

Prof. Dr. Th. H. Erismann, Direktionspräsident der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt für Industrie, Bauwesen und Gewerbe (EMPA), Dübendorf, Dipl.-Masch.-Ing. M. Prodan, Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung (EIR), Würenlingen, Schweiz.

Ein neuartiger Probekörper für bruchmechanische Untersuchungen

Von Theodor H. Erismann und Miklos Prodan

A new specimen for fracture mechanics

A very compact shape for specimens in fracture mechanics is presented with the necessary information about the evaluation for obtaining K_{Ic} . The shape is derived from that of the compact tension (CT) specimen according to ASTM specifications. It is characterized by the following advantages: Small dimensions and easy-to-manufacture outline; possibility of arbitrary orientation of the crack plane; possibility of use with comparatively cheap testing machines (presses). The constants for the evaluation are deduced from a calculation with finite elements as well as by photoelastic investigations and tests to rupture.

Une nouvelle éprouvette pour la mécanique de fracture

L'article décrit une forme très compacte pour corps d'épreuve en mécanique de fracture y compris l'évaluation pour la mesure de K_{Ic} . Cette forme est déduite de celle du type CT d'après ASTM. Elle est caractérisée par les avantages suivants: Petites dimensions et fabrication simple; possibilité d'une orientation arbitraire du plan de rupture; possibilité d'être employée dans des presses, soit des machines d'essai relativement peu coûteuses. Les constantes pour l'évaluation furent déterminées avec l'aide de la méthode des éléments finis ainsi que par des investigations photo-élastiques et des essais de rupture.

Es werden eine sehr kompakte Probenform für bruchmechanische Untersuchungen sowie Auswerteverfahren und Versuchsbedingungen für die K_{Ic} -Messung angegeben. Die Probe wurde von der Kompaktzugprobe (CT-Probe) nach ASTM abgeleitet und zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus: geringer Werkstoff- und Herstellungsaufwand; Möglichkeit einer beliebigen Orientierung der Rißebene; Möglichkeit der Prüfung in relativ preiswerten Druckprüfmaschinen (Pressen). Die Eichkonstanten werden mit Hilfe einer Finit-Element-Berechnung sowie photoelastischer und zerstörender bruchmechanischer Untersuchungen bestimmt.

DK 620.113.2:539.422.01

Manuskript-Eing. 13. Oktober 1975

1. Problemstellung

Seit die Bruchmechanik in zunehmendem Maß Materialien erfaßt, die wegen ihrer Zähigkeit nur bei großen Abmessungen der Probekörper zum spröden Bruch zu bringen sind, besteht naturgemäß ein Interesse an Verfahren zur Verringerung dieser Abmessungen, denn die Herstellung und Belastung sehr großer Probekörper ist mit zahlreichen Nachteilen verknüpft: Schon die formgebende Bearbeitung ist außerordentlich kostspielig (es gibt Fälle, in denen die erforderlichen Operationen allein viele Tausende DM betragen können). Besonders problematisch ist diese Aufgabe bei Schadensfällen, wo die Probekörper aus bestehenden Bauteilen oder Trümmern unter Vermeidung von autogenem Trennen (wegen der Gefahr von Strukturveränderungen) herausgearbeitet werden müssen. Große Probekörper können nur in großen Prüfmaschinen belastet werden. Für die Erzeugung des als Kerbe dienenden Ermüdungsanrisses (also für das sog. Anschwingen) werden zwar keine allzu großen Kräfte benötigt. Die abschließende zügige Belastung bis zum Bruch liegt aber in der Regel auf einem um fast eine Zehnerpotenz höheren Niveau. Einen Ausweg stellt die Verwendung von Biegepro-

ben dar. Diese fallen jedoch so groß aus, daß sie überhaupt nicht (oder doch nur bei bestimmter Orientierung der Achsen) hergestellt werden können.

