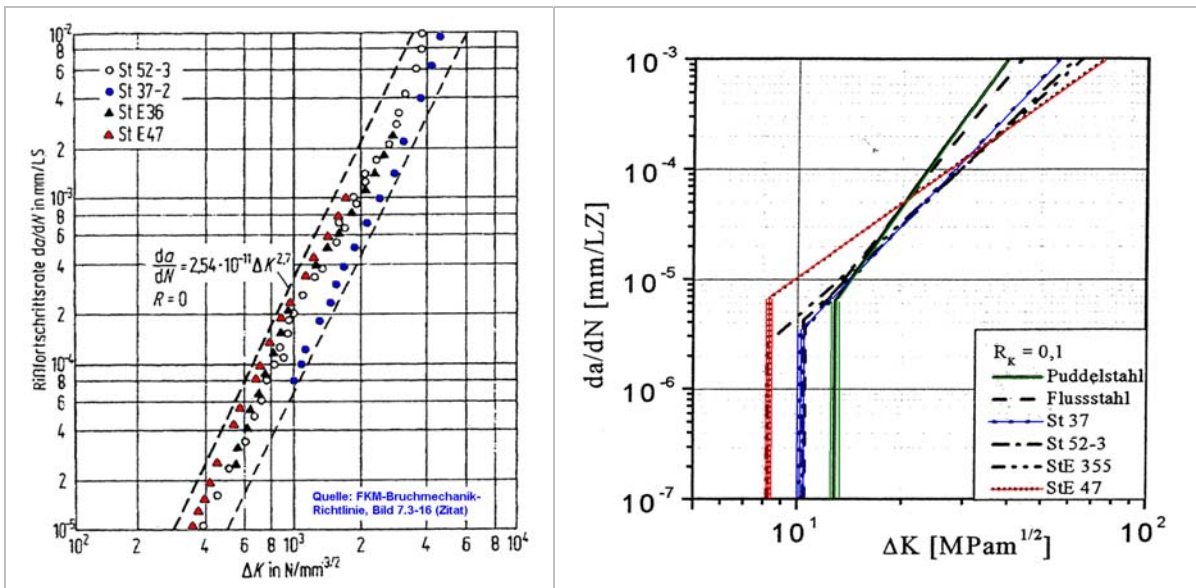


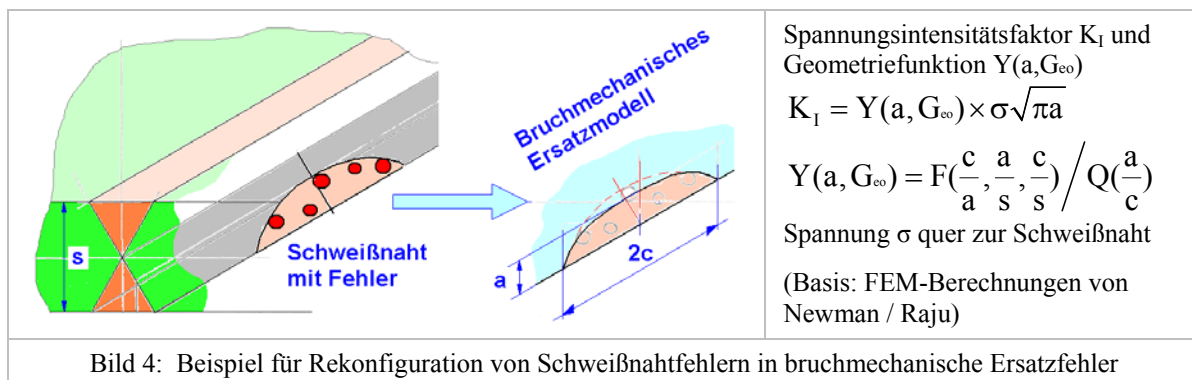
Bild 3: Rissfortschrittskurven für verschiedene Baustähle aus [2] nach den dort zitierten Literaturstellen.

Ein ähnliches Bild zeigt das Ermüdungsrisswachstumsverhalten, wo ebenfalls keine ausgesprochene Abhängigkeit der Risswachstumsparameter von der Festigkeit der jeweili-

gen Baustahl-Sorte zu erkennen ist. Es kann sogar die Tendenz interpretiert werden, dass höherfeste Baustähle einen geringeren Schwellenwert des Ermüdungsrisswachstums haben als niederfeste, und dass bei höherfesten Werkstoffen das Risswachstum in gewissen Stadien schneller voranschreitet als bei niederfesten (Bild 3).

