

ZFP und Bruchmechanik – Wie kann die bruchmechanische Aussage zum Versagensrisiko durch ZFP-Information verbessert werden? – Wo stehen wir?

Gerd DOBMANN*, Dumitru D. CIOCLOV*, Jochen H. KURZ*

* Fraunhofer IZFP, 66123 Saarbrücken, Campus E 3 1, gerd.dobmann@izfp.fraunhofer.de

Kurzfassung. Ein Ansatz, um bruchmechanisch das Versagensrisiko abzuschätzen, stützt sich auf das Failure Assessment Diagram (FAD). Dieses Bewertungswerkzeug ist in den internationalen Standards und Regelwerken anerkannt. Algorithmische Lösungen existieren für deterministische, wie auch stochastische, also probabilistische Bewertungen. Der ZFP-Fachmann lernt daraus, dass neben der Information über die Fehlstelle in der Komponente, die als Verursacher eines möglichen Versagens von der ZFP identifiziert wurde, auch Werkstoffkenngrößen einen wesentlichen Einfluss haben.

Die Fehlstelle mit ihrer Geometrie bestimmt gemeinsam mit der anliegenden Last den Spannungsintensitätsfaktor. Da er mittels analytischer Modelle oder FE-Analyse berechnet wird, sollte die Fehlergeometrie, wegen der Fehlerfortpflanzung bei der Modellrechnung, so genau wie möglich durch die ZFP bestimmt werden. Die ZFP kennt diese Forderung und versucht Rekonstruktionsverfahren wie in der medizinischen Diagnostik zu entwickeln.

Werden jedoch ebenso die anderen Einflussgrößen der bruchmechanischen Bewertung analysiert, so muss in der Fehlerumgebung, am besten z.B. an der Risspitze, die kritische Spannungsintensität (Risswiderstand, Bruchzähigkeit) K_{IC} , die Streckgrenze $R_{p0,2}$, die Zugfestigkeit R_m und der Spannungszustand bekannt sein. Er setzt sich aus Last- und Eigenspannungen zusammen.

Der Beitrag diskutiert den Einfluss der Parameter auf das Versagensrisiko durch eine Analyse der Empfindlichkeit mittels Parametervariation.

1. Einführung

Treffen Experten der zwei Fachrichtungen ZFP und Bruchmechanik aufeinander, so zeigt die Diskussion üblicherweise sehr schnell, dass das Verständnis, welches beide Seiten für die Methodik der anderen Seite entwickeln, das Erkennen und Anerkennen sowohl der Stärken als auch der Schwächen zu schwach ausgeprägt ist. Der hier vorgestellte Beitrag will daher dazu beitragen, dieses Verständnis zu mehren. Die vorgestellten Ergebnisse stützen sich auf Anwendungen der Software PVrisk [1], für die der erste Koautor über Jahre hinweg die algorithmischen Grundlagen entwickelt hat und welche er, gemeinsam mit den zweiten Koautor in eine zuverlässige Benutzeroberfläche eingebunden hat. Diese Software wurde entwickelt, um Risse und andere Typen von Unregelmäßigkeiten – im ZFP-Jargon Fehler genannt – in Rohrleitungen und zylindrischen Druckbehältern zu bewerten. Die Software und ihre Anwendung als Werkzeug sind wesentlich in dem vom Fraunhofer-IZFP verfolgten Konzept der quantitativen zerstörungsfreien Prüfung (QZFP), welches Vorteile

durch die gemeinsame Nutzung der Methoden aufzeigen soll, die sich durch einen Gewinn an technischer Zuverlässigkeit und Sicherheit, damit auch an Wirtschaftlichkeit und Lebensdauer charakterisieren lassen.

Ziel der QZFP ist die Kombination der Prüfergebnisse basierend auf zuverlässiger ZFP und Prozeduren der Lebensdauerbestimmung von Komponenten. Wie auch immer, da das QZFP-Konzept das Wissen über die geometrischen Dimensionen der zu bewertenden Unregelmäßigkeit erfordert, kommen bei der Diskussion nur solche ZFP-Verfahren in Betracht, welche die Fähigkeit besitzen, diese Werte durch die Prüfaussage zu liefern. Da zusätzlich die Eigenschaft der Zuverlässigkeit gefordert ist, muss für die vorgeschlagenen Verfahren diese Zuverlässigkeit bekannt sein. Diese Aussage kann bei der Vielfalt der Erzeugnisformen und der dabei verwendeten Werkstoffen, dem unterschiedlichen Werkstoffeinsatz (Belastung, statisch/dynamisch, Temperatur, Korrosion, etc.) allein unter Nutzung statistischer Methoden und Kenngrößen geleistet werden.

PVrisk kann sowohl deterministisch als auch probabilistisch bewerten. Für die probabilistische Behandlung kann die statistische Unschärfe der geometrischen Prüfaussage genauso berücksichtigt werden wie diejenige der Streuung in den relevanten Materialkenngrößen. Dies setzt Wissen über reale Prüfdaten voraus sowohl die der ZFP als auch jene der Werkstoffmechanik.

Der Umgang mit realen ZFP-Daten zeigt, dass es nicht möglich ist, jede der möglichen Unregelmäßigkeiten mit der gleichen Wahrscheinlichkeit nachzuweisen und in der Größe zu bewerten. Diese Tatsache lässt sich quantitativ beschreiben durch den Begriff der Nachweiswahrscheinlichkeit (POD-probability of detection), welche von der Art der ZFP-Methode stark beeinflusst wird.

Die aktuelle Software PVrisk arbeitet mit drei Modulen: dem Geometriemodul, dem Materialmodul und dem Bewertungsmodul für die Lebensdauerabschätzung bzw. der Ermittlung des Risikos für ein Versagen (FAD-failure assessment diagram). Ihre Wirkweisen werden – um die späteren Ergebnisse zu verstehen - kurz diskutiert, was auch heißt, auf Grundlagen der Bruchmechanik eingehen zu müssen.

1.1 Prinzip der Ermittlung eines Bauteilversagens

Die Ermittlung des Risikos für ein Bauteilversagen basiert auf der Analyse des Werkstoffzustandes der sich aus dem Zustand der zu bewertenden Unregelmäßigkeit, dem Zustand der Mikrostruktur und dem Spannungszustand ergibt. Dabei Analyse des Zustandes der Unregelmäßigkeit beinhaltet ihren Nachweis, die Klassierung der Fehlerart (rissartig oder nicht) und die Größenbestimmung. Mit ihrem Wachstumspotential sind Risse natürlich diejenigen, welche am kritischsten zu bewerten sind.

