



Bruchmechanische Bewertung der Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfungen – Aufgaben, Ziele und geeignete Verfahren

K.-H. Herter, H. Kockelmann, X. Schuler, H. Waidele
Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart

**30. MPA-Seminar in Verbindung mit dem 9. Deutsch-Japanischen Seminar
Stuttgart, 6. und 7. Oktober 2004**



1 Einleitung

Die Gewährleistung der Integrität und der Funktion sicherheitstechnisch relevanter Bauteile entscheidet im wesentlichen über die Betriebssicherheit, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit einer Anlage. Eine grundlegende Voraussetzung hierfür bildet eine effiziente schutzziel- und zustandsorientierte Betriebsüberwachung und wiederkehrende Prüfung.

In diesem Zusammenhang ist es erforderlich die für ein Bauteil sicherheitstechnisch relevanten Fehlergrößen zu quantifizieren. Diese müssen dann durch die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) sicher aufgefunden werden und sind konservativerweise als Risse zu betrachten. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer engen Interaktion zwischen Bruchmechanik und ZfP, um bruchmechanische Bewertungen von postulierten oder betrieblich aufgefundenen Fehlern durchzuführen zu können. Diese Interaktion verläuft in zwei Richtungen. Zum einen liefert die bruchmechanische Analyse Vorgaben für die ZfP hinsichtlich Prüfempfindlichkeit, Prüfintervall und Prüfort, zum anderen liefert die ZfP Eingangsdaten für die bruchmechanische Analyse wie Fehlergröße und Fehlerorientierung.

Je nach sicherheitstechnischer Bedeutung der zu betrachtenden Komponenten und Systeme ergeben sich für die ZfP im Rahmen einer bruchmechanischen Analyse unterschiedliche Anforderungen und daraus abgeleitet unterschiedliche Aussagen.

Ist ein Versagen einer Komponente oder eines Systems zur Vermeidung von Folgeschäden auszuschließen, Gruppe 1 Komponenten (z.B. RDB und HKL), ist ein Integritätsnachweis zu führen. Im Rahmen des Integritätskonzeptes werden hierbei die Ursachen von möglichen Schädigungsmechanismen überwacht, [1], [2]. Die Vorgehensweise im Rahmen des Integritätsnachweises einer im Betrieb befindlichen Komponente ist in Bild 1 schematisch dargestellt. Durch diese „proaktive Vorgehensweise“ wird eine Schädigung und demzufolge auch ein Versagen der betrachteten Komponente ausgeschlossen. Bruchmechanische Analysen

und zerstörungsfreie Prüfungen bilden in diesem Zusammenhang redundante Maßnahmen zur Absicherung der Komponentenintegrität. Eingangsgröße für die bruchmechanische Analyse sind postulierte minimal auffindbare Fehlergrößen.

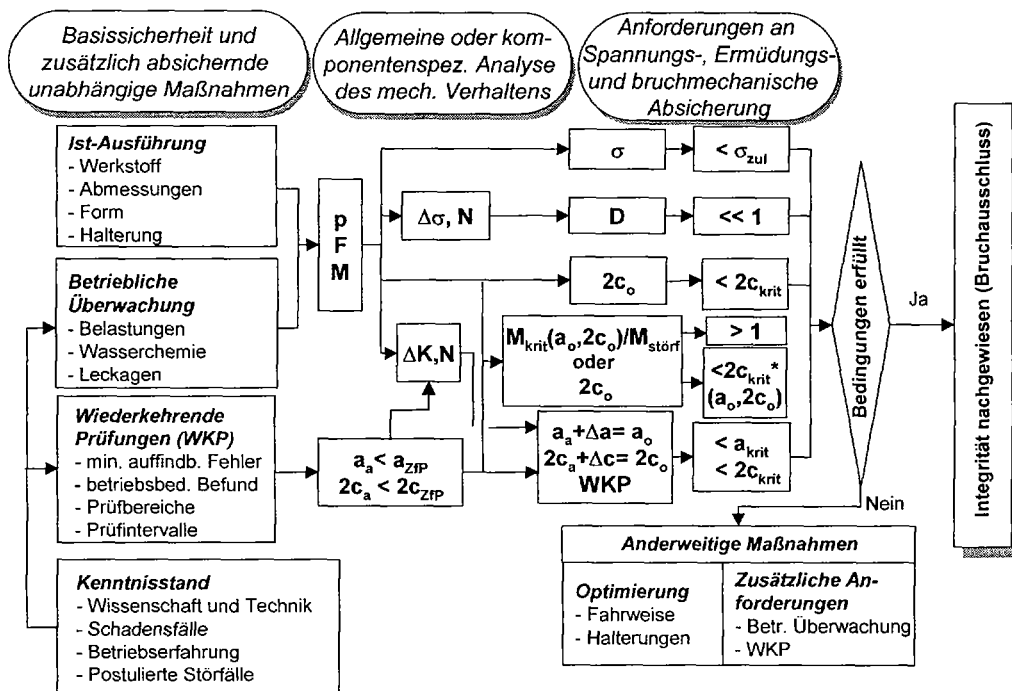


Bild 1: Nachweis der Integrität einer Komponente oder eines Systems im Betrieb (schematisch)

Im Bereich der vorbeugenden Instandhaltung werden redundant vorhandene Komponenten und Systeme betrachtet, bei denen das Versagen von Einzelkomponenten sicherheitstechnisch zulässig ist, Gruppe 2 Komponenten (z.B. SIWI Pumpen). In diesem Fall sind die Folgen von möglichen Schädigungsmechanismen zu überwachen, d.h. im Laufe des Betriebs können sich Schädigungen, wie z. B. Rissbildungen entwickeln, die durch zerstörungsfreie Prüfungen aufgefunden und deren Größe quantifiziert werden kann. Eingangsgröße für die bruchmechanische Analyse können in diesem Fall sowohl die so aufgefundenen reale betriebliche Fehler als auch postulierte minimal auffindbare Fehlergrößen sein. Die bruchmechanische Analyse in Kombination mit der ZfP dient hierbei einer Optimierung der Instandhaltungsmaßnahmen und erhöht somit neben der Sicherheit vor allem die Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Anlage, ist jedoch im Hinblick auf sicherheitstechnische Gesichtspunkte nicht zwingend erforderlich.

2 Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfungen

Die bruchmechanische Bewertung beinhaltet im wesentlichen die Ermittlung einer zulässigen Fehlergröße (Zulässigkeitsgrenze), bei der ein Versagen der Komponente unter den gegebenen Belastungen und Randbedingungen mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann.

Dieser zulässigen Fehlergröße ist dann der in der Komponente tatsächlich vorhandene oder zu postulierende Fehler gegenüberzustellen, Bild 2.