3.2 Bauteilgeometrie

Die Bauteilgeometrie wird in der Bruchmechanikformel mit der Geometriefunktion $Y(a, G_{eo})$ beschrieben. Dabei wird auch die Rissform und Ausdehnung des Risses im Bauteil berücksichtigt. Bild 4 zeigt beispielhaft die Lage von Schweißfehlern (z.B. Flankenbindefehler) in einer X-Naht, das bruchmechanische Ersatzmodell nach Fehlerrekonfiguration und ansatzweise das anwendbare Formelwerk.



Die Geometriefunktion Y nimmt mit zunehmendem Verhältnis a/s , c/s und c/a (für $c/a > 1$) zu. Der Spannungsintensitätsfaktor kann aber auch direkt mittels FEM-Berechnung ermittelt werden, wobei der Riss im Berechnungsmodell eingebaut ist. Die Geometriefunktion kann dann aus den FEM-Ergebnissen für weitere Berechnungen, z.B. Ermüdungsrisswachstumsberechnung oder Parameterstudie, abgeleitet werden.

3.3 Spannungen im Bauteil

Bei der Berechnung mit Formeln aus Spannungsintensitätshandbüchern wird die Nennspannung eingesetzt, die im ungerissenen Teil wirkt. Einflüsse der Bauteilgeometrie und des Lastangriffes auf die Spannungsverteilung werden mit der Geometriefunktion berücksichtigt. Damit kann zum Beispiel die Berechnungsspannung die Ringspannung im Rohr oder die Zug- bzw. Biegespannung in einem Balkenträger sein.

Wird die bruchmechanische Berechnung mit FEM ausgeführt, werden statt Spannungen die angreifenden Kräfte in der Berechnung angesetzt. Die Umrechnung in eine Spannung erfolgt dann implizit über die Erweiterung der Geometriefunktion.

4. Fallbeispiel: Rohr mit Fehler in Längsschweißnaht Vergleich von zwei Stählen mit unterschiedlicher Festigkeit

4.1 Rohrauslegung, Werkstoffe

Im Beispiel wird ein geschweißtes Rohr aus dem Werkstoff Stahl EN 10025-3 – S275NL mit einem Rohr aus Stahl EN 10025-6 – S690QL verglichen. Die Rohre werden gegen Streckgrenze ausgelegt (siehe Bild 5).

<p>Rohr: Innendurchmesser $D = 1000$ mm, Innendruck $p = 17$ MPa (=170 bar) Wanddicke entsprechend Zulässigkeitskriterium</p> <p>Rohrwerkstoff A: Stahl EN 10025-3 – S275NL normalisierend gewalzter, schweißgeeigneter Feinkornbaustahl $R_{eH} / R_m / A_5 = 255$ N/mm² (s=40-63mm) / 370 + 510 N/mm² / 24 % Streckgrenzenverhältnis: 0.689 + 0.500</p> <p>Rohrwerkstoff B: Stahl EN 10025-6 – S690QL wasservergüteter, schweißgeeigneter Feinkornbaustahl mit erhöhter Streckgrenzenlage $R_{eH} / R_m / A_5 = 690$ N/mm² (s=3-50mm) / 770 + 940 N/mm² / 14 % Streckgrenzenverhältnis: 0.896 + 0.734</p>	<p>Vereinfachte Rohrformel: $\sigma_i = \frac{p \cdot D}{2 \cdot s} \rightarrow s = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \sigma}$</p> <p>Sicherheit gegen Streckgrenze: $S = \frac{R_{eH}}{\sigma_{zul}} = 1.5$ (z.B. AD2000-Regelwerk)</p> <p>Rohrwanddicke: $s_{eff} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \sigma_{zul}} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot R_{eH}} \cdot S$</p> <p>→ Rohr aus S275NL: $\sigma_{zul} = 170$ N/mm² $s_{eff} = 50$ mm</p> <p>→ Rohr aus S690QL: $\sigma_{zul} = 460$ N/mm² $s_{eff} = 18.48 \approx 20$ mm</p>
--	--

Bild 5: Rohrdaten, Rohrauslegung

4.2 Fehler-Konfiguration und Fehler-Rekonfiguration

Es wird angenommen, dass in den Längsschweißnähten der Rohre oberflächennahe Ultraschall-Einzelanzeigen an der jeweiligen Zulässigkeitsgrenze vorhanden sind. Nach EN ISO 11666 ist die Bezugsschwelle für die Zulässigkeitsgrenze „2“ beim Rohr aus S690QL der Kreisscheibenreflektor-Durchmesser $D_{KSR} = 2.0$ mm und beim Rohr aus S275NL $D_{KSR} = 3.0$ mm (Bild 6).