Für Metalle stellt das FAD im Falle einer deterministischen Betrachtung das Analyseergebnis in der Form entweder eines Versagens oder eines Nichtversagens dar [2, 3] und wurde auch zunächst für deterministische Analysen entwickelt. Die Methode ist heute ein anerkanntes Werkzeug zur Versagensanalyse und in vielen Normen beschrieben [4, 5, 6]. Realistische Betrachtungen machen jedoch die Berücksichtigung der Zuverlässigkeit der Datenermittlung notwendig. Dies gelingt, wenn unter Nutzung von Monte Carlo Simulationen die statistische Unschärfe oder Ungewissheit in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen in das FAD integriert wird. Das Ergebnis der probabilistischen Analyse ist dann die Aussage zum Risiko für ein Versagen. Abbildung 1 zeigt ein FAD, wie es in PVrisk genutzt wird. Die Abszissenwerte S_r und Ordinatenwerte K_r sind dabei gemäß den Formeln (1-2) definiert:

$$K_r = K_1/K_{1C} \quad (1)$$

$$S_r = \sigma_{ref} / \sigma_f, \sigma_f = (\sigma_y + \sigma_{UTS})/2 \quad (2)$$

Dabei ist K_I der Spannungsintensitätsfaktor und K_{IC} die Bruchzähigkeit des Materials, σ_{ref} ist die Referenzspannung, welche sich zusammensetzen kann aus der Membranspannung σ_{ref}^m , einer Biegespannung σ_{ref}^b und einer Eigenspannung Q . σ_y ist die Streckgrenze (Rp0.2-Dehngrenze) und σ_{UTS} die Zugfestigkeit (Rm). Der Spannungsintensitätsfaktor setzt sich zusammen aus einem Anteil, der von den lastinduzierten Spannungen (Primärspannungen) beeinflusst wird und einem Anteil, der Eigenspannungen (Sekundärspannungen) berücksichtigt (Gleichung (3-5)):

$$K_I = K_I^p + K_I^s \quad (3)$$

$$K_I^p = (F_{SIF}^m \times \kappa^m \times \sigma_{ref}^m + F_{SIF}^b \times \kappa^b \times \sigma_{ref}^b) \times \sqrt{\pi b} \quad (4)$$

$$K_I^s = (F_{SIF}^m \times Q_m + F_{SIF}^b \times Q_b) \times \sqrt{\pi b} \quad (5)$$

Hierbei ist F_{SIF}^m der geometrieabhängige Korrekturfaktor für die Membranbelastungen, F_{SIF}^b entsprechend für Biegebelastungen. Im Falle von Schweißnähten können sie durch die Korrekturfaktoren κ^m (Membranbelastung) und κ^b (Biegebelastung) Berücksichtigung finden, ebenso im Falle von Eigenspannungen (Q_m, Q_b). b in dem Term $\sqrt{\pi b}$ ist die Risttiefe

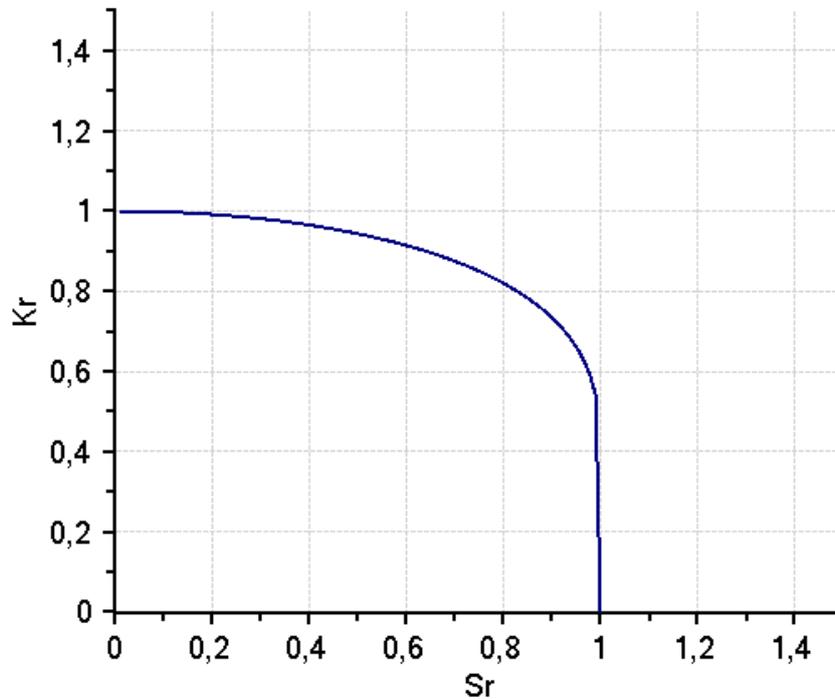


Abbildung 1. Failure Assessment Diagram, dargestellt ist die Versagenskurve

Im FAD erfolgt die Analyse durch Betrachtung eines Wertepaars (S_r, K_r), wobei K_r ein Maß für die Sprödigkeit und S_r für die Duktilität ist. Die in Abbildung 1 eingezeichnete Grenzkurve ergibt sich nach Gleichung (6), wenn S_r im Intervall $[0,1]$ variiert wird aus elastisch plastischen Überlegungen nach [7]:

$$K_r = \frac{S_r}{\sqrt{\left\{ \frac{8}{\pi^2} \ln \left(\sec \left[\frac{\pi}{2} S_r \right] \right) \right\}}} \quad (6)$$

Wird durch Auswertung von Gleichung (6) ein Punkt innerhalb der von der Grenzkurve und den Koordinatenachsen gebildeten Fläche des FAD angenommen so tritt kein Versagen auf. Das Erreichen der Grenzkurve und Annehmen von Punkten außerhalb bedeutet das Versagen der Komponente.

1.2 Geometriemodul

Im Geometriemodul von PVrisk werden die zu behandelnde Komponente und die Fehlergeometrie definiert. Abbildung 2 zeigt ein Abbild des Bildschirms aus dem GUI der Software.

