

**ERMITTLUNG VON BRUCHMECHANIK-KENNWERTEN
BEI ELASTISCH-PLASTISCHEM WERKSTOFFVERHALTEN
(DETERMINATION OF FRACTURE MECHANICS DATA IN THE
ELASTIC PLASTIC RANGE OF MATERIALS)**

W. SEIDL

*Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, AEG-Telefunken (HE/JMW),
Bereich Forschung und Entwicklung, D-6000 Frankfurt a.M. - Niederrad, Germany*

SUMMARY

In this paper is discussed an experimental investigation aimed at analyzing the fracture of steel in the temperature range of transition from frangible to non-frangible behavior. Samples provided with artificially initiated cracks were used to study the dependence of fracture stress on the geometry of the cracks and of the samples investigated.

Experimental values were determined of the critical stress intensity factor, K_c , the critical crack opening stretch, COS , and the integral work done by plastic deformation at the crack tip, J . Furthermore the crack extension resistance, R , was determined in dependence of the effective crack length which includes the increase in size of the plastic zone. A comparison was performed of the values thus determined in order to find a criterion that is best suited for assessment of the possibility of the occurrence of fracture in the brittle-ductile transition region.

1. Einleitung

Es ist üblich geworden, bei der Konstruktion von Reaktordruckgefäßen auch Sicherheitskriterien gegen die Bruchgefahr nach bruchmechanischen Methoden aufzustellen. Es soll damit eine quantitative Abschätzung gegeben werden, ob bei Betriebsbeanspruchung Sprödbrüche auftreten können, wenn das Vorhandensein von Fehlern oder Rissen im Druckgefäß angenommen wird. Die für Reaktorbauteile ausgewählten Werkstoffe müssen aber ein gewisses Maß an Zähigkeit besitzen. Daher ist an möglichen Fehlern oder Rissen im Belastungsfall die Größe der plastischen Zone nicht mehr klein gegen die Abmessungen der Bauteile bzw. der Rißtiefe der angenommenen Risse, sodaß die Voraussetzungen für die Anwendung der linear elastischen Bruchmechanik nicht erfüllt sind. Man ist deswegen bemüht, die herkömmliche Bruchmechanik auf elastisch plastisches Werkstoffverhalten zu erweitern. Die folgende Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, welche Methoden und inwieweit diese in der Praxis zur Erstellung von Sicherheitskriterien anwendbar sind. Es bieten sich drei Methoden zur Einbeziehung der plastischen Verformung in das Bruchgeschehen an:

1. Das COD-Konzept, vorgeschlagen von Wells [1]
2. das J-Integral-Konzept, vorgeschlagen von Rice [2]
3. das Konzept der Resistance-Curves oder R-Curves von Irwin [3].

1.1 Das COD-Konzept beruht auf der Betrachtung der Rißaufweitung an der Rißspitze während der Belastung. Sie ist eine Frage der durch die plastische Verformung bewirkten Abrundung des Rißgrundes. Man geht davon aus, daß dann der Bruch einsetzt, wenn ein kritisches COD oder δ_{crit} erreicht wird, bei dem die instabile Rißausbreitung eingeleitet wird. Es muß sich also ein δ_{crit} ergeben, wenn das Material an der Rißspitze seinen Bruchdehnungswert erreicht hat.

1.2 Das J-Integral-Konzept beruht darauf, daß die Verhältnisse bei Verformung infolge Belastung nicht nur an der Rißspitze betrachtet werden, sondern innerhalb eines beliebig großen, die Rißspitze umgebenden zweidimensionalen Gebietes. Dieses kann in der Praxis von den Begrenzungen einer Probe umschlossen werden. Der Verformungsprozeß innerhalb dieses Gebietes wird durch Terme der potentiellen Energie E_{pot} bezogen auf die Probenbreite beschrieben. Man ermittelt also durch Belastung von Proben mit unterschiedlichen Anrißlängen die potentiellen Energiebeträge, die den Flächen unter den Last-Aufweitungsdigrammen entsprechen. Nun ist aber J definiert als $J = -\frac{dE_{pot}}{da}$ also als die Änderung der potentiellen Energie in Bezug auf die Änderung der Anrißlänge. Physikalisch interpretiert muß daher J als Vergleich potentieller Energiebeträge zweier in gleicher Weise belasteter und identischer Körper mit infinitesimal unterschiedlichen Ausgangsrißlängen angesehen werden. Das J-Integral-Konzept

geht von der Überlegung aus, daß vor Einsetzen einer instabilen Rißausbreitung ein kritischer J-Wert erreicht wird.