Tabelle A.2 — Bezugsschwellen für die Zulässigkeitsgrenzen 2 und 3 bei Schrägeinschallung mit Transversalwellen für Technik 2

Nennfrequenz des Prüfkopfes MHz	Dicke des Grundwerkstoffs t					
	$8 \text{ mm} \leq t < 15 \text{ mm}$		$15 \text{ mm} \leq t < 40 \text{ mm}$		$40 \text{ mm} \leq t < 100 \text{ mm}$	
	AL 2	AL 3	AL 2	AL 3	AL 2	AL 3
1,5 bis 2,5	-	-	$D_{KSR} = 2.5$ mm	$D_{KSR} = 2.5$ mm	$D_{KSR} = 3.0$ mm	$D_{KSR} = 3.0$ mm
3,0 bis 5,0	$D_{KSR} = 1.5$ mm	$D_{KSR} = 1.5$ mm	$D_{KSR} = 2.0$ mm	$D_{KSR} = 2.0$ mm	$D_{KSR} = 3.0$ mm	$D_{KSR} = 3.0$ mm
D_{KSR} = Durchmesser des Kreisscheibenreflektors			S690QL s=20		S275NL s=50	

Bild 6: Bewertung der US-Prüfung: Bezugsschwellen für die Zulässigkeitsgrenzen gemäß ISO 11666

Im ungünstigsten Fall liegen die Einzelfehler unterhalb der Oberfläche in einer Tiefe entsprechend dem halben Durchmesser des Kreisscheibenreflektors. Damit sind die Einzelfehler so zu behandeln, als ob sie Oberflächenfehler sind. Diese haben sowohl bei statischer als auch bei Ermüdungsbeanspruchung bei gleicher Größe eine stärkere bruchmechanische Wirkung als der innenliegende, verdeckte Fehler (Bild 7).

US – Befund:
"Bei der Ultraschallprüfung wurde oberflächennah eine Einzelanzeige an der Zulässigkeitsgrenze festgestellt."

Rohr aus S275NL s = 50 mm
 $2a1 = 2c1 = 3$ mm (KSR 3)
 $h = 1.5$ mm (oberflächennah)
 somit $a = 4.5$ mm
 $2c = 9.0$ mm (Halbkreis)

Rohr aus S690QL s = 20 mm
 $2a1 = 2c1 = 2$ mm (KSR 2)
 $h = 1$ mm (oberflächennah)
 somit $a = 3$ mm
 $2c = 6$ mm (Halbkreis)

Bildquelle: FKM-Bruchmechanikrichtlinie, Seite 46
Bild 3.1-10 Rissmodelle, Stufe 2
 bei Zähbruch
 $a = 2a_1 + h$, $2c = 2a_1 + h + 2c_1$

Bild 7: Bruchmechanischer Ersatzfehler aufgrund des US-Befundes, gemäß FKM-Bruchmechanikrichtlinie

4.3 Sicherheitsfaktoren gemäß FKM-Bruchmechanikrichtlinie

Bei der Rohrauslegung wurde bereits der für Druckbehälter typische Sicherheitsbeiwert von $S = 1.5$ gegen Streckgrenze angenommen. Bei nicht-bruchmechanischer Betrachtung deckt dieser Sicherheitsbeiwert auch die Fehler im Bauteil ab, die gemäß Bewertung nach dem verwendeten Bemessungsregelwerk zulässig sind. Für die bruchmechanische Abschätzung ist nun aber die Sicherheitsbetrachtung neu aufzurollen. Bei Anwendung des

Teilsicherheitsbeiwert-Konzeptes der FKM-Bruchmechanikrichtlinie (Partielle Sicherheitsfaktoren auf statistischer Basis) können die im Bild 8 eingezeichneten Teilsicherheitsbeiwerte für Spannung, Rissgröße, Risszähigkeit und Streckgrenze eingesetzt werden. Damit ergeben sich die in der Tabelle in Bild 9 gezeigten umgerechneten Basisdaten.