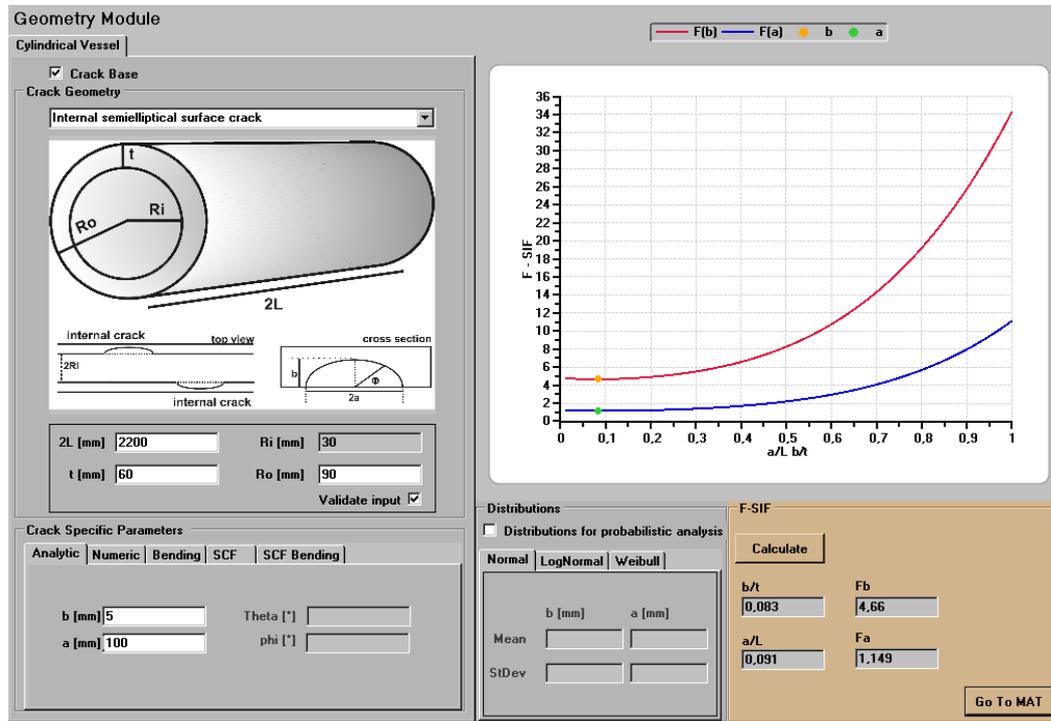


Abbildung 2. Geometriemodul, Abbild des Bildschirms

Die gezeigte Geometrie der Komponente ist die eines zylindrischen Behälters der Länge $2L = 2200$ mm mit einem Außenradius von $R_0 = 90$ mm. Bei einer Wandstärke von $t = 60$ mm ergibt sich ein Innenradius von $R_i = 30$ mm. Für die Fehlergeometrie wird das Modell eines halbelliptischen Risses der Länge $2a$ mit $a = 100$ mm und der größten Tiefe von $b = 5$ mm gewählt, der sich in axialer Richtung erstreckt und sich exakt symmetrisch in der Mittenposition des Behälters befindet. Das Modell hat den Vorteil, dass dazu analytische Formeln zur Ermittlung der Spannungsintensitätsfaktoren SIF existieren. Die sich ergebenden Geometriefaktoren nach Gleichung (4) bei Variation von a in Vielfachen von a/L und von b in Vielfachen von b/t sind ebenfalls in Abbildung 2 als rote und blaue Kurve gezeigt. Soll bzgl. der Fehlergeometrie eine Verteilungsfunktion angenommen werden, wird diese im Geometriemodul definiert. Bei rissartigen Fehlern können die Längen und Tiefen normal-verteilt, logarithmisch-normal verteilt oder Weibull-verteilt angenommen werden.

Es bleibt hier festzuhalten, dass es umfangreicher zerstörender statistischer Untersuchungen bedarf um für eine bestimmte Erzeugnisform, gefertigt aus einem bestimmten Material, die Verteilung (Häufigkeit) der Fehlergrößen zu ermitteln, die z.B. nach der Fertigung einer Komponente in ihr verbleiben. Der zu leistende Aufwand von bis zu einigen tausend metallographischen Schliffbildern zu untersuchen ist nicht unerheblich. Erst wenn dieser Aufwand getrieben wird lässt sich mit Rechenmethoden die Art der Verteilungsfunktion bestimmen. Publikationen dazu, die sich - historisch gesehen - schon sehr früh mit dieser Problematik auseinandergesetzt haben sind [8, 9]. Hier werden auch verfahrensspezifisch sich ergebende Nachweiswahrscheinlichkeiten für Oberflächenrissprüfverfahren diskutiert. Dabei zeigt sich, dass die Prüfunsicherheit der ZFP – selbst bei automatisierten Prüfverfahren mit nur einem kleinem Einfluss des menschlichen Faktors - nicht allein da-

durch gegeben ist, dass z.B. kleine Risse mit Größen in der Größenordnung der physikalischen Nachweisgrenze nicht gefunden werden, nein, auch große Fehler können übersehen werden („The evidence of absence is not the absence of evidence“ [10]).