Als erster Schritt ist die Kompaktprobe (CT-Probe) nach ASTM (1969) [1] zu betrachten, die eine Kompromißlösung zwischen der klobigen Biegeprobe und der auf ungewöhnlich starke Prüfmaschinen angewiesenen Zugprobe darstellt. Dieser Probenform war auch Erfolg beschieden: Sie steht z. Z. hinsichtlich der Häufigkeit der Anwendung auf bruchmechanischem Gebiet wohl an erster Stelle (s. a. [2; 3]).

Die Forderung nach genügend großen Proben ergibt sich aus der Notwendigkeit, in der Umgebung der Rißfront eine genügend wirksame Deformationsbehinderung zu erzwingen, die ihrerseits eine Voraussetzung für den (vorzugsweise bei Zugspannungen in allen drei Richtungen auftretenden) Sprödbbruch ist. So war es naheliegend, an der Probe diejenigen Teile wegzulassen, die den geringsten Spannungen ausgesetzt sind und folglich zur Deformationsbehinderung nahezu keinen Beitrag leisten können. Offenbar handelt es sich bei der Kompaktprobe in erster Linie um die Ecken des quaderförmigen Körpers, die überdies am weitesten vom kritischen Bereich entfernt und damit im Hinblick auf die Deformationsbehinde-

rung zusätzlich „entkoppelt“ sind. Die kreisrunde Probe nach Feddern und Macherauch (1973) [4; 5] ist gewissermaßen durch Wegschneiden dieser Ecken entstanden. Sie kann mit weniger Aufwand als die Kompaktprobe aus einem Bauteil ausgeschnitten werden und unterliegt keinen Einschränkungen hinsichtlich der Orientierung der Belastungsrichtung. Damit sind zwei signifikante Vorteile erreicht. Immerhin bleibt der Gewinn gegenüber der Kompaktprobe in verhältnismäßig engen Grenzen: Der Durchmesser ist etwa gleich groß wie deren Kantenlänge, und das Kaliber der benötigten Zugprüfmaschine ist unverändert.

Seit einiger Zeit besteht zwar die Hoffnung auf eine radikale Reduktion der Probengröße durch Verbesserung des „Pop-in“-Verfahrens [6], bei dem nicht das Instabilwerden der Rißfront sondern das lokale Auftreten einer ersten (durch plastische Verformung und entsprechende Neuverteilung der Spannungen aufgefangenen) Materialtrennung im kritischen Bereich als Versagenskriterium dient [7]. Die Schwierigkeit besteht dabei in der einwandfreien Unterscheidung zwischen dem gültigen „Pop-in“ – einer leichten Unebenheit des Kraft-Verformungs-Diagramms – von anderen Phänomenen, die einen ähnlichen Effekt hervorrufen

können. Es wird ohne Zweifel eine erhebliche Zeit erforderlich sein, bis ein definitives Urteil über diese hochinteressante Entwicklung gefällt werden kann. Aber selbst im Fall eines positiven Resultates wird es, vor allem bei wenig bekannten Materialien, häufig unerlässlich sein, durch eine eigentliche Kreuzprobe unbezweifelbare Gewißheit über die Bruchzähigkeit zu erhalten.

2. Grundidee einer zweckmäßigen Formgebung

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebene Probenform könnte als weiterer Schritt auf dem von *Feddern* und *Macherauch* beschrittenen Weg angesehen werden. Allerdings wurde sie ohne Kenntnis der entsprechenden Publikation konzipiert.

Die Formgebung ergab sich aus einer Analyse der Spannungsverteilung in der Kompaktprobe. Dabei fiel – neben den bereits erwähnten spannungsarmen Gebieten in den Eckpartien – auf, daß im Bereich der Bohrungen für die kraftübertragenden Scherbolzen zwar markante Spannungskonzentrationen bestehen, diese aber wegen ihrer relativ großen Entfernung von der Rißfront keinen wesentlichen Einfluß auf deren unmittelbare Umgebung haben. Es darf daraus gefolgert werden, daß die Art der Krafteinleitung in den Probekörper nicht als ausschlaggebender Faktor betrachtet werden muß, wenn nur die makroskopische Spannungsverteilung in der Gegend der Rißfront nicht übermäßig verzerrt wird und wenn um diesen kritischen Bereich eine genügende Massierung von Material vorliegt, die die entscheidende Deformationsbehinderung erzwingt.

Damit waren die fundamentalen Gesichtspunkte einer zweckmäßigen Formgebung gegeben: Lage der Rißfront ungefähr in der Achse eines zylindrischen Körpers und Minimalisierung der Kraftwege. So ergab sich fast zwangsläufig eine Geometrie gemäß *Fig. 1*. Hier muß folgendes bemerkt werden:

- Der Körper ist bei gleichem Querschnitt in der Rißebeane wesentlich kleiner als die Kompaktprobe.
- Im dargestellten Fall trägt die Probe eine sog. Chevron-Kerbe. Dies ist nicht zwingend, und es können auch die anderen üblichen Kerbformen Anwendung finden.
- Die Kraft wird an drei linienförmigen Kontaktstellen eingeleitet. Eine davon ist zentral angeordnet wie bei einem Biegeversuch. Die beiden anderen sind unter 45° geneigt, so daß die dort übertragenen Kräfte ohne Berücksichtigung der lokalen Kerbwirkung eine kombinierte Biegezugbelastung in der Riß-

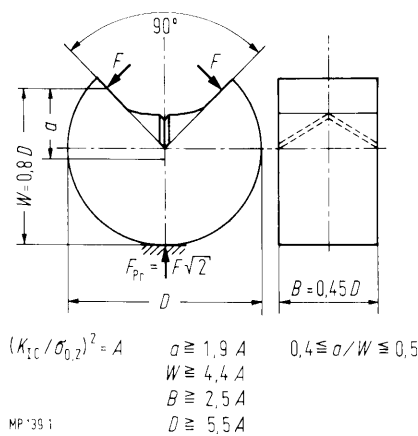


Fig. 1: Die neue Probenform mit Mindestabmessungen

The minimal dimensions of the new specimen

Les dimensions minimum de la nouvelle éprouve

ebene bewirken. In diesem Sinn liegt die beschriebene Lösung zwischen der Kompakt- und der Biegeprobe. Allerdings sind die Kraftwege gegenüber beiden stark verkürzt.

Es ist offensichtlich, daß die soeben genannten Kräfte nur mittels geeigneter Umlenkungen in einer normalen Prüfmaschine erzeugt werden können. Dafür läßt ihre räumliche Lage a priori eine gute Eignung für den Einsatz von Druckprüfmaschinen erkennen, die für große Abmessungen wesentlich preiswerter (und dementsprechend auch

weiter verbreitet) sind als vergleichbare Zugprüfmaschinen.

Am Rande sei vermerkt, daß die so festgelegte Gestalt an einen angeschnittenen Laib Käse erinnert, was zur Bezeichnung „Käseprobe“ führte.

3. Prüfvorrichtungen

Es wurde schon angedeutet, daß die von Hause aus zentrische Kraft einer Druckprüfmaschine zur Einleitung in die „Käseprobe“ einer Aufteilung und Umlenkung bedarf. Die entsprechende Vorrichtung für relativ kleine Ausführungen erwies sich als äußerst unproblematisch: Sie besteht in der Hauptsache aus einem an einer der Druckplatten befestigten Keil, von dem die Kräfte mittels zweier Walzen symmetrisch auf die Schenkel der Probe übertragen werden (*Fig. 2*).

Für große Kräfte ist diese Lösung nicht geeignet, weil sie zu sehr hohen Hertzschen Pressungen an den theoretisch linienförmigen Kontaktstellen führt. Es ist daher erforderlich, den wirksamen Durchmesser der Walzen wesentlich zu erhöhen. Dies ist im knappen Raum zwischen den Schenkeln der Probe und einem zentralen Keil nicht möglich. So war es unerlässlich, die Walzen gewissermaßen durcheinander hindurchzuführen und zugleich die unnötigen (das bedeutet: die von namhaften Spannungen freien) Partien wegzulassen. Das Resultat ergab sich wiederum fast zwangsläufig in der Form eines scherenähnlichen Gebildes, dessen Einzelheiten aus *Fig. 3* zu erkennen sind. Diese Vorrichtung, versehen mit den unerlässlichen Hilfsgeräten (beispielsweise zur Festlegung der vorgeschriebenen Geometrie oder zur Befestigung an der Prüfmaschine), erwies sich nach kurzer Entwicklungszeit als geeignet für die Lösung der gestellten Aufgabe.

Die EMPA (Abteilung 174, Konstruktion) kann Interessenten bei der Anschaffung der genannten Vorrichtungen behilflich sein.

4. Grundsätzliches zur Eichung der Probenform

Um bruchmechanische Werkstoffkennwerte, im vorliegenden Fall die Bruchzähigkeit K_{1c} , mit der neuen Probenform bestimmen zu können, mußte diese geeicht werden. Die Eichung bedeutete die Aufstellung eines Zusammenhanges

$$K_I = K_{II}[F, a, B, W, f(a/W)], \quad (1)$$

wobei K_I der Spannungsintensitätsfaktor und $f(a/W)$ die Korrekturfunktion ist, welche die endlichen Probenabmessungen gegenüber dem in allen Richtungen sehr

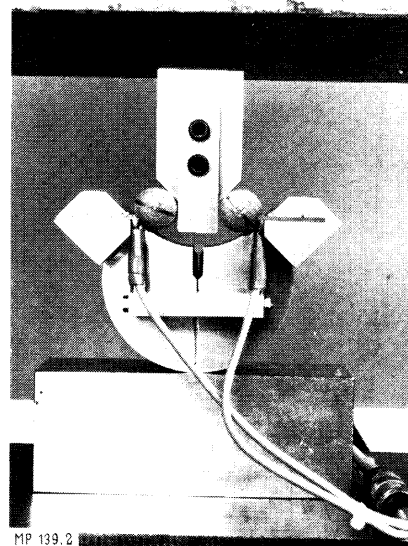


Fig. 2: Bruchmechanischer Versuch mit einer Probe relativ kleiner Ausführung

Test with a specimen of relatively small size

Essai avec une éprouve de petites dimensions

Die Belastungsvorrichtung besteht aus einem Keil und zwei Walzen

The loading device consists of a wedge and two cylindrical rollers

Le dispositif de mise en charge consiste d'un coin avec deux galets cylindriques

D = 88 mm Ø, 120 kN

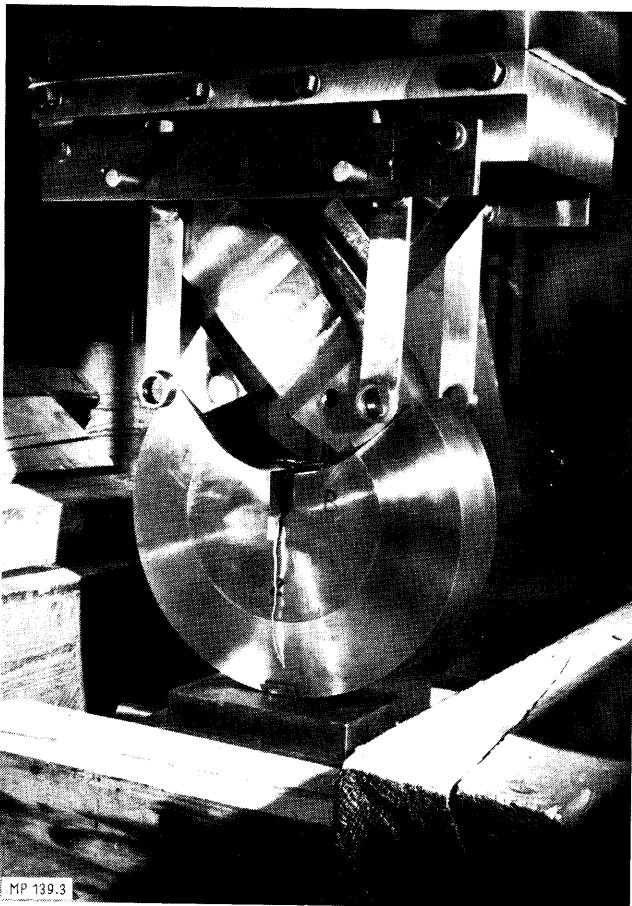


Fig. 3: Bruchmechanischer Versuch mit einer großen Probe
Test with a specimen of large dimensions
Essai avec une éprouve de grandes dimensions

Man beachte die „Schere“ für die Krafteinleitung
The forces are transmitted to the specimen by a device shaped like scissors
Les forces sont transmises sur l'éprouve par un dispositif en forme de ciseaux
D=400 mm σ_c , $F_{pr} \approx 4,5$ MN

ausgedehnten kontinuumsmechanischen Modell berücksichtigt (übrige Bezeichnungen nach Fig. 1).

Zur Eichung des Probekörpers wurden eine Berechnung nach der Methode der finiten Elemente sowie photoelastische und experimentelle bruchmechanische Untersuchungen benutzt.

5. Finit-Element-Berechnung und photoelastische Untersuchung

Es war naturgemäß nicht der Zweck der rechnerischen und experimentellen Voruntersuchungen, exakte Angaben über die zu erwartenden Eichwerte zu erhalten. Dazu waren die beiden Verfahren innewohnenden systematischen Fehlerquellen zu groß. Beabsichtigt war vielmehr einerseits die Feststellung der prinzipiellen Eignung der „Käseprobe“ für bruchmechanische Versuche, andererseits die Ermittlung quantitativer Grundlagen für die entscheidenden zerstörenden Untersuchungen.

Die Computer-Berechnung nach der Energiebetrachtung von Griffith [8] und Irwin [9] ergab folgende Konstellation für Gl. (1):

$$K_I = \frac{2F}{BW} \sqrt{a} f(a/W). \quad (2)$$

Für die Korrekturfunktion $f(a/W)$ wurde rechnerisch bei ebenem Spannungszustand und linear-elastischen Voraussetzungen das Intervall $0,4 \leq a/W \leq 0,525$ berücksichtigt (Fig. 4). Photoelastisch wurde hingegen nur der Fall $a/W=0,375$ untersucht: mechanisch gefräste, schmale, geradlinige Kerbe bis zum Probenzentrum ohne Ermüdungsanriß (Fig. 5). Sowohl mit der Berechnung wie mit der photoelastischen Untersuchung wurden die Spannungsverteilungen ermittelt, welche untereinander und mit denjenigen der Kompakzugprobe verglichen werden konnten [10].

Der Wert der Korrekturfunktion $f(a/W)$ war nach photoelastischer Ermitt-

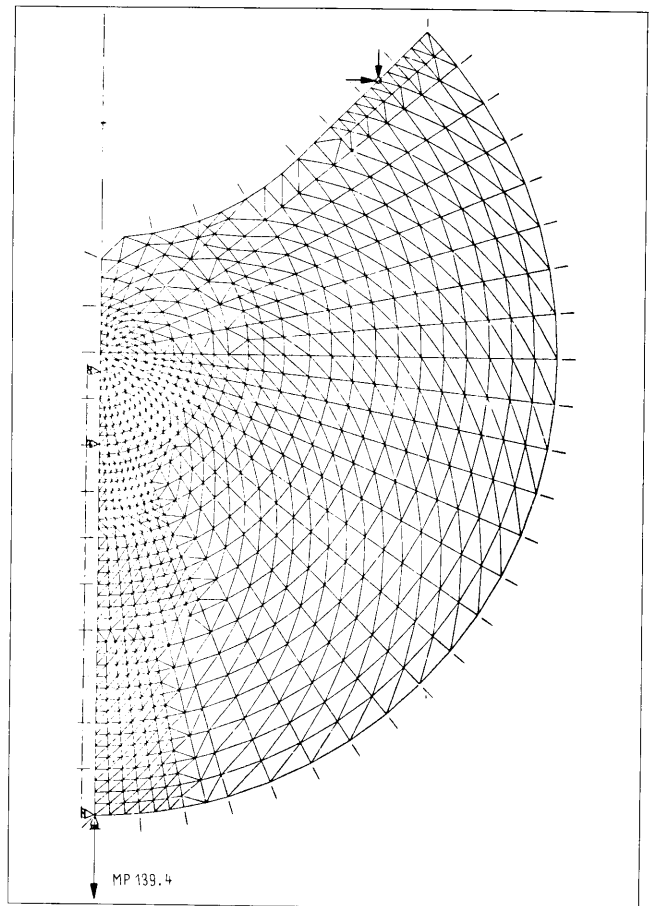


Fig. 4: Finit-Element-Einteilung einer Probenhälfte
Distribution of the finite elements on one half of the specimen
Répartition des éléments finis sur une moitié de l'éprouve

Die Berechnung wurde für 6 verschiedene Rißlängen durchgeführt ($0,4 \leq a/W \leq 0,525$). Die Grenzen des Intervalls sind angedeutet
The calculation was carried out for 6 lengths of the crack ($0,4 \leq a/W \leq 0,525$). The limits of the respective interval are shown in the sketch

Le calcul fut effectué pour 6 longueurs de la fracture ($0,4 \leq a/W \leq 0,525$). Les limites de l'intervalle sont indiquées

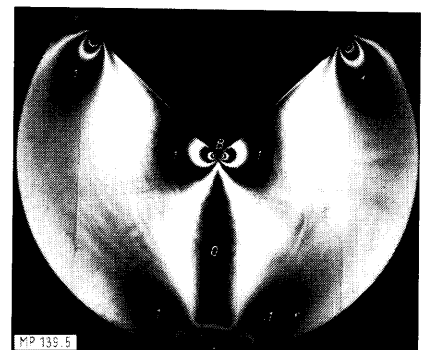


Fig. 5: Isochromaten am photoelastischen Modell mit den Krafteinleitungs- und Kerbbereichen

Distribution of isochromates on the photoelastic model with stress concentrations at the force transmission points and around the notch

Répartition des isochromates sur le model photo-élastique avec les contraintes concentrées aux points de transmission des efforts et autour de l'entaille

lung um etwa 22% niedriger als die entsprechende Extrapolation der Berechnung. Als erste Arbeitshypothese wurden diese zwei Ergebnisse für den Verlauf der Korrekturfunktion im gerechneten Inter-

Tab. 1: Chemische Analyse und Festigkeit der verwendeten Stähle — Chemical analysis and resistance data of the steels used

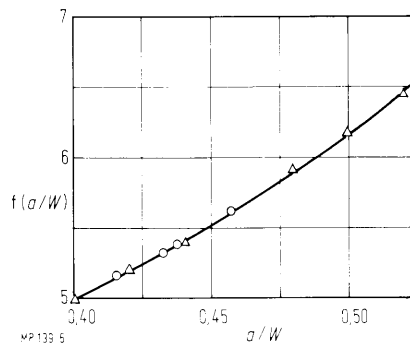
Analyse chimique et résistance des matériaux employés

Stahl	Analyse Gew.-%												Wärmebehandlung			Festigkeitswerte			
	C	Ni	Cr	Mo	Si	Mn	P	S	Cu	Al	W	V	Tempe- ratur °C	Dauer min	Umge- bung	σ_B N mm ²	$\sigma_{0.2}$ N mm ²	δ_5 %	
A	0,38	≈ 4	≈ 2	≈ 0,5	←	nicht genau bekannt (bei Analyse: vernachlässigbar wenig)							→	400 860 170 -60 180	60 20 60 dreimal 60	Ofen Öl Öl Luft Öl	2080	1850	20
B	0,27	0,4	3,17	0,56	0,23	0,64	0,016	0,010	0,09	0,004	0,009	0,021	vergütet (n. b.)			915	775	15	

vall algebraisch gemittelt. Die zerstörenden bruchmechanischen Untersuchungen mit hochfestem Material bestätigen die Richtigkeit dieser Annahme.

6. Zerstörende bruchmechanische Untersuchungen

Der experimentellen Überprüfung der bisherigen Resultate dienten einige bruchmechanische Versuche mit Proben aus einem hoch- und aus einem mittelfesten Stahl (Analysen und Festigkeitswerte der beiden verwendeten Stähle gemäß Tab. 1). Beim hochfesten Material A ließen sich die Bedingungen der linearelastischen Bruchmechanik voll erfüllen, so daß eine einwandfreie Auswertung möglich war (Fig. 6). Die kleinen „Käseproben“ (88 mm ϕ , Prüfkraft rund 120 kN vertikal) wurden überdies mit äquivalenten Kom-



MP 139.5

Fig. 6: Korrekturfunktion $f(a/W)$ für die Bestimmung der linear-elastischen Bruchzähigkeit K_I .

Corrective function $f(a/W)$ for determining K_I .

Fonction de correction $f(a/W)$ pour déterminer K_I .
Berechnung der Spannungsintensität nach Gl. (2) und Fig. 1

The calculation is carried out acc. to Equ. (2) and Fig. 1

L'intensité de contrainte est calculée selon l'équ. (2) et Fig. 1

paktzugproben (Probenbreite $W = 80$ mm, Prüfkraft rund 70 kN) und Biegeproben aus dem gleichen Material verglichen (Fig. 2 sowie Fig. 7 und 8).

Die großkalibrigen „Käseproben“ (Fig. 3) wurden einem Behälterbruchstück (mittelfester Stahl B) entnommen. Obwohl die Abmessungen wegen ungenügender Wanddicke für eine linear-elastische Auswertung nicht ausreichend waren, ergaben auch diese Versuche wertvolle Resultate. Insbesondere war der Vergleich mit großkalibrigen Biegeproben interessant, die aus dem betreffenden Stück naturgemäß nur in einer bestimmten Orientierung geschnitten werden konnten (Kompaktproben gleichen Kalibers waren überhaupt nicht möglich gewesen). Es zeigte sich Identität der fraktographischen Befunde und gute Übereinstimmung des Versuchsablaufes.



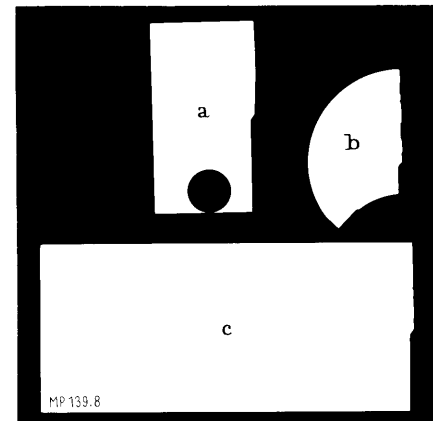
Fig. 7: Bruchflächen dreier Proben verschiedener Form („Käseprobe“, Kompaktprobe, Biegeprobe) aus hochfestem Stahl

Fractographic record of three specimens of different shapes („cheese“, CT, bending) of high resistance steel

Photographie fractographique de trois éprouves de formes différentes („fromage“, CT, flexion) en acier de haute résistance

Übereinstimmung des Charakters — The character of the three surfaces is identical

Le caractère des