Die maßgebliche Eingangsgröße für einen bruchmechanischen Integritätsnachweis (nur postulierte Fehler, Gruppe 1 Komponenten) ist die mittels ZfP minimal auffindbare Fehlergröße. Diese ist in Abhängigkeit des verwendeten Prüfverfahrens, der Prüfbarkeit, der Ergebnisse der Fertigungsprüfung, der Betriebserfahrung und der Ergebnisse der wiederkehrenden Prüfungen (WKP) in der Regel für jede zu betrachtende Komponente oder Schweißnaht festzulegen und ggf. durch Versuche zu verifizieren. Bei einheitlichen Voraussetzungen kann evtl. auch eine systemweite Festlegung erfolgen.

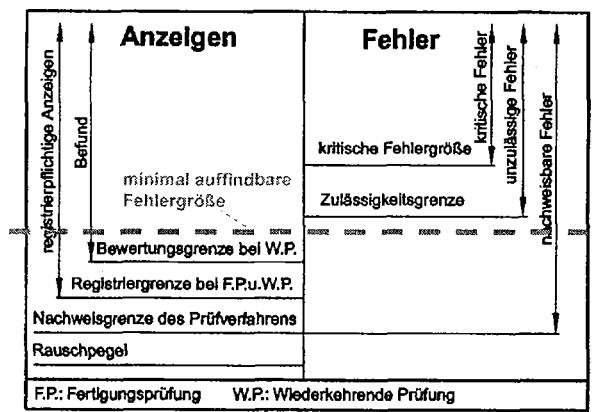


Bild 2: Zuordnung von Anzeigen und Fehlern nach KTA 3201.4 [3] und Einordnung der minimal auffindbaren Fehlergröße

Bei real aufgefundenen Fehlern ist die Befundgrenze ggf. unter Berücksichtigung eines komponenten- und prüfspezifischen Sicherheitszuschlags die maßgebliche Eingangsgröße.

3 Vorgehensweise bei der bruchmechanischen Bewertung

Zusammenfassend lässt sich die Vorgehensweise bei der bruchmechanischen Bewertung der Integrität in 6 Schritte unterteilen, [4], die in Bild 3 in Form eines Flussdiagramms dargestellt sind und nachfolgend stichpunktartig beschrieben werden.

Schritt 1: Berechnung der kritischen Fehlergröße

Die kritischen Fehlergröße wird durch die maximal auftretende Belastung (anlagen- und systemspezifisch festzulegende Lastkombination aus betrieblichen und störfallbedingten Belastungen) bestimmt (Ausschluss des Versagens bei maximaler Belastung).

Bei Rohrleitungskomponenten ist dies in der Regel die kritische Schlitzlänge $2c_{\text{krit}}$ (Durchrisslänge). Hierzu können Grenzlastberechnungen oder bruchmechanische Berechnungen herangezogen werden.

Schritt 2: Definition eines Ausgangsfehlers (Tiefe a_a und Länge $2c_a$)

Der Ausgangsfehler ist eine komponentenspezifische Festlegung der Fehlergröße, die durch zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) sicher detektierbar ist. Der Sicherheitsfaktor S_{ZfP} ist komponenten- und prüfspezifisch festzulegen und kann z.B. anhand einer probabilistischen Empfindlichkeitsstudie quantifiziert werden.

$$\begin{array}{ll} \text{Fehlertiefe} & a_a = a_{ZfP} S_{ZfP} \\ \text{Fehlerlänge} & 2c_a = 2c_{ZfP} S_{ZfP} \end{array}$$

Sind in der bruchmechanischen Analyse postulierte Fehler zu betrachten (Integritätsnachweis) so ist der Ausgangsfehler durch die minimal auffindbare Fehlergröße definiert, Bild 2.

Schritt 3: Berechnung der Rissentwicklung Δa und $2\Delta c$

Die Risswachstumsberechnung (Δa , $2\Delta c$) für den Ausgangsfehler (Tiefe a_a und Länge $2c_a$) ist mit spezifizierten Belastungen des bestimmungsgemäßen Betriebs oder für im Rahmen betrieblicher Messungen ermittelter Belastungen und jeweils zugehöriger Zyklenzahlen durchzuführen. Die Fehlergröße am Ende des zu betrachtenden Zeitraumes ergibt sich zu

$$\begin{array}{ll} \text{Fehlertiefe} & a_o = a_a + \Delta a \\ \text{Fehlerlänge} & 2c_o = 2c_a + 2\Delta c \end{array}$$

Das Risswachstum ist für einen Zeitraum, der die Prüfintervalle der WKP sicher abdeckt, zu berechnen. Das WKP-Konzept und die betriebliche Überwachung sind entsprechend anzupassen.

Schritt 4: Bewertung vorhandene oder postulierte Fehlergröße < zulässige Fehlergröße, Leck-vor-Bruch Verhalten

a) Teildurchriss ($a_o/s < 1$)

Die Endfehlerlänge $2c_o$ muss kleiner sein als die kritische Schlitzlänge $2c_{krit}$, d.h. $2c_o < 2c_{krit}$. Für $2c_o \geq 2c_{krit}$ ist zu zeigen, dass $2c_o$ kleiner ist als die kritische Fehlerlänge $2c_{krit}^*$ für einen Teildurchriss der Tiefe a_o , d.h. $2c_o < 2c_{krit}^*(a_o/s)$ oder es ist zu zeigen, dass die kritische Belastung für die Ausgangsfehlergröße ($a_a, 2c_a$) größer ist als die zur Berechnung der kritischen Schlitzlänge $2c_{krit}$ verwendete Belastung.

b) Schlitz ($a_o/s = 1$)

Die Endfehlerlänge $2c_o$ muss kleiner sein als die kritische Schlitzlänge $2c_{krit}$.

Schritt 5: Berechnung der Leckfläche A_o

Die Leckfläche A_o wird berechnet mit der kritischen Durchrisslänge $2c_{krit}$ (Schritt 1) und der Lecköffnung (Leckklaffung oder COD) für Belastungen des bestimmungsgemäßen Betriebs.

Schritt 6: Berechnung der Ausströmrates

Es ist zu zeigen, dass bei Belastungen des bestimmungsgemäßen Betriebs die Leckrate $\dot{m} > \dot{m}_{LÜS}$ ist. Der Sicherheitsfaktor S ist anlagen- und systemspezifisch festzulegen. Hierauf ist insbesondere das WKP-Konzept anzupassen.