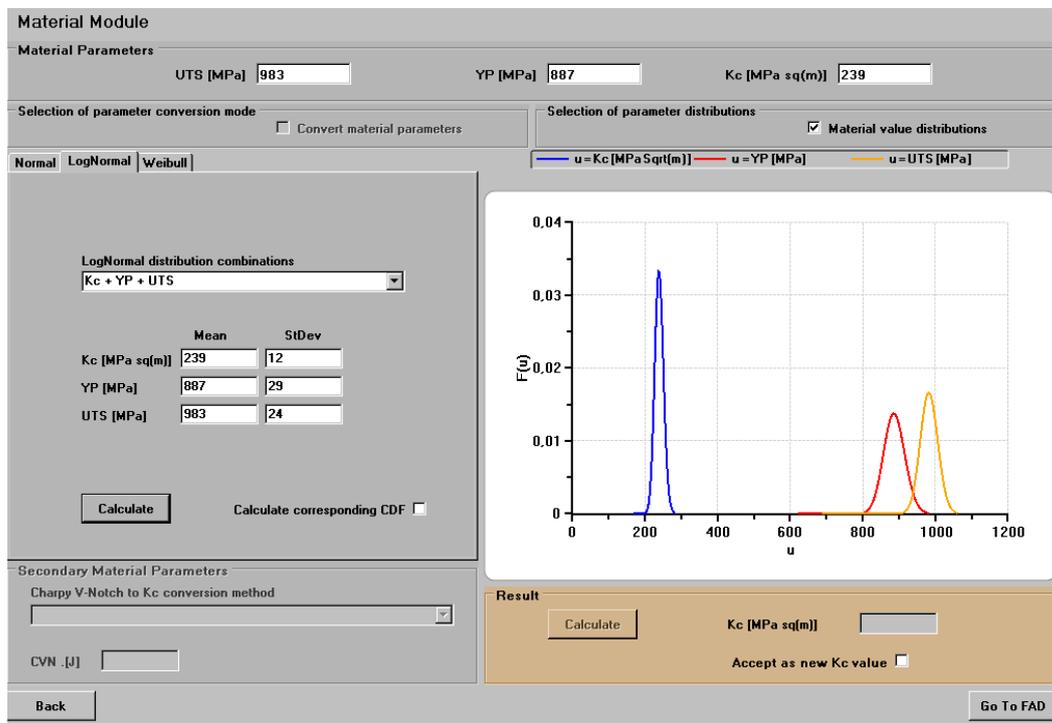


Abbildung 3. Materialmodul, Abbild des Bildschirms

1.3 Materialmodul

Die zur Bewertung notwendigen Materialeigenschaften werden im Materialmodul definiert. Es sind dies für deterministische Bewertungen die Werte für die Streckgrenze, die Zugfestigkeit und die Bruchzähigkeit, Abbildung 3 zeigt ein Abbild des Bildschirms. Im Falle der realistischen Annahme einer statistischen Verteilung der Materialkenngrößen können für bestimmte Verteilungsfunktionen auch ihre statistischen Kenngrößen eingegeben werden, die natürlich vorher in entsprechend aufwendigen zerstörenden Untersuchungen ermittelt werden müssen. Im vorliegenden Fall wurde ein hochfester Stahl gewählt, für den entsprechende Untersuchungen an einer Erzeugnisform in einem Schadensfall vorlagen. Es waren Mittelwerte für die Streckgrenze von $Y_P = 887$ MPa für die Zugfestigkeit von $U_{TS} = 983$ MPa und für die Kerbschlagarbeit nach Charpy-Test von 110 J festgestellt worden. Die zuletzt genannte Kenngröße lässt sich in PVrisk mit Modellannahmen in einen Bruchzähigkeitswert von $K_c = 239 \text{ MPa} \times \sqrt{\text{m}}$ umrechnen. Bei den genannten zerstörenden Untersuchungen [11] waren sehr kleine Streuungen ($\Delta Y_P = \pm 10$ MPa, $\Delta U_{TS} = \pm 5$ MPa und $\Delta \text{Charpy} = \pm 0.6$ J, bei allerdings sehr kleiner Stichprobenwahl gefunden worden Aus diesem Grunde wurden Modellannahmen zur Streuung der Messwerte gemacht die auf Untersuchungen an der MPA in Stuttgart zu Baustählen von Rohrleitungen bei Raumtemperatur in der Kerntechnik erfolgt waren [12] ($\Delta Y_P = \pm 3.3\%$, $\Delta U_{TS} = \pm 2.5\%$ bei z.B. $\Delta K_c = \pm 12 \text{ MPa} \times \sqrt{\text{m}}$ absolut). Mit diesen Betrachtungen ergaben sich dann unter der Annahme logarithmisch-normalverteilter Kenngrößen $Y_P = 887 \pm 29.3$ MPa, $U_{TS} = 983 \pm 24.6$ MPa und $K_c = 239 \pm 12 \text{ MPa} \times \sqrt{\text{m}}$. Diese Werte sind im Weiteren der Untersuchung benutzt worden. Dabei wurden deterministische und probabilistische Rechnungen durchgeführt. Im Falle der Probabilistik wurde die Stichprobenzahl mit 10^6 Versuchen für die Monte Carlo Simulation festgelegt.

2. Deterministische Analysen

Bei den deterministischen Analysen (Rissgeometrie und Materialkenngrößen deterministisch) wurde mit einer Rissgeometrie wie in Abbildung 1 dargestellt, halbe Risslänge $a = 100$ mm, Risstiefe $b = 5$ mm, begonnen und diejenige Last (Innendruck) bestimmt, bei der das Wertepaar (K_r, S_r) gerade auf der Grenzkurve zu liegen kommt. Abbildung 4 zeigt wie bei Annahme eines Risstiefenwachstums bei fester halber Risslänge $a = 100$ mm diese Grenzlaster kleinere Werte annehmen muss, um gerade ein Versagen zu erzeugen. Auch das nicht-lineare Verhalten erscheint sinnvoll.

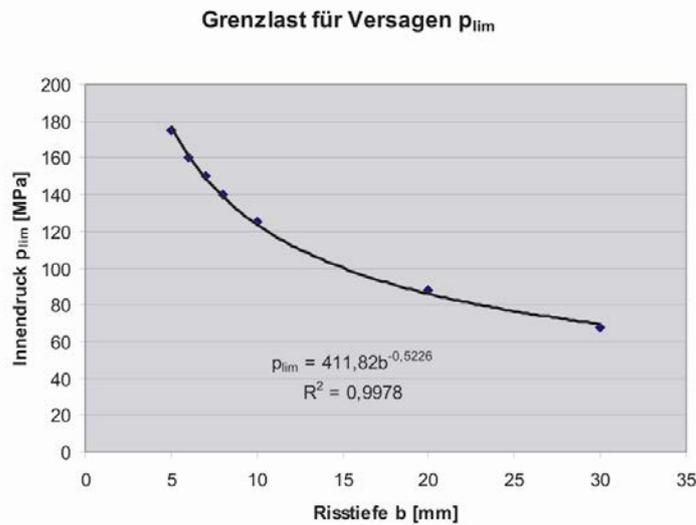


Abbildung 4. Grenzlaster p_{lim} (Innendruck), um gerade ein Versagen zu erzeugen bei zunehmender Risstiefe b , die halbe Risslänge ist mit $a = 100$ mm konstant

Die FAD sind in Abbildung 5, für $b = 5$ mm und in Abbildung 6 für $b = 30$ mm gezeigt.