5.3 Partielle Sicherheitsfaktoren auf statistischer Basis

Tabelle 5.3-1 Schadensklassen β nach ISO 2394 und entsprechende zulässige Versagenswahrscheinlichkeiten P_f [0-1]

Versagensfolgen	redundante Komponente	nichtredundante Komponente
moderat	$\beta = 0,739$ $P_f = 2,3 \cdot 10^{-1}$	$\beta = 3,09$ $P_f = 10^{-3}$
ernst	$\beta = 3,09$ $P_f = 10^{-3}$	$\beta = 3,8$ $P_f = 7 \cdot 10^{-5}$
sehr ernst	$\beta = 3,8$ $P_f = 7 \cdot 10^{-5}$	$\beta = 4,27$ $P_f = 10^{-5}$

Tabelle 5.3-2 Partielle Sicherheitsfaktoren γ für verschiedene Versagenswahrscheinlichkeiten P_f und Variationskoeffizienten V [5.3-1]

Parameter (γ)	V	P_f				
		0,23	10^{-3}	$7 \cdot 10^{-5}$	10^{-5}	10^{-7}
Spannung (γ_s)	0,1	1,05	1,2	1,25	1,3	1,4
	0,2	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6
Rissgröße (γ_a)	0,3	1,08	1,5	1,65	1,9	2,3
	0,5	1,15	1,7	1,85	2,1	2,5
Risszähigkeit K_{max} (γ_{Kmax})	0,1	1,0	1,3	1,5	1,7	2,0
	0,2	1,0	1,8	2,6	3,2	5,5
Streckgrenze (γ_{Re})	0,1	1,0	1,05	1,1	1,2	1,5
	0,2	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5

Bild 8: Annahmen für Teilsicherheitsbeiwerte gemäß FKM-Bruchmechanikrichtlinie

				S275NL KSR 3	S690QL KSR 2		
	γ	Beschreibung		Val	Val / γ	Val	Val / γ
Spannung	1.25	Druck	MPa	17.0	21.25	17.0	21.25
Rißgröße	1.85	Rißtiefe a Rißlänge 2c	mm	4.5	8.325	3.0	5.55
				9.0	16.65	6.0	11.1
Rißzähigkeit	1.50	K_{Ic}	N/mm ^{3/2}	6000	4000	6000	4000
Festigkeit	1.10	Streckgrenze Zugfestigkeit	N/mm ²	255	232	690	627
				440	400	855	777

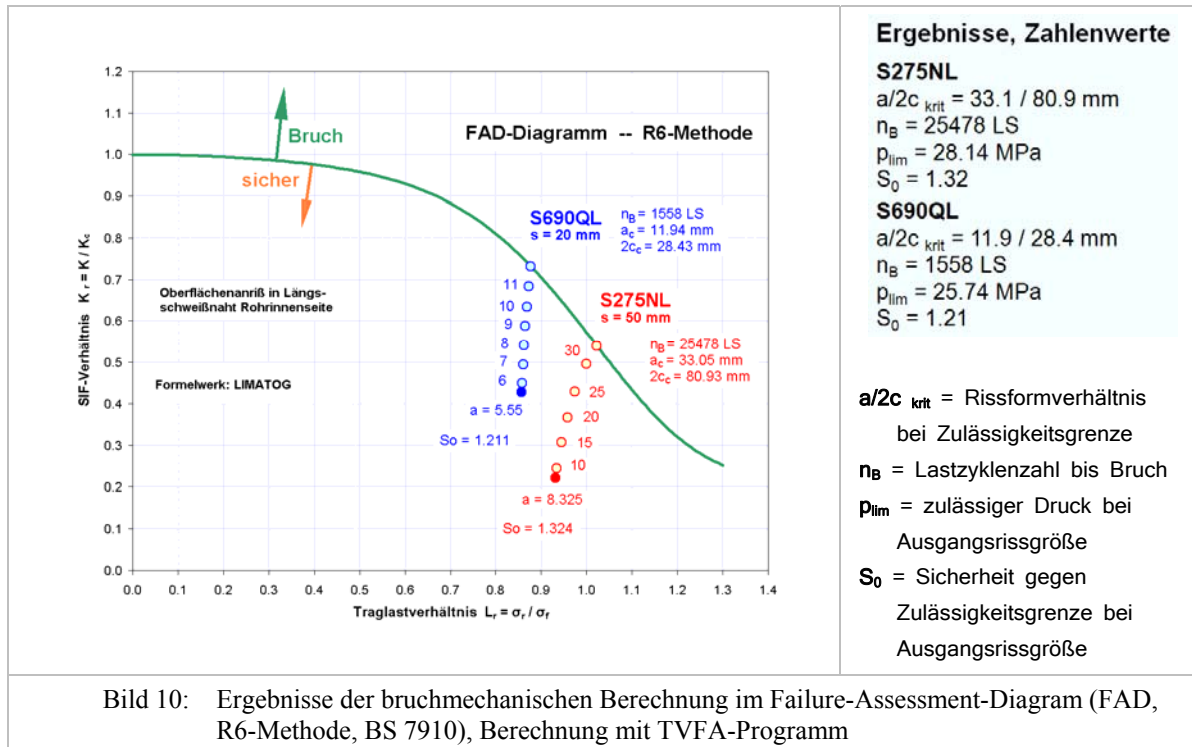
Bild 9: Tabelle: Umgerechnete Basisdaten, Eingangsdaten in Bruchmechanikberechnung

4.4 Berechnungsdurchführung und Ergebnisse

Die Berechnungen wurden mit dem TVFA WIEN Bruchmechanik-Rohrberechnungsprogramm [3] basierend auf dem LIMATOG-Formelwerk durchgeführt.