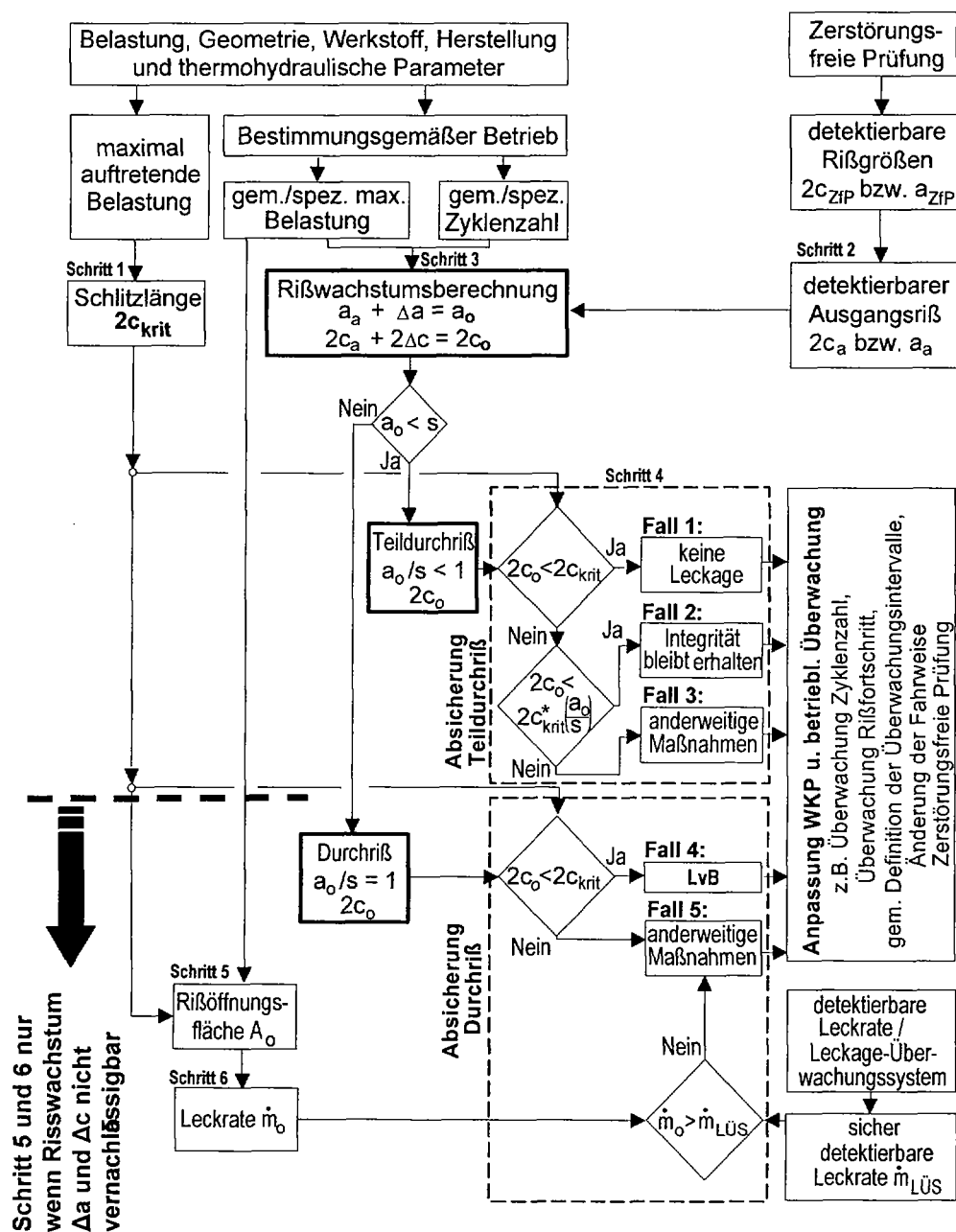


Bild 3: Vorgehensweise bei der bruchmechanischen Bewertung (Flussdiagramm) gemäß [4]

4 Berechnungsverfahren für bruchmechanische Nachweise

4.1 Risswachstumsberechnung

Risswachstumsberechnungen sind abhängig von Werkstoff und Schadensmechanismus für zyklische (Ermüdungsrisswachstum) und/oder zeitabhängige (korrosionsgestützte) Belastungen durchzuführen.

Das zyklische Risswachstum kann anhand des sog. Paris-Gesetzes beschrieben werden, Bild 4. Dabei wird der Risszuwachs je Zyklus als Funktion der Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors ΔK_I beschrieben. Unter Verwendung der im ASME Code, Section XI angegebenen Risswachstumsraten unter Luft- oder LWR-Mediumsbedingungen sind in der Regel konservative Abschätzungen möglich, Bild 5.

Das korrosionsgestützte Risswachstum kann in Form des zeitabhängigen Risszuwachses als Funktion des statischen Spannungsintensitätsfaktors K_I beschrieben werden. Entsprechende Angaben für Stähle unter LWR-Mediumsbedingungen sind z.B. aus den Untersuchungen [10], Bild 6, für ferritische und [11], Bild 7, für austenitische Stähle in sauerstoffhaltigem Hochtemperaturwasser verfügbar.

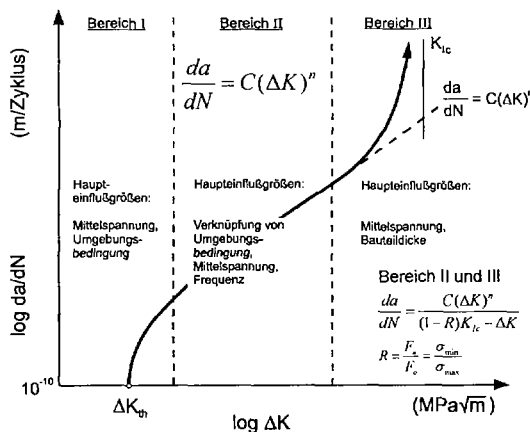


Bild 4: Beschreibung des zyklischen Risswachstums

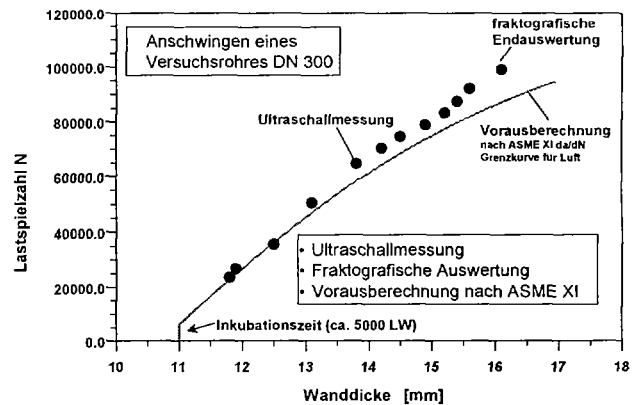
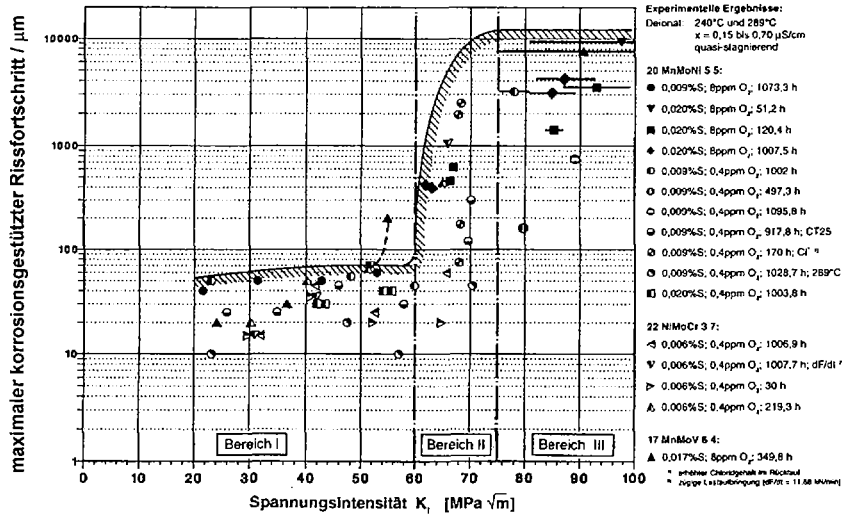