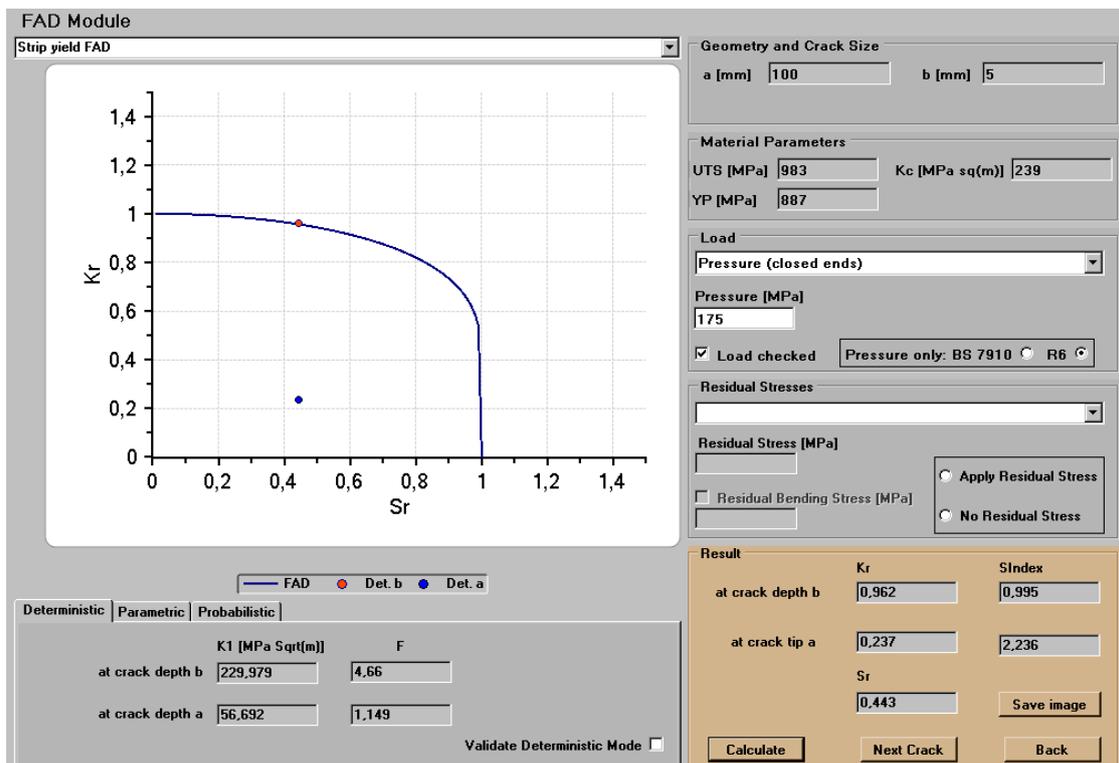


Abbildung 5. Risstiefe $b = 5$ mm, halbe Risslänge $a = 100$ mm

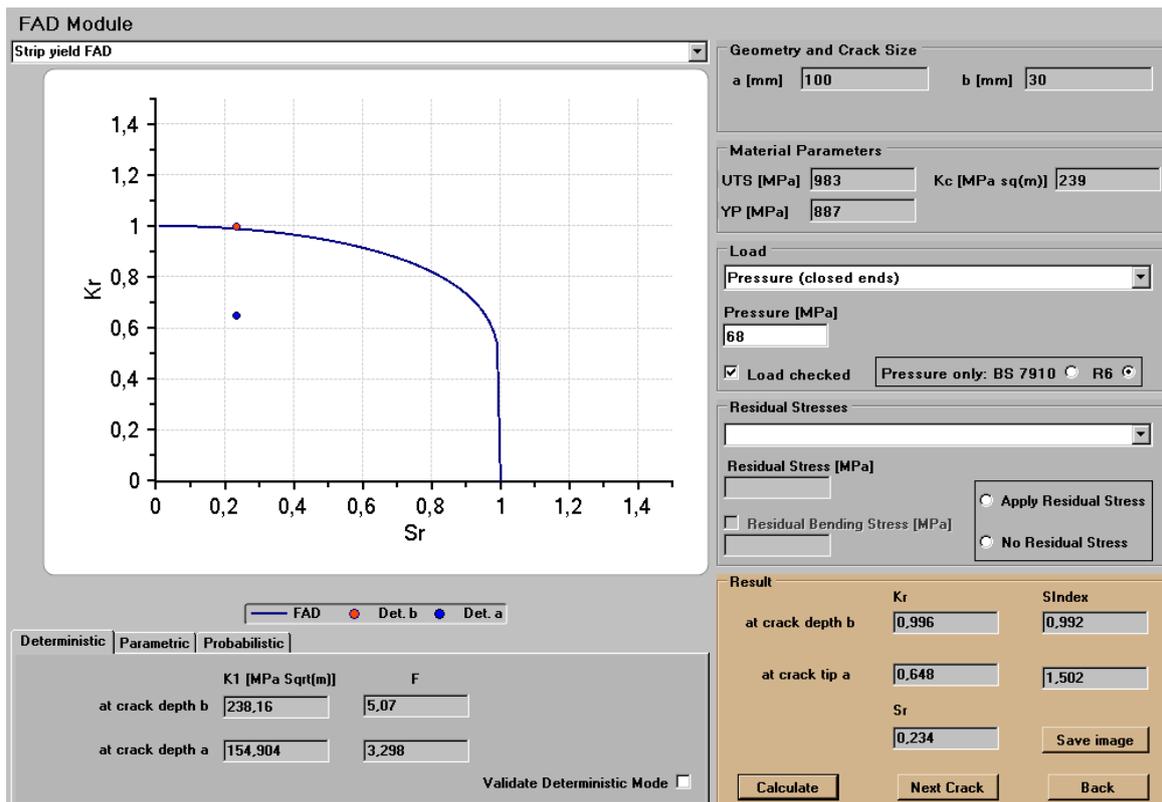


Abbildung 6. Risstiefe $b = 30$ mm, halbe Risslänge $a = 100$ mm

Bei der Risstiefe $b = 30$ mm im Vergleich mit Risstiefe $b = 5$ mm ist festzustellen, dass sich die Wertepaare (K_r, S_r) stärker nach rechts auf die K_r -Achse zu verschieben. Die Komponente reagiert spröder; weiterhin verschiebt sich der Bewertungspunkt für ein Versagen an den Rissenden (blauer Punkt) auch in Richtung größerer K_r -Werte (von 0,44 nach 0,65) und kommt damit dem Versagensbereich näher.

3. Probabilistische Bewertungen

3.1 Fehler deterministisch, Werkstoffkennwerte probabilistisch

PVrisk lässt zu, den Fehler deterministisch zu behandeln, die Materialkennwerte jedoch probabilistisch. Diese Variation ist interessant im Vergleich zu den in Abbildung 4 dokumentierten rein deterministischen Ergebnissen. Um die Ergebnisse von Abbildung 7 zu erhalten ist exakt die gleiche Situation wie in Abbildung 6 für $a = 30$ mm gerechnet worden, aber die Materialparameter wurden statistisch verteilt entsprechend Abbildung 3 angenommen. Aus dem Ergebnis lernen wir, dass deterministische Bewertungen zu konservativ sind. Die gleiche Innendruckbelastung von 68 MPa wie in der deterministischen Analyse führt im Fall probabilistischer Variation der Werkstoffkennwerte in einer Gesamtzahl von 10^6 Versuchen zu einer Anzahl von 574037 Versagensfällen, also zu einer Versagenswahrscheinlichkeit von etwa 6×10^{-1} .

Dieses Ergebnis ist nicht erstaunlich, da aus allgemeinen statistischen Überlegungen folgt, dass bei probabilistischer Behandlung die Mittelwerte der Statistik in ihrem Verhalten an die Stelle der deterministischen Werte treten. Überraschend sind trotzdem die große Anzahl der Versagensfälle und damit die große Versagenswahrscheinlichkeit.