1.3 Das Konzept der R-Kurven geht von der linear elastischen Bruchmechanik aus und basiert auf Energiebetrachtungen. Die plastische Verformung an der Rißspitze wird hier berücksichtigt durch die Einführung einer effektiven Rißlänge, die sich aus zwei Teilen zusammensetzt, der Ausgangsrißlänge a und der Größe der plastischen Zone r_y , sodaß $a_{\text{eff}} = a + r_y$ gilt. Nun ist G die Rißerweiterungskraft oder jener Energiebetrag, der gewonnen wird, wenn bei gleicher Belastung oder Nennspannung ein Riß um einen infinitesimalen Betrag erweitert wird. R ist die Widerstandskraft oder jener Energiebetrag, den der Werkstoff einer Rißerweiterung entgegensetzt. Beide sind Funktionen der effektiven Rißlänge, die bei Belastung in gleichem Maß wie das Anwachsen der Größe der plastischen Zone verlängert wird. Bleibt G bei einer vorgegebenen Belastung für die Rißvergrößerung immer größer als R , tritt bei dieser Belastung verformungsarmer Trennbruch auf. Schneidet die R -Kurve die vorgegebene G -Kurve, so bleibt der Riß nach einer subkritischen Vergrößerung stehen. Es tritt kein Sprödbruch auf. Die beiden Fälle werden durch eine kritische Ausgangsrißlänge a abgegrenzt, von der aus aufgetragen die R -Kurve die G -Kurve gerade berührt aber nicht mehr schneidet. Um mit dieser Methode ein universal anwendbares Kriterium entwickeln zu können, müßte die Unabhängigkeit der R -Kurve von Probengeometrie und Rißgeometrie geprüft werden.

2. Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden anhand von Compact-Tension-Proben [4] mit unterschiedlichen Breiten $B = 30$ mm und 40 mm aus dem Stahl 22 NiMoCr 3 7 bei Raumtemperatur durchgeführt. Die von diesem Probenmaterial gemessenen mechanischen Eigenschaften sind in Tabelle 1 angeführt. Es wurden Last-Aufweitungsdiagramme aufgenommen (s. Abb. 3). Hierbei wurde mit Wegregelung bei konstanter Dehngeschwindigkeit belastet. Die Aufweitung δ_c wurde an den Schneiden an der Stirnseite der CT-Proben gemessen (Abb. 1).

3. Ergebnisse

3.1 COD-Messung: Aus den Meßwerten für die Aufweitung δ_c wurde die Aufweitung δ an der Rißspitze ermittelt. Die dazu erforderliche Umrechnungsformel lautet:
$$\delta = \frac{\delta_c}{1+n \left(\frac{a+z}{W-a} \right)} \quad [5] \quad [6]$$

a ist die Rißlänge, gemessen von der Belastungslinie aus, z der Abstand der Schneiden von der Belastungslinie, W die Probenlänge und n eine annähernd konstante Zahl, die ein Rotationszentrum charakterisiert, wenn man annimmt, daß die Rißflächen um dieses rotieren.

n hat den Wert $n = 2,5$ [5] [6]. Trägt man als Nennspannung den Ausdruck $\sigma = \frac{P}{B \cdot W}$ ohne Berücksichtigung der Rißlängen in Abhängigkeit zur Aufweitung δ an der Rißspitze auf, so erhält man eine Kurvenschar mit der Rißlänge a als Parameter (Abb.2). Es läßt sich nun erkennen, daß den jeweiligen maximalen Nennspannungen keine definierte einheitliche kritische Rißöffnung zuzuordnen ist. Die kritische Rißöffnung scheint umso größer zu sein, je kleiner der Anriß ist.