Die Ergebnisse können im Failure-Assessment-Diagramm (FAD) gemäß BS 7910 (Basis R6-Methode) dargestellt werden. Diese Darstellung ist für zähe Werkstoffe, wie sie heute für Rohrleitungen vorgeschrieben sind, Standard. Die R6-Methode ist ein 2-Kriterien-Verfahren, bei dem die linearelastische Bruchmechanik (LEBM) und die Fließbruchmechanik (FBM) über ein teilplastisches Risspitzenmodell (linear elastisch – ideal plastisch) zusammengeführt werden. Berechnet wird für Kriterium 1 (LEBM) der Spannungsintensitätsfaktor K_I und für Kriterium 2 (FBM) eine Referenzspannung σ_R . Erreicht die Referenzspannung den Wert der Streckgrenze, dann ist in der Struktur die Traglast erreicht. Im FAD ist die Versagensgrenze durch die R6-Kurve (modifizierte „Logarithmus-Sekante-Kurve“) definiert. Unterhalb und links der Kurve ist der Riss unkritisch, der Riss kann zufolge Ermüdungsbeanspruchung stabil wachsen. Oberhalb und rechts der Kurve ist das Bauteil mit Riss bruchgefährdet, die vorgegebene Sicherheitsreserve ist ausgeschöpft.

Für das Ermüdungsrisswachstum wird eine Druckschwankungsbreite in Höhe des in die bruchmechanische Berechnung eingesetzten Druckes angenommen. Der Ermüdungsriss schreitet in der Berechnung mit veränderlichem Rissformverhältnis a/c entsprechend dem Risswachstumsgesetz nach Paris voran.



4.5 Interpretation der Ergebnisse

1. Die Bruchsicherheit bei der jeweiligen Ausgangsfehlergröße ist bei S275 mit $S = 1.32$ um 9 % höher als S690 mit $S = 1.21$. Damit ist das Rohr aus S275 trotz größerem Fehler ($D_{KSR} = 3 \text{ mm} \rightarrow D_{KSR} = 2 \text{ mm}$) sicherer als das Rohr aus S690.
2. Bei beiden Rohren wird rechnerisch nach stabilem Risswachstum bei ca. 2/3 der Wanddicke die Zulässigkeitsgrenze erreicht (S275 :: 66 %, S690 :: 60 %).
3. Trotz der scheinbar geringen Bruchsicherheit (S275 :: 1.32 bzw. S690 :: 1.21) sind relativ große Fehler notwendig, um rechnerisch sofortige Bruchgefahr im statischen Lastfall bei sonst gleichbleibenden Voraussetzungen zu behaupten. Beim S275 ist dafür ein Ersatzreflektor von $D_{KSR} = 12 \text{ mm}$ und bei S690 $D_{KSR} = 6 \text{ mm}$ notwendig. Dabei darf aber kein einziger Ermüdungslastzyklus mehr einwirken.
4. Im Prüffall mit 1.5-fachem Bemessungsdruck wäre bei S275 ein Ersatzreflektor $D_{KSR} = 8 \text{ mm}$ und bei S690 $D_{KSR} = 3 \text{ mm}$ aus bruchmechanischer Sicht zulässig.

5. Zusammenfassung

Mit bruchmechanischen Berechnungen lassen sich zulässige Fehlergrößen in Bauteilen ableiten. Die in den Annahmestandards allgemein festgelegten Annahmeregrenzen sind in der Regel konservativer, als die mit bruchmechanischen Methoden berechneten.

Mit dem Berechnungsbeispiel wird gezeigt, dass ein niederfester Stahl tendenziell fehlertoleranter sein kann, als ein höher fester Stahl. Dies sollte beim Streben nach vermeintlicher Kostenreduktion durch Verwendung höherfester statt niederfester Werkstoffe und damit leichter werdender Konstruktionen bedacht werden.

Referenzen

- [1] H.-P. Rossmannith: Grundlagen der Bruchmechanik; Springer-Verlag 1982
- [2] FKM-Richtlinie – Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile; VDMA-Verlag GmbH
- [3] TVFA WIEN Bruchmechanik-Berechnungsprogramm auf Basis des LIMATOG-Formelwerkes; ab 1999