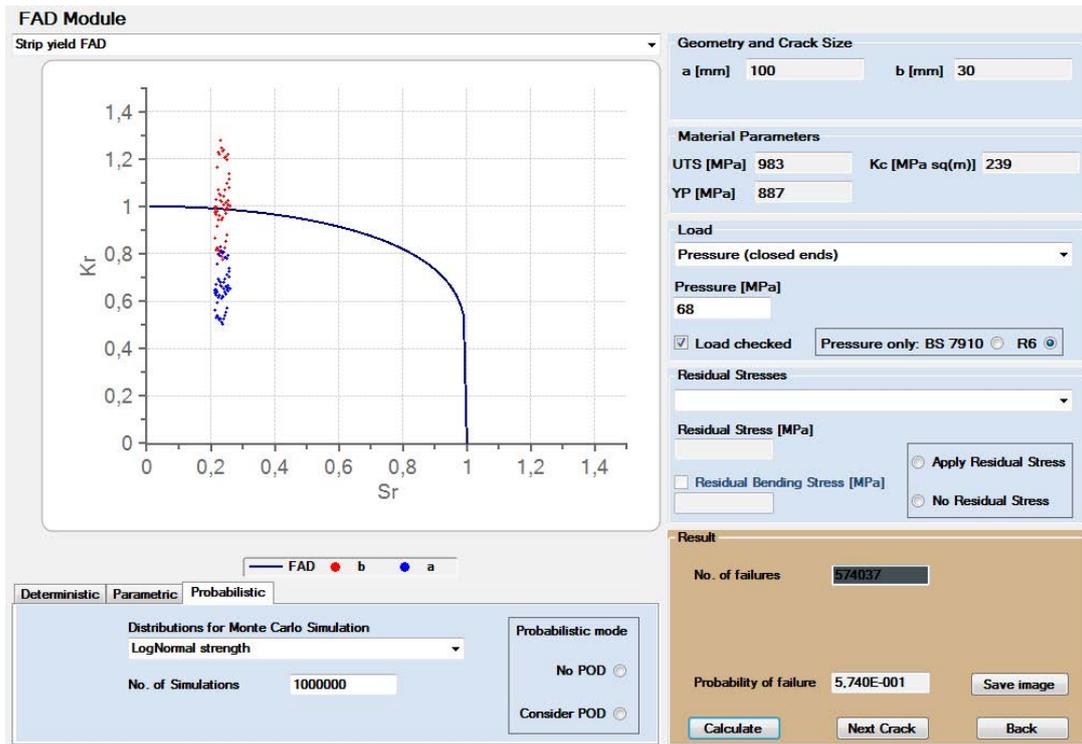


Abbildung 7. Risstiefe $b = 30$ mm, halbe Risslänge $a = 100$ mm, probabilistische Analyse

3.2 Fehler probabilistisch, Werkstoffkennwerte probabilistisch

Wenn wir die Fehlergeometrie auch entsprechend einer Statistik variieren wollen, müssen wir diese im Geometriemodul definieren. Dies ist in Abbildung 8 dargestellt und eine Weibull-Verteilung wurde gewählt.

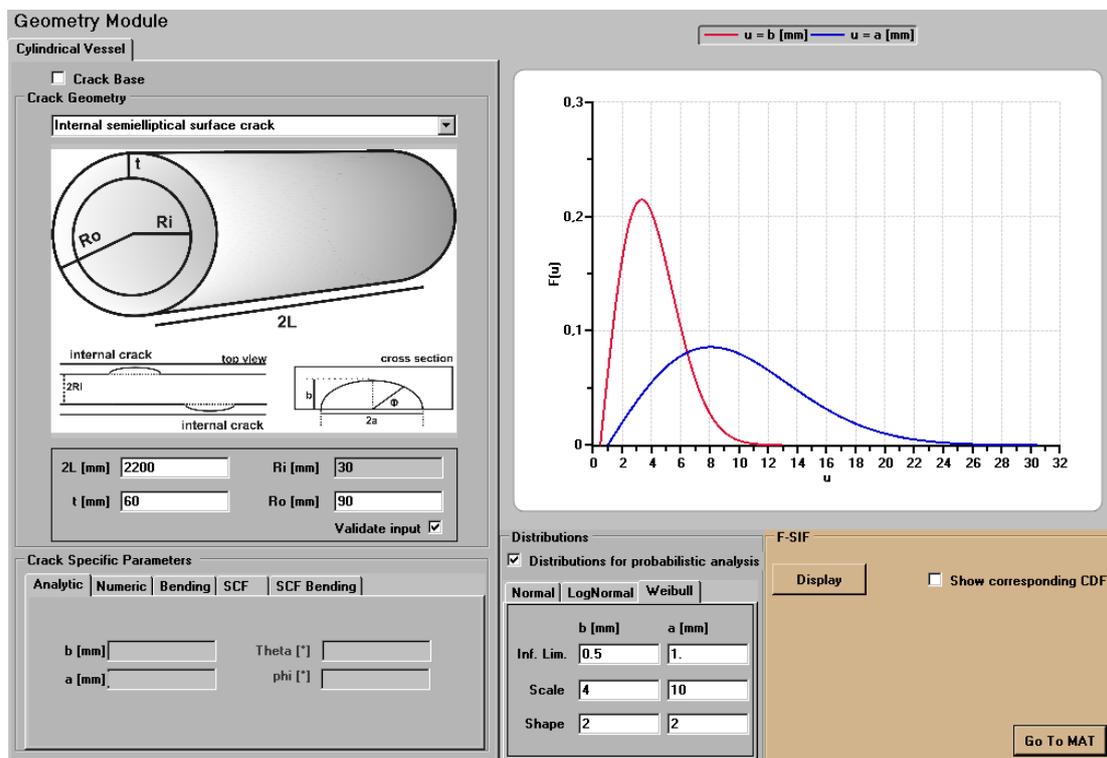


Abbildung 8. Weibull-Verteilung zur Statistik der Rissgeometrie

Danach wird angenommen, dass in der betrachteten Komponente, statistisch verteilt Risse vorkommen können, deren Tiefen zwischen 0.5 und 11 mm und deren halbe Länge zwischen 1 und 25 mm variieren können. Zusätzlich wurde unterstellt dass ein ZFP-Verfahren zur Anwendung kommt, das durch eine Nachweiswahrscheinlichkeit für Risse charakterisiert werden kann. Die Software PVrisk erlaubt die Modellierung von POD-Verteilungen. Dabei wurde sich an experimentell ermittelten POD-Kurven orientiert, welche sich für die Ultraschallprüfung mit 2MHz bzw. 4MHz auf Oberflächenrisse durch Korrosionsrissbildung für Radsatzwellen in England ergeben hatten [13]. Entsprechend der POD-Modellierung kann eine POD-Kurve z.B. approximiert werden durch eine Funktion, welche einem asymptotischen Potenzgesetz folgt. Abbildung 9 (linkes Teilbild) zeigt das mathematische Modell und im rechten Teilbild die entsprechende POD-Kurve deren Parameter in Tabelle 1 unter POD1 gelistet sind. Die rote Kurve ist die Probability of Nondetection (PND), welche sich aus 1-POD ergibt