Bild 5: Vergleich des berechneten zyklischen Risswachstums mit Versuchsergebnissen



**Korrosiongestützte Rissvertiefung
 verschiedener ferritischer Stähle**

- bis $K_I < 60 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \Rightarrow \Delta a = 70 \mu\text{m}$
- ab $K_I > 60 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \Rightarrow \Delta a$ steigt deutlich an

Bild 6: Korrosionsgestütztes Risswachstum für ferritische Stähle nach [10]

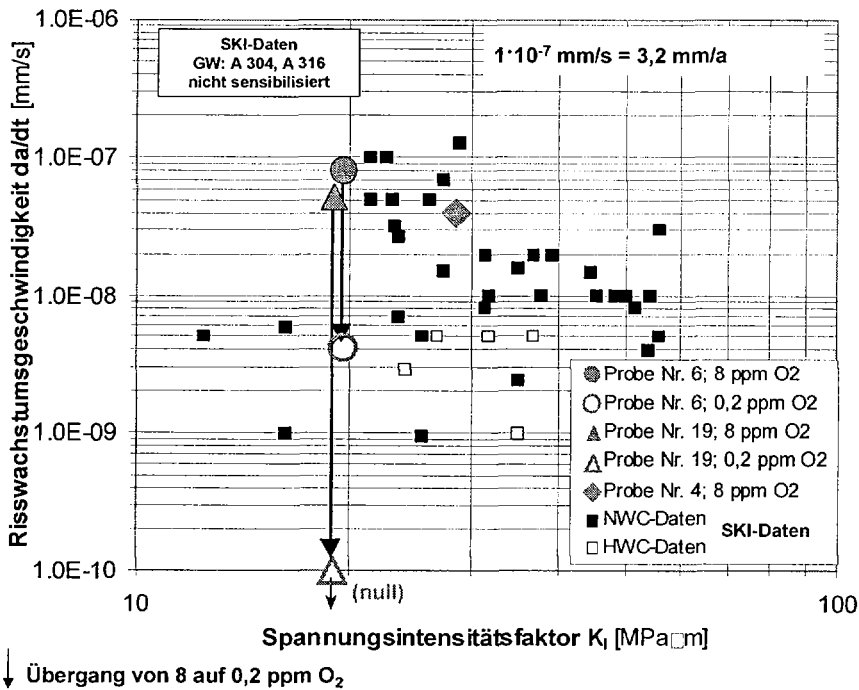


Bild 7: Korrosionsgestütztes Risswachstum für austenitische Stähle nach [11]

4.2 Bruchmechanische Berechnung kritischer Fehlergrößen

Zur Berechnung von kritischen Fehlergrößen oder maximal zulässigen Belastungen kommen im wesentlichen die in Bild 8 aufgeführten Berechnungsverfahren zur Anwendung.