3.2 J-Integral: Es wurde die Aufweitung δ_p an der Belastungslinie aus der Aufweitung δ_c durch die Näherungsformel $\delta_p = \delta_c \frac{a}{a+z}$ berechnet. Für die Ermittlung der potentiellen Energiebeträge gilt die Beziehung $E_{pot} = \int P \cdot d\delta_p$. Diesen entsprechen die Flächeninhalte unter den Last-Aufweitungsdiagrammen (Abb.3). Aus mehreren Last-Aufweitungsdiagrammen wurden für vorgegebene Aufweitungen die Energiebeträge ermittelt und in Abhängigkeit zu den Ausgangsrißlängen in einem Diagramm (Abb. 4) dargestellt. Die Energiebeträge werden auf die Einheit der Probenbreite bezogen. Die erhaltenen Werte ergeben eine Geradenschar mit der Aufweitung δ_p als Parameter, wobei kein Einfluß der Probenbreite zu erkennen ist. Laut Literaturangabe [7] hätte man allerdings Kurven erwartet. J ist definiert als $J = -\frac{dE_{pot}}{da}$ und entspricht somit den Steigungen der Geraden. Es ergibt sich aufgrund der eigenen Messungen, daß J nur abhängig ist von der jeweiligen Aufweitung aber nicht von der Ausgangsrißlänge (Abb.5). Einer aus einem Last-Aufweitungsdiagramm bestimmten kritischen Aufweitung δ_p entspricht somit ein kritisches J_{crit} .

3.3 R-Methode: Aus einem Last-Aufweitungsdiagramm werden punktweise aus den an den Schneiden gemessenen Rißöffnungen δ_c die effektiven Rißlängen a_{eff} berechnet [8]. Man vergleicht aber die gemessene Rißöffnung δ_c mit einer Probe entsprechend vergrößerter Rißlänge, die bei gleicher Belastung unter rein elastischen Verhältnissen die gleiche Rißöffnung ergibt. (Abb.6).

Den jeweiligen Spannungsintensitätsfaktor erhält man aus der Beziehung $K = \frac{P \cdot Y}{B \cdot W}$ wobei Y eine Korrekturfunktion in Abhängigkeit von $\frac{a}{W}$ für CT-Proben ist. [8] Nun läßt sich die R-Kurve für eine Probe mit einem bestimmten Anriß aus den so erhaltenen K-Werten mittels der Formel $R = \frac{K^2}{E} (1-\nu^2)$ punktweise für die jeweilige effektive Rißlänge ermitteln. In Abb.7 sind einige R-Kurven von Proben mit unterschiedlichen Ausgangsrißlängen abgebildet. Sie weisen fast alle die gleiche Charakteristik auf und verlaufen fast parallel. Die Versuche deuten darauf hin, daß der Verlauf der R-Kurve von der Anrißlänge unabhängig ist. Mit zunehmender effektiver Rißlänge ist zuerst ihre Steigung konstant oder nimmt etwas ab, dann nimmt sie wieder etwas zu, sodaß die Kurven nach oben abbiegen. Dieses Abbiegen ist aufgrund der

Literaturangaben unerwartet. Das kann damit zusammenhängen, daß der Verlauf der R-Kurve nach oben abbiegt, wenn der gesamte Restquerschnitt von der plastischen Zone erfaßt wird. Zur Ermittlung eines Sicherheitskriteriums wird eine G-Kurvenschar auf rechnerischem Wege ermittelt. G läßt sich aus der Beziehung $G = \frac{\sigma^2 W}{E} Y^2$ ermitteln, wobei hier die Nennspannung $\sigma = \frac{P}{B \cdot W}$ eingeführt wird und Parameter der G-Kurvenschar ist. Sie ist gleichfalls in das Diagramm Abb.7 eingetragen. Kritische Werte erhält man durch Tangieren einer R-Kurve mit Ausgangsrißlänge a mit einer G-Kurve mit entsprechender Nennspannung σ_c . Für alle $\sigma > \sigma_c$ sind die Voraussetzungen für eine instabile Rißausbreitung bei dieser Probenform gegeben. Aus diesem Diagramm läßt sich daher für jedes Verhältnis $\frac{a}{W}$ die kritische Nennspannung ermitteln oder umgekehrt für jede Spannung ein kritischer Wert $\frac{a}{W}$. Wenn man nun die Spannungen in Abhängigkeit zur zugehörigen kritischen Rißlänge aufträgt, erhält man eine Kurve, wie sie in Abb.8 dargestellt ist. Man könnte das Gebiet unterhalb der Kurve als "sicheres Gebiet" definieren, denn auf Punkten unterhalb der Kurve wird weder eine kritische Nennspannung, noch eine kritische Rißlänge erreicht, für die die Voraussetzungen für ein instabiles Rißwachstum gegeben sind. In Abb.8 sind auch diejenigen Bruchnennspannungen in Abhängigkeit von der Rißlänge eingetragen, die man experimentell aus den Belastungsversuchen der CT-Proben ermittelt hat. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den nach der R-Methode ermittelten kritischen Spannungen.

4. Zusammenfassung

Bei den drei zur Diskussion gestellten Untersuchungsmethoden konnte kein wesentlicher Einfluß der Probenbreite auf die Ergebnisse festgestellt werden.

Bei der Untersuchung nach dem COD-Konzept konnte keine einheitliche kritische Rißöffnung an der Rißspitze ermittelt werden, bei der die instabile Bruchausbreitung erfolgt.

Die Bestimmung des J-Integrals führte nicht zur Ermittlung eines kritischen J-Wertes für die Brucheinleitung.

Die Auswertung nach dem R-Konzept führt zu einer Beziehung zwischen kritischen Nennspannungen und kritischen Ausgangsrißlängen. Man kann bei den verwendeten Proben die Verhältnisse definieren an denen eine instabile Bruchausbreitung ausgeschlossen werden kann. Es müssen diese Untersuchungen auf andere Probengeometrien erweitert werden.

Literaturangaben

- [1] Wells, A.A., In College of Aeronautics Prwc. of the Crack Propagation Symposium, Granfield(1961)
- [2] Rice, J.R., "A Path Independent Integral and the Approlimate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks" Trans ASME, J.Appl.Mech. (1968)
- [3] Irwin, G.R., "The R-curve Approach to Fracture Characterization" in Fracture Mechanics Seminar (1970)
- [4] ASTM E 399 - 30 T, ASTM Jahrbuch (1970)
- [5] Ingham, Egan, Elliott, Harrison, "The Effect of Geometry on the Interpretation of COD Test Data." Instn.Mech.Engrs. (1971)
- [6] Frederick, G., "Interpretation dans le domaine plastique de l'essai de mecanique de rupture", CRM RA 857/71
- [7] Loss, F.J., "Introduction to the J-Integral," NRL Mem.Rep.2411, (1972)
- [8] Fuchs, A., DVM, Bd. 13 Nr. 6, S. 181 - 212, Juni (1971)

T a b e l l e 1

Mechanische Eigenschaften des Stahles 22 NiMoCr 3 7
in vergütetem Zustand

σ_y	σ_F	δ	ψ	a_{K2}	E	Härte
kp/mm ²	kp/mm ²	%	%	mkp/cm ²	kp/mm ²	HV
53	69	24	56	8,5	19800	206

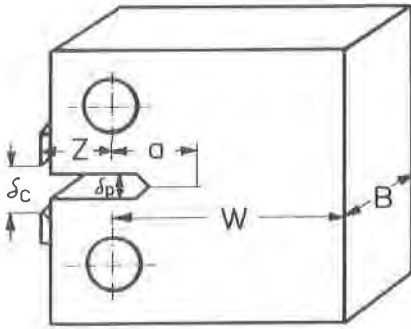


Abb. 1 CT-Probe

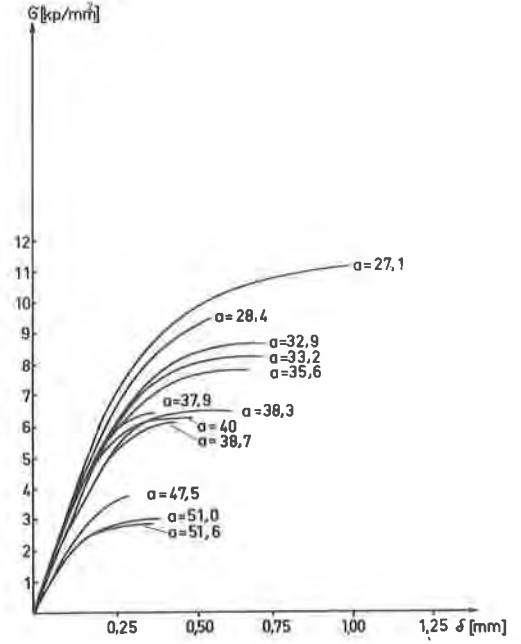


Abb. 2 Nennspannung σ in Abhängigkeit zur RiBöffnung δ am RiBgrund;
 a - AusgangsriBlänge

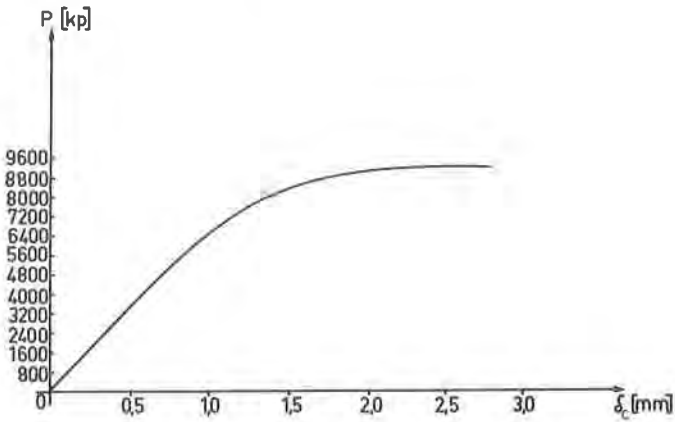


Abb. 3 Kraft-Aufweitungsdiagramm einer CT-Probe

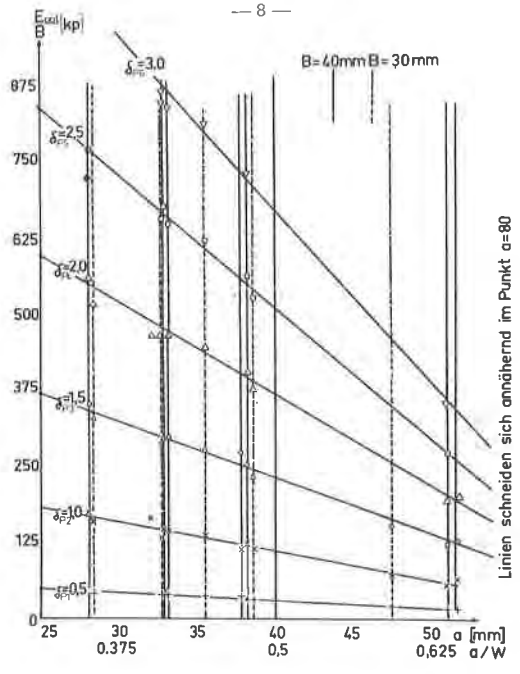


Abb. 4 Abhängigkeit der potentiellen Energie von der Rißlänge mit der Aufweitung δ_p als Parameter

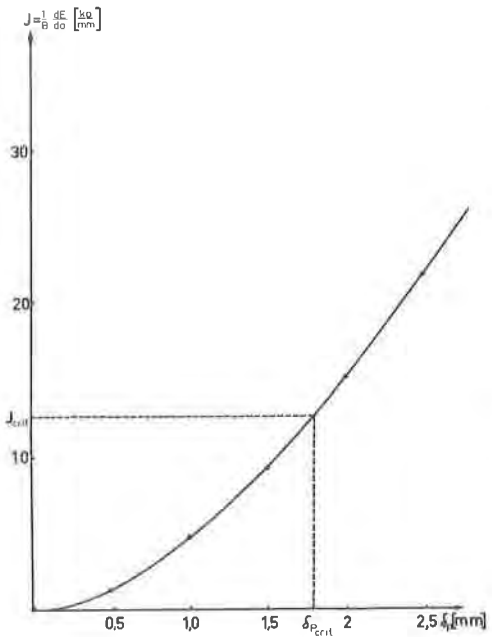


Abb. 5 Abhängigkeit von J von der Aufweitung δ_p

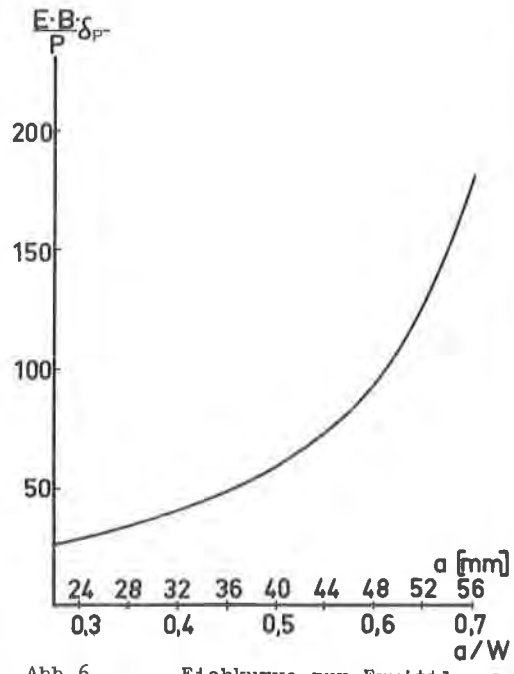


Abb. 6 Eichkurve zur Ermittlung der effektiven Rißlänge

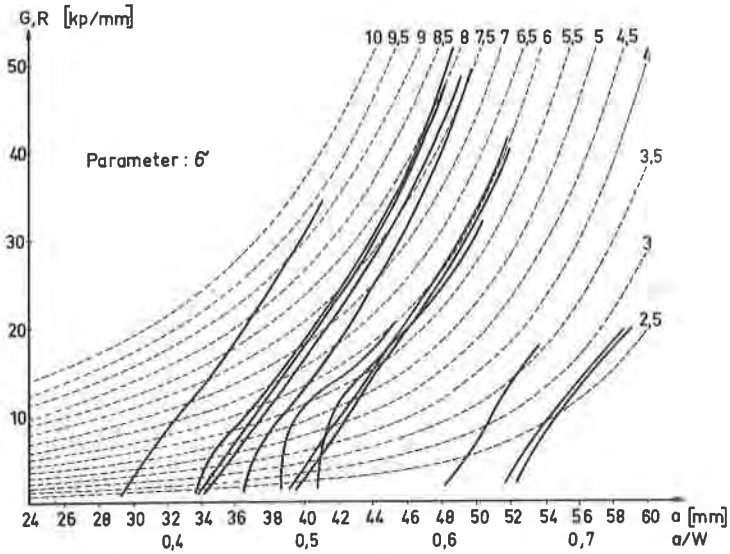


Abb. 7

Verlauf der G-Kurven (unterbrochene Linien) und Verlauf der R-Kurven (durchgezogene Linien)

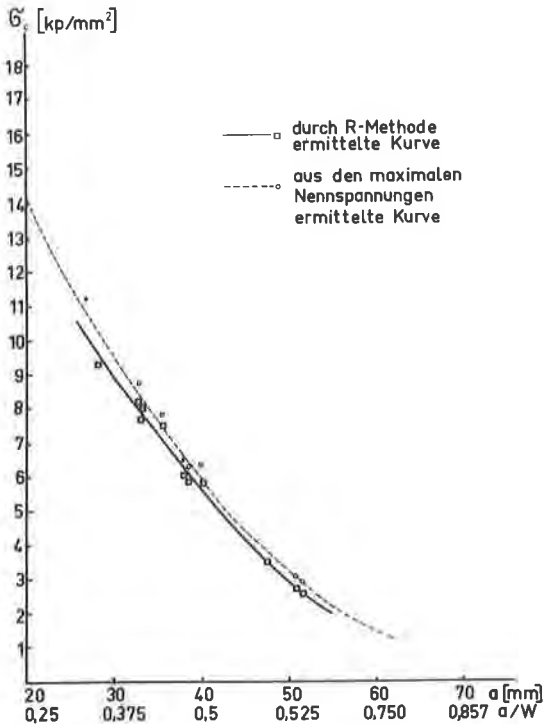


Abb. 8

Kritische Nennspannung σ_c in Abhängigkeit zur Anrißlänge