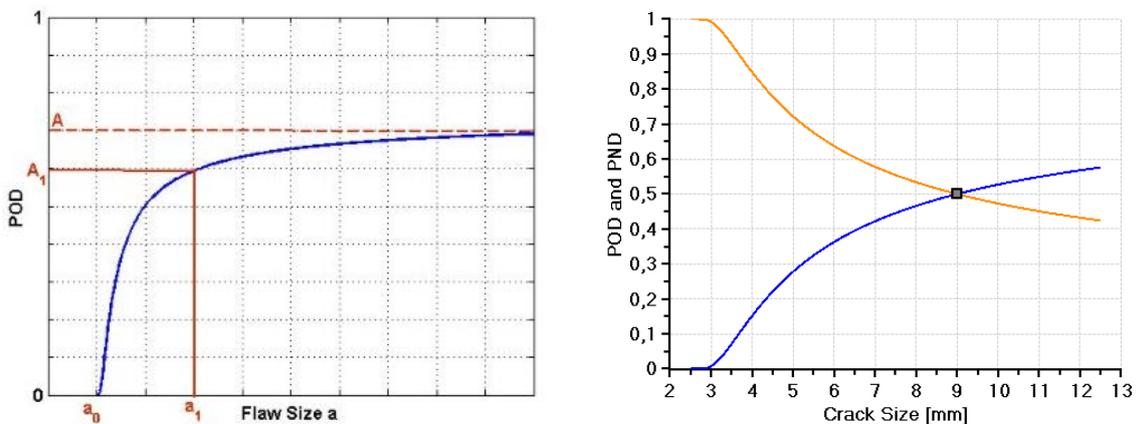


Abbildung 9. mathematische Approximation der POD nach einem asymptotischen POD-Gesetz (links) und POD1 (rechts)

Tabelle 1. Parameter zur POD-Charakterisierung

POD-Modell	A	A ₁	a ₀	a ₁
POD1	1.	0.5	2.5	9.
POD2	1.	0.5	2.0	5.
POD3	1.	0.9	0.5	5.
POD4	1.	0.9	0.5	3.
POD5	1.	0.9	0.5	1.

Beispielhaft sind in Abbildung 10 die POD-Kurven entsprechend den Modellen POD4 (links) und POD5 (rechts) dokumentiert. Es wird deutlich, wie sich durch die Verkleinerung der Werte für a₀ und a₁, sowie Vergrößerung des Wertes für A₁ die POD verbessert. Es sei darauf hingewiesen, dass in der Luftfahrt und bei schadenstoleranter Auslegung der Parameter a₁ von hoher Bedeutung ist. Er wird dort a_{90/95} genannt und gibt die Fehlergröße (z.B. Risslänge eines die Wand durchdringenden Risses in der Flugzeughaut) [14, 15] an, bei der die POD 90% erreicht und das innerhalb eines 95%-tigen Vertrauensbereiches.

Im Weiteren wurde unter der Annahme von POD1 diejenige Last bestimmt, bei der in der Gesamtzahl von 10⁶ Versuchen gerade ein zweimaliges Versagen auftritt. Dieser Innendruck bestimmt sich zu 136 MPa (Tabelle 2 erste Zeile). Mit dem ZFP-Verfahren entsprechend POD1 wurde 389124-mal ein Riss detektiert. Vergleicht man dazu den Fall, dass bei den 10⁶ Versuchen und gleicher Last keine ZFP eingesetzt wird (der POD-Modul wird nicht aktiviert), steigt die Anzahl der Versagensfälle auf 148 Fälle an (Zeile 2 in Tabelle 2). Hier wird deutlich, welchen Gewinn die Nutzung der ZFP für die Sicherheit der

Komponente bringt. Die Wahrscheinlichkeit für ein Versagen wird von 1.48×10^{-4} auf 2×10^{-6} – also um zwei Größenordnungen - verringert.

Sodann wurde die Bruchzähigkeit K_{Ic} gegenüber dem Wert von $239 \text{ MPa} \times \sqrt{\text{m}}$ um 2% ($4.6 \text{ MPa} \times \sqrt{\text{m}}$) abgesenkt zu $226.4 \text{ MPa} \times \sqrt{\text{m}}$ und die Spannweite ihrer Streuung gegenüber dem Wert von $\pm 12 \text{ MPa} \times \sqrt{\text{m}}$ um 2% vergrößert zu $\pm 16.6 \text{ MPa} \times \sqrt{\text{m}}$ also $K_{Ic} = 226.4 \pm 16.6 \text{ MPa} \times \sqrt{\text{m}}$. Die Wirkung dieser Maßnahme ist auch in Tabelle 2 dokumentiert.

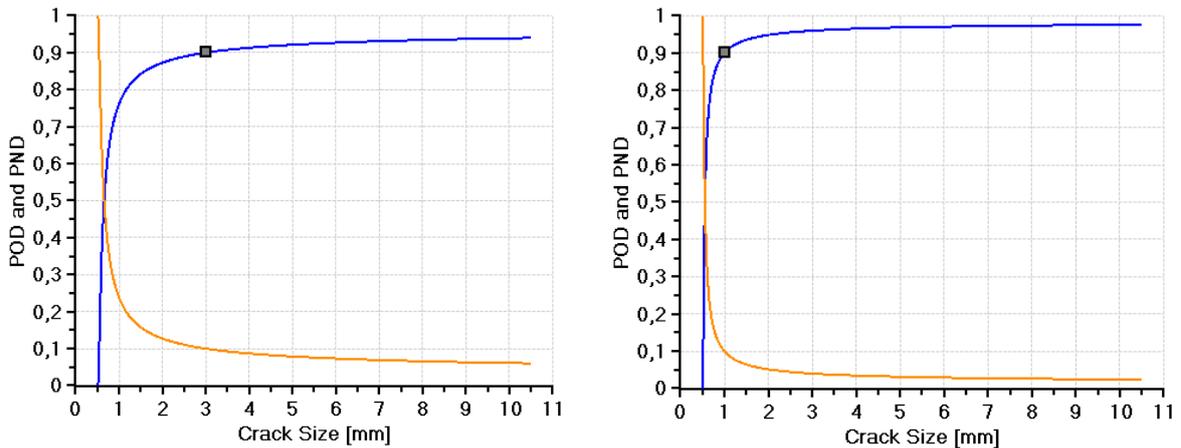


Abbildung 10. POD4 (links) und POD5 (rechts)