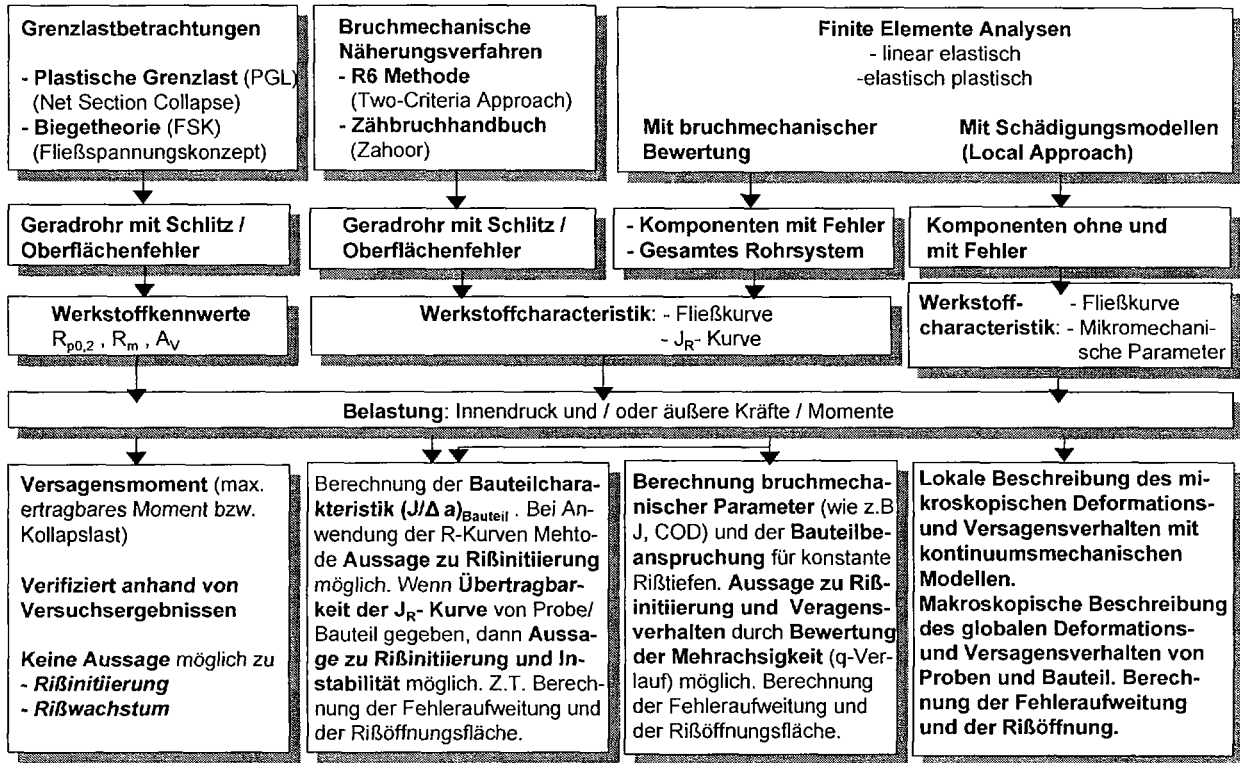


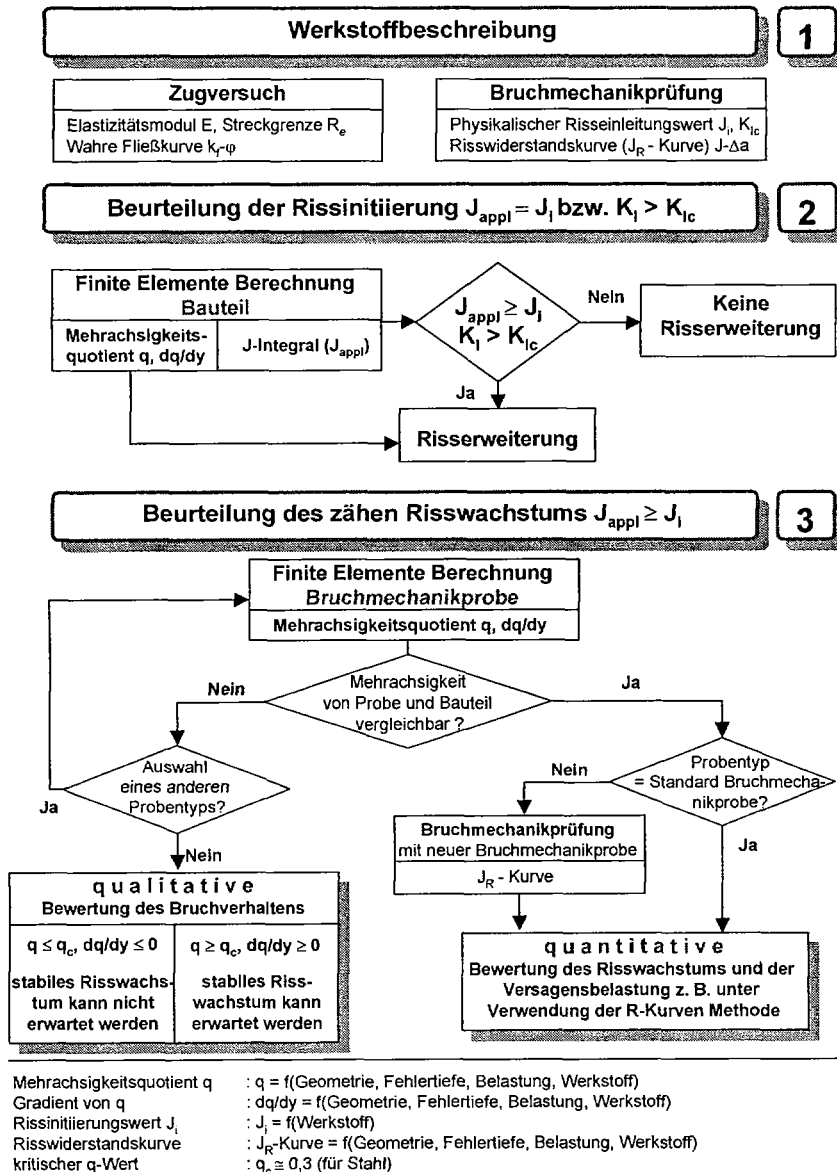
Bild 8: Analytische und numerische Berechnungsverfahren zur bruchmechanischen Analyse

Analytische Verfahren wie **Grenzlastbetrachtungen** und bruchmechanische Näherungsverfahren ermöglichen mit einem vergleichsweise geringeren Aufwand Aussagen über das Tragverhalten von fehlerbehafteten Rohrleitungen, wobei die Anwendungsgrenzen (geometrie- und werkstoffbedingt) und dadurch bedingte Einschränkungen zu berücksichtigen sind. Eine belastbare Bewertung ist mit diesen Verfahren nur dann gegeben, wenn diese im Vergleich mit experimentellen Untersuchungen oder anhand detaillierter Finite Elemente Berechnungen ausreichend verifiziert wurden. Abgeleitet aus einer Vielzahl experimenteller Untersuchungen wurden in [4] die Werte für die bei der Grenzlastberechnung maßgeblichen Fließspannung σ_f in Abhängigkeit der Rohr- und Fehlergeometrie sowie der Werkstoffzähigkeit verifiziert, so dass auf dieser Basis eine abgesicherte Bewertung von druckführenden Rohrleitungen in einem weiten Anwendungsbereich möglich ist.

Bruchmechanische Näherungsverfahren, wie z.B. das R6-Verfahren oder Handbuch-Lösungen, ermöglichen die Berechnung bruchmechanischer Parameter (üblicherweise J-Integral) als Funktion der Belastung und damit verbunden eine Bewertung im Hinblick auf Rissinitiierung. Prinzipiell kann mit diesen Verfahren auch eine Aussage zum weiteren Versagensablauf getroffen werden. Dies ist allerdings nur dann möglich, wenn die an Laborproben ermittelten Risswiderstandskurven als repräsentativ für die zu betrachtende Komponente angesehen werden können. Hierzu ist es erforderlich, dass die Mehrachsigkeit des Spannungszustandes im Ligament von Probe und Komponente vergleichbar sind. Eine Me-

thodik zur Bewertung fehlerbehafteter Komponenten, die diesen Sachverhalt berücksichtigt ist in [5] und [6] beschrieben und in Bild 9 grafisch dargestellt. Ist dies nicht der Fall, so ist die Anwendung der bruchmechanischen Näherungsverfahren auf die Ermittlung der Last bei Rissinitiierung beschränkt. Nach derzeitigen Erfahrungen liefert das R6-Verfahren im Vergleich zu experimentellen Daten die besten Ergebnisse, [7], [8], [9]. Ein Vergleich der mit der R6-Methode berechneten Initiierungslasten mit experimentellen Ergebnissen ist in Bild 10 beispielhaft für austenitische Rohre DN 200 mit Umfangsfehlern dargestellt.

Im Bedarfsfall können bei Vorliegen der erforderlichen Unterlagen (Fließkurve des Werkstoffs, bruchmechanische Kennwerte) detailliertere Untersuchungen mit **numerischen Berechnungsverfahren** erfolgen. Dabei kommt üblicherweise die Finite Elemente (FE) Methode zur Anwendung. Damit sind Aussagen zur Rissinitiierung und bei entsprechender Berücksichtigung der Mehrachsigkeit des Spannungszustandes zum weiteren Versagensverhalten möglich, Bild 9. Eine derartige bruchmechanische Bewertung kann für beliebige Komponenten oder gesamte Rohrleitungssysteme unter Berücksichtigung beliebiger Fehlergeometrien durchgeführt werden. Weiterführende Berechnungsmethoden basieren auf der Beschreibung des mikroskopischen Deformations- und Versagensverhaltens mit kontinuummechanischen Modellen (schädigungsmechanische Ansätze). So ist eine makroskopische Beschreibung des globalen Verformungs- und Versagensverhaltens der Komponente einschließlich der Fehleraufweitung, Rissöffnungsfläche bzw. Leckfläche und stabilem Risswachstum möglich. Für diese elastisch-plastischen Analysen sind werkstoffseitig neben der wahren Fließkurve weitere Parameter für das schädigungsmechanische Modell und somit eine detaillierte Werkstoffcharakterisierung erforderlich. Der Vorteil von numerischen Berechnungen ist die universelle Einsetzbarkeit, der wesentliche Nachteil liegt im hohen erforderlichen Aufwand.



Mehrschsigkeitsquotient q : $q = f(\text{Geometrie, Fehlertiefe, Belastung, Werkstoff})$
 Gradient von q : $dq/dy = f(\text{Geometrie, Fehlertiefe, Belastung, Werkstoff})$
 Rissinitiationwert J_i : $J_i = f(\text{Werkstoff})$
 Risswiderstandskurve : J_R -Kurve = $f(\text{Geometrie, Fehlertiefe, Belastung, Werkstoff})$
 kritischer q -Wert : $q_c \approx 0,3$ (für Stahl)

Bild 9: Methodik zur bruchmechanischen Bewertung unter Berücksichtigung der Mehrschsigkeit des Spannungszustandes nach [5], [6]

Berechnete und experimentell ermittelte Initiierungslasten für austenitische Rohre ($D_a \times s = 219 \text{ mm} \times 14,2 \text{ mm}$)

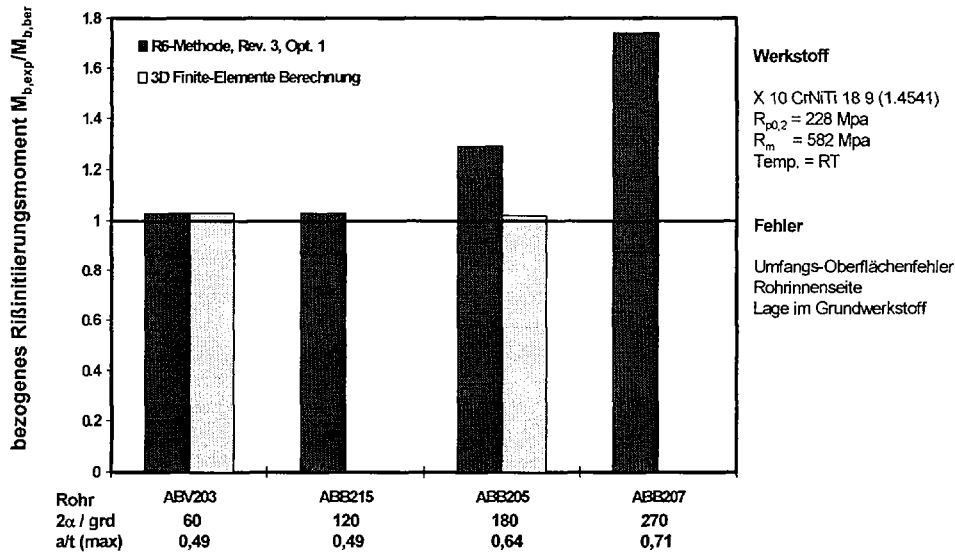


Bild 10: Vergleich berechneter und experimentell ermittelter Initiierungslasten für austenitische Rohre

4.3 Leckageberechnung

Zur Bestimmung der **Lecköffnung** (Rissöffnung) bzw. Leckflächen (Rissöffnungsfläche) stehen analytische und numerische Methoden zur Verfügung. Abhängig von der Problemstellung gestatten diese Verfahren sowohl die Berechnung der Leckfläche als auch zugehöriger Ausströmraten und ein Vergleich mit der durch die Leckageüberwachung detektierbaren Leckfläche A_{LUS} bzw. der detektierbaren Ausströmrates \dot{m}_{LUS} und auch die Ermittlung der auftretenden Strahlkräfte. Eine genaue rechnerische Ermittlung der Leck- bzw. Rissöffnungsfläche ist nur mittels elastisch-plastischer Finite Elemente Berechnungen möglich, [7].

Die **Ausströmrates** wird in Abhängigkeit von der Leckfläche über geeignete Ausströmmodelle unter Berücksichtigung des Druckes, der Temperatur und der Stoffwerte des Mediums ermittelt. Zur Berechnung dieser Ausströmrates kommen unterschiedliche Modelle für die Zweiphasenströmung zum Einsatz, wie z.B.

- das Homogene Gleichgewichtsmodell (HEM), bei dem thermodynamisches und fluid-dynamisches Gleichgewicht zwischen den Phasen postuliert wird,
- das Zweiphasenmodell von Henry und Fauske, das die unterschiedlichen Phasengeschwindigkeiten und thermodynamisches Ungleichgewicht zwischen den Phasen berücksichtigt,

- das Zweiphasenmodell von Moody, das von unterschiedlichen Phasengeschwindigkeiten, aber thermodynamischem Gleichgewicht ausgeht.

Während das HEM und das Modell von Henry und Fauske zur Ermittlung der detektierbaren Leckfläche herangezogen wird, wird das Modell von Moody bei der Ermittlung von Strahlkräften verwendet.

Experimentelle Untersuchungen zur Verifikation der Ausströmraten liegen nur in begrenztem Umfang vor. Die durchgeführten Vergleichsanalysen zeigen, dass aufgrund der komplexen Berechnungen erhebliche Abweichungen der errechneten Ausströmraten von den gemessenen Daten vorliegen. Somit ist auch weiterhin von Unsicherheiten bezüglich der errechneten Ausströmraten auszugehen.

5 Bewertung von postulierten Fehlern

Im Rahmen von Integritätsnachweisen sind bei der bruchmechanischen Analyse postulierte Fehler zu berücksichtigen. Die hierbei maßgebliche Eingabegröße aus der ZfP ist die minimal auffindbare Fehlergröße. Die Festlegung dieser Größe kann anhand der prüftechnischen Randbedingungen (s. o.) erfolgen oder aber auch als Ergebnis der bruchmechanischen Analyse in Form einer Anforderung an die Detektierbarkeit durch die ZfP formuliert werden. Diese beiden grundsätzlichen Vorgehensweisen sind in Bild 11 und Bild 12 schematisch dargestellt.

Die wesentlichen Ziele der bruchmechanischen Analyse sind die Ermittlung der kritischen Fehlergröße und die Quantifizierung des Sicherheitsabstandes zum Versagen an hochbeanspruchten Stellen für Betrieb und Störfälle. Welches Kriterium dabei zur Bestimmung der kritischen Fehlergröße herangezogen wird ist abhängig von den komponenten- und prüfspezifischen Randbedingungen. Mögliche Kriterien sind z. B. der Ausschluss der Rissinitiierung oder der instabilen Risserweiterung eines Oberflächenfehlers oder der Ausschluss des globalen Komponentenversagens durch plastischen Kollaps.

Bei der Ermittlung des Sicherheitsabstandes ist das Risswachstum in dem betrachteten Zeitintervall (Prüfintervall der WKP oder bis EOL) zu bestimmen. Hierzu muss der mögliche Schadensmechanismus (z. B. Ermüdung) bekannt sein. Darüber hinaus ist eine aussagefähige Prüftechnik erforderlich.

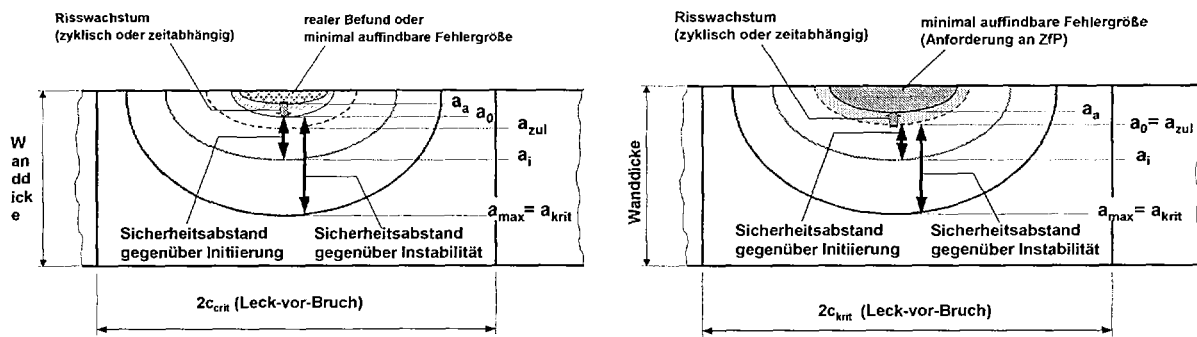


Bild 11: Ermittlung des Sicherheitsabstandes bei vorgegebener Rissgröße (minimal auffindbare Fehlergröße oder realer Befund)

Bild 12: Ermittlung der geforderten detektierbaren Rissgröße (minimal auffindbare Fehlergröße) bei vorgegebenem Sicherheitsabstand

Weitere wichtige Voraussetzungen sind die detaillierte Kenntnis über die tatsächlich auftretenden betrieblichen Belastungen sowie die Belastungen bei Störfällen. Die betrieblichen Belastungen ergeben sich für das betrachtete System oder Komponente aus der Betriebsüberwachung. Grundlage der Bewertung von Störfällen sind die der Auslegung zugrunde gelegten spezifizierten Belastungen.

Als Berechnungsverfahren kommen bei Rohrleitungskomponenten vor allem Grenzlastbetrachtungen wie das plastische Grenzlastverfahren (PGL) oder die Fließspannungsmethode (FSK) zur Anwendung, Bild 8, vorausgesetzt es existiert für die betrachtete Komponente eine abgesicherte versuchstechnische Grundlage. Bei Druckbehältern ist dagegen in der Regel eine differenziertere Betrachtung erforderlich, so dass hier bruchmechanische Näherungsverfahren wie die R6-Methode ggf. in Kombination mit Finite-Elemente Analysen oder detaillierte numerische Berechnungen erforderlich sind.

Die Ermittlung von Leckgrößen im Rahmen des Integritätsnachweises nicht erforderlich, da die Ursachen betrieblicher Schädigungsmechanismen beherrscht werden. Somit ergibt sich durch die Leckageüberwachung kein zusätzlicher Sicherheitsbeitrag.

6 Bewertung von betrieblichen Fehlern

Im Gegensatz zum Integritätsnachweis (postulierte Fehler) werden hier reale, bei der WKP aufgefunden Fehler betrachtet. Um für diese Fehler eine bruchmechanische Bewertung durchführen zu können, ist eine entsprechende Prüftechnik erforderlich, die eine quantitative und volumetrische Charakterisierung des Befundes ermöglicht. Diese Befunde werden dann

einhängend durch elliptische oder halbelliptische Fehler mit Lage senkrecht zur größten wirkenden Hauptspannung beschrieben, Bild 13, und ggf. mit einem zusätzlichen Sicherheitsfaktor belegt.

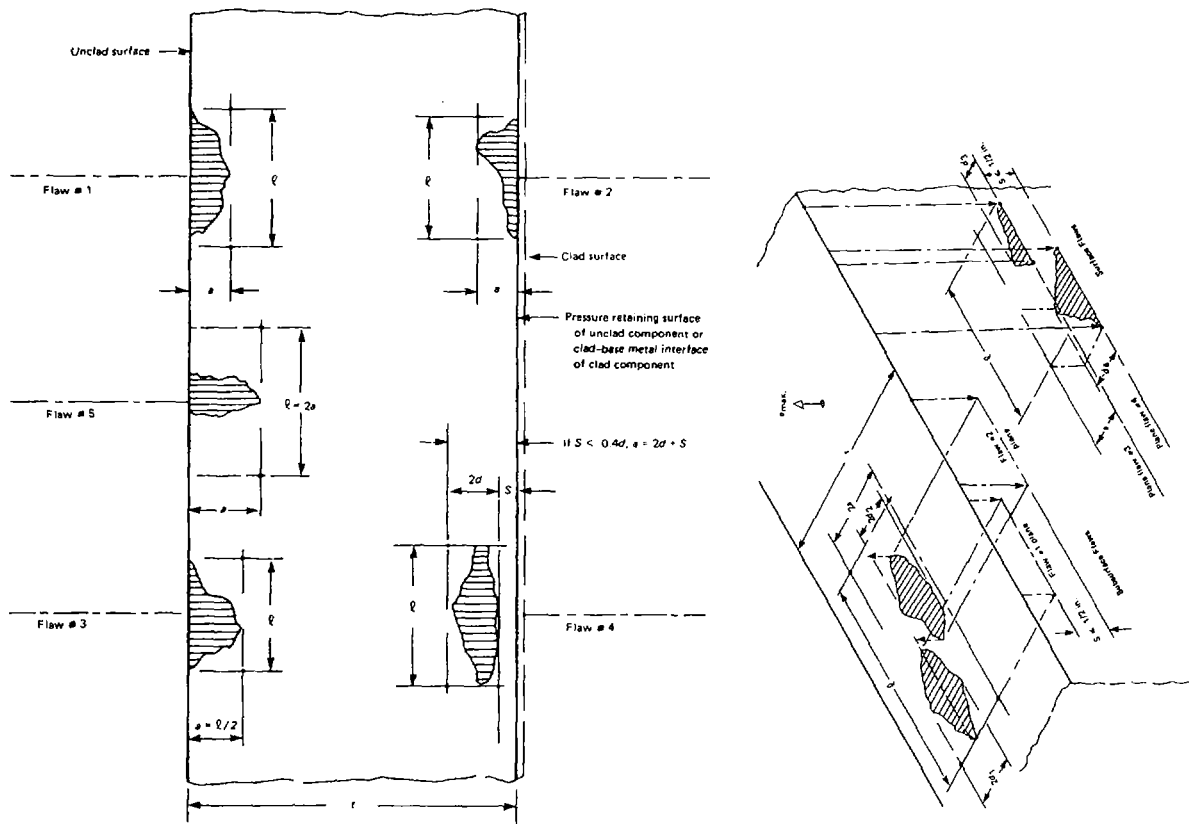


Bild 13: Fehlerlagen und deren bruchmechanische Behandlung nach ASME Code, Section XI

Da in diesen Fällen der wirksame Schädigungsmechanismus zunächst nicht bekannt ist, ist vor Durchführung der bruchmechanischen Analyse zu klären welcher Schadensmechanismus ursächlich für den aufgefundenen Fehler ist. Hierzu sind Informationen über den Fehlertyp, die wirksamen Belastungen und Mediumsbedingungen und den aktuellen Werkstoffzustand bereitzustellen. Mit in die Betrachtung einzubeziehen sind auch der Kenntnisstand über evtl. vorliegende ähnliche Befunde (WLN) sowie die bisherige Betriebsüberwachung (Belastungen, WKP, Instandhaltung).

Das Ziel der bruchmechanischen Analyse ist es zu klären in wie weit der Befund für den weiteren Betrieb als zulässig (kein Versagen der Komponente während des nächsten Inspektionsintervalls) eingestuft werden kann.

Die Vorgehensweise entspricht dabei im wesentlichen der bei postulierten Fehlern (Bild 11), wobei jedoch der detaillierten Analyse der Rissentwicklung bis hin zu einer möglichen Leckage eine größere Bedeutung zukommt. Die bruchmechanische Analyse beinhaltet die Er-

mittlung des Risswachstums (zyklisch und/oder korrosionsgestützt), der Initiierungsrissgröße und der kritischen Rissgröße (Rissgröße bei Beginn instabiler Rissausbreitung oder kritische Durchrisslänge), sowie die Berechnung möglicher Leckgrößen. Um hierbei eine ausreichende Aussagegenauigkeit zu erzielen ist in der Regel der Einsatz numerischer Berechnungsmethoden erforderlich.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse sind dann ggf. Änderungen bei der Überwachung des Risswachstums vorzunehmen (anders Prüfverfahren, angepasste Inspektionsintervalle) oder auch eine lokale Leckageüberwachung vorzusehen.

7 Schlussfolgerungen

Um abgesicherte bruchmechanische Bewertungen von zu postulierenden oder betrieblich aufgefundenen Fehlern durchzuführen zu können ist eine enge Interaktion zwischen Bruchmechanik und ZfP erforderlich. Die ZfP liefert dabei die erforderlichen Eingangsdaten für die bruchmechanische Analyse wie Fehlergröße und Fehlerorientierung. Die bruchmechanische Analyse kann aber auch dazu dienen Vorgaben für die ZfP hinsichtlich Prüfempfindlichkeit, Prüfintervall und Prüfort festzulegen.

Je nach sicherheitstechnischer Bedeutung der zu betrachtenden Komponenten und Systeme ist zwischen postulierten und betrieblichen Fehlern zu unterscheiden.

Sind Fehlerpostulate Gegenstand der bruchmechanischen Analyse so ist die durch die ZfP bereitzustellende maßgebliche Eingabegröße die minimal auffindbare Fehlergröße. Die Ermittlung der Leckgröße ist nicht zwingend erforderlich, da die Ursachen betrieblicher Schädigungsmechanismen beherrscht werden und sich durch die Leckageüberwachung somit kein zusätzlicher Sicherheitsbeitrag ergibt.

Bei betrieblichen Fehlern sind Prüftechniken erforderlich, die eine quantitative und volumetrische Charakterisierung des Befundes ermöglichen. Da in diesen Fällen der wirksame Schädigungsmechanismus zunächst nicht bekannt ist, ist vor Durchführung der bruchmechanischen Analyse zu klären welcher Schadensmechanismus ursächlich für den aufgefundenen Fehler ist. Die bruchmechanische Analyse beinhaltet hierbei eine abgestufte Analyse der Rissentwicklung bis hin zur Bestimmung von Leckgrößen. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse sind dann ggf. Änderungen bei der Überwachung des Risswachstums vorzunehmen (anders Prüfverfahren, angepasste Inspektionsintervalle) oder auch eine lokale Leckageüberwachung vorzusehen.

Literatur

- [1] Herter, K.-H.: „Darstellung der Nachweisverfahren zur Bewertung der Integrität von druckführenden Komponenten und Systemen“. MPA/VGB Forschungsvorhaben 3.3, Teilbericht 3.3-2, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, 07/2003
- [2] Herter, K.-H., W. Hienstorfer, H. Kockelmann, X. Schuler: Alterungsmanagement und Alterungsüberwachung mechanischer Komponenten in baden-württembergischen Kernkraftwerken. Arbeitspunkt 1: Erstellung eines Anforderungskatalogs zum Alterungsmanagement mechanischer Komponenten in Kernkraftwerken unter Berücksichtigung des nationalen und internationalen Standes von Wissenschaft und Technik. Ergebnisdokumentation, 09.02.2004.
- [3] Sicherheitstechnische Regeln des Kerntechnischen Ausschusses (KTA). KTA 3201.4, Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren, Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung, Fassung 6/99
- [4] Uhlmann, D., K.-H. Herter: „Erstellung eines Nachweisverfahrens für die Bewertung der Integrität von druckführenden Rohrleitungen“. MPA/VGB-Vorhaben 5.6, VGB Kennzeichen 05/98, Abschlußbericht 944 705 601, MPA Stuttgart, Dezember 1998
- [5] Schuler, X, D. Blind, U. Eisele, K.-H. Herter: Extension of fracture mechanics evaluation methods by consideration of multiaxiality of stress state for piping components. Nuclear Engineering and Design, 1995, pp. 227-240.
- [6] Eisele, U., D. Blind, K.-H. Herter, X. Schuler: Influence of the Multiaxiality of Stress State on the Ductile Fracture Behaviour of Degraded Piping Components. Proceedings of the 10th European Conference on Fracture (ECF10), 1994
- [7] Diem, H., u.a.: Forschungsvorhaben „Bauteilversuche Austenit mit Analytik“. MPA/VGB-Vorhaben 6.1, VGB Kennzeichen 11/93, Abschlußbericht, MPA Stuttgart, Oktober 1996
- [8] Stadtmüller, W. u.a.: Forschungsvorhaben „Beitrag zur bruchmechanischen Absicherung von Rohrleitungen aus hochzähem Werkstoff“. Förderkennzeichen 1500 964, BMBF, Abschlußbericht und Anhänge, MPA Stuttgart, Juni 1997
- [9] Bartonicek, J., D. Blind, K.-H. Herter, K. Kerkhof, H. Kockelmann, T. Schwarz, X. Schuler: „Fortgeschrittene Methodologie zum Nachweis der Integrität von LWR-Rohrleitungen und -Komponenten“. BMU-Vorhaben SR2064, Abschlußbericht, MPA Stuttgart, Mai 1996
- [10] Läßle, Volker: Untersuchungen zum korrosionsgestützten Risswachstum ferritischer Stähle in sauerstoffhaltigem Hochtemperaturwasser. Techn.-wiss. Ber. MPA Stuttgart, Heft 96/02, 1996.
- [11] Wachter, O., G. Brümmer, U. Ilg, M. Widera, F. Hüttner, K.-H. Katerbau, M. Schick: Korrosionsgestütztes Risswachstum in austenitischen Schweißverbindungen in sauerstoffhaltigem Hochtemperaturwasser. Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit von Leichtwasserreaktoren, Ergebnisse aus MPA/VGB Forschungsvorhaben, 13. und 14. Juni 2002 in Stuttgart.