Tabelle 2. Zähigkeitsvariation und POD-Verbesserung

K_{Ic} [$\text{MPa} \times \sqrt{\text{m}}$]	Belastung [MPa]	Anzahl der Versagen	POD-Modell	Anzahl der Detektionen	POD-Wert
239 ± 12	136	2	POD1	389124	0.39
239 ± 12	136	148	keine ZFP		
226.4 ± 16.6	136	81	POD1	388980	0.39
226.4 ± 16.6	136	67	POD2	449431	0.45
226.4 ± 16.6	136	14	POD3	870152	0.87
226.4 ± 16.6	136	10	POD4	897365	0.9
226.4 ± 16.6	136	2	POD5	958206	0.96

Die Anzahl der Versagensfälle steigt auf 81 Fälle in der Gesamtheit von 10^6 Versuchen an. Nun stellt sich die Frage, ob man diesen Verlust in der Bauteilsicherheit kompensieren kann, indem das verwendete ZFP-Verfahren in seiner Nachweisempfindlichkeit verbessert wird. Die Verbesserung charakterisieren wir durch den Übergang zu den Modellen POD2, POD3, POD4 und POD5. Wie Tabelle 2 zeigt nimmt mit der Verbesserung der POD die Anzahl der Versagensfälle wieder ab und erreicht bei POD5 wieder den Wert von nur 2 Versagen in 10^6 Versuchen.

4. Schlussfolgerungen

Für weitere Diskussionen und Untersuchungen bleibt festzuhalten:

- Die deterministische bruchmechanische Bewertung ist konservativ und damit allenfalls für orientierende Bewertungen sinnvoll.
- Die Bruchzähigkeit absolut und ihre Streuung entlang einer Komponente sind die sensitiven Parameter, welche die Versagenswahrscheinlichkeit dominierend beeinflussen. Eine Absenkung der Bruchzähigkeit um 2% und die Vergrößerung ihrer Streuung um

2% erhöht in dem vorgestellten Beispiel die Versagenswahrscheinlichkeit um fast zwei Größenordnungen, was allein dadurch kompensiert werden kann, indem die ZFP entscheidend in ihrer Nachweisempfindlichkeit gesteigert wird. Die hier diskutierte ZFP-Verbesserung von POD1 nach POD 5 ist kaum noch zu steigern und es ist lohnenswert in einem weiteren Untersuchungsschritt abzuschätzen, mit welchem finanziellen Aufwand diese Verbesserungen nur erreicht werden können.

- Für die Stahlhersteller stellt sich gleichzeitig die Frage mit welchem Aufwand die Verbesserung der Bruchzähigkeit – zumindest für einige sicherheitsrelevante Erzeugnisformen – gelingt, wenn man auch die Streuung der Bruchzähigkeitswerte entlang der Erzeugnisform und von Charge zu Charge mit in Betracht zieht.
- Die Werkstoffcharakterisierung als Teilgebiet der ZFP verfolgt die Zielsetzung Werkstoffkenngrößen wie Bruchzähigkeit, Streckgrenze und Zugfestigkeit an der Komponente zu ermitteln [16]. An z.B. gewalztem Blech werden Genauigkeiten zur Vorhersage der Streckgrenze von etwa 5% mit mikromagnetischen Methoden erzielt.
- Wir brauchen weitere Parameterstudien zur Ermittlung der Streuung der Werkstoffkenngrößen einerseits und der POD der ZFP andererseits an Komponenten und die probabilistische Beschreibung des Werkstoffversagens muss ausgeweitet werden auf Belastungen durch Ermüdung, auch unter Berücksichtigung von probabilistisch angenommenen Belastungskollektiven.

Referenzen

- [1] J.H. Kurz & D. D. Cioclov (2008). PVrisk user manual, Version 1.1, June 2008, © Fraunhofer-IZFP
- [2] A.R. Dowling & C.H.A.Townley (1975). The effects of defect on structural failure: A two-criterion approach, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 3, pp.77-137
- [3] R.P. Harrison, K. Loosemore, & I. Milne (1976). Assessment of the integrity of structures containing defects, CEGB Report R/H/R6 Central Electricity Generation Board, U.K.
- [4] R.W. Nichols (1987). The revision of the structural Integrity Assessment method CEGB/R6, International Journal of Pressure Vessels and piping, Vol.35, pp. 3-20
- [5] U. Zerbst, Ch. Wiesner, M. Kocak, & L. Hodulak (1999) SINTAP: Entwurf einer vereinheitlichten europäischen Fehlerbewertungsprozedur – eine Einführung, GKSS 99/E/65, p.125
- [6] British Standard Institution (2005). BS 7910: 2005 Guide to methods for accessing the acceptability of flaws in metallic structures, p. 297
- [7] D.S. Dougdale (1960). Yielding of steel sheets containing slits, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 8, pp. 100-104
- [8] K.J. Kremer (1984); Das Therm-O-Matic Verfahren, ein neuartiges Verfahren für die on-line-Prüfung von Stahlerzeugnissen auf Oberflächenfehler. Berichtsband 4 zur 3. Europäischen Konferenz über zerstörungsfreie Prüfung, Florenz, 15.-18. Oktober, AIPND
- [9] R. Palanisamy, C.J. Morris, D.M. Keener, & M.N. Curran (1986). On the accuracy of a.c. flux leakage, eddy current, EMAT and ultrasonic methods of measuring surface connected flaws in seamless steel tubing, in Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Volume 5A, Plenum Press, pp.215-223
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Evidence_of_absence
- [11] C. Klinger et al. (2010). Failure analysis on a broken ICE3 railway axle, Vortrag auf dem ESIS TC24 meeting to railway structures, 11. Oktober, BAM, Berlin
- [12] P. Julisch (2007). Bruchmechanische Bewertung von Rohrleitungskomponenten auf der Basis statistisch verteilter Werkstoffkennwerte, Dissertation an der Universität Stuttgart, Fakultät für Maschinenbau
- [13] A. Lawton (2010). The UK wheelset programme, Vortrag auf dem ESIS TC24 meeting to railway structures, 11. Oktober, BAM, Berlin
- [14] H.J. Schmidt, B. Schmidt-Brandecker, & G. Tober (1998). Design of modern aircraft structure and the role of NDT, Proceedings of the 7th European Conference on NDT, May 26-29, Kopenhagen
- [15] G. Dobmann, D. Cioclov, & J.H. Kurz (2007). The Role of Probabilistic Approaches in NDT Defect-Detection, -Classification, and Sizing, Welding in the world. 51, 5/6, pp. 9-13.
- [16] B. Wolter, & G. Dobmann (2006). Micromagnetic Testing for Rolled Steel, In Proceedings of the European Conference on Nondestructive Testing (9), Th.3.7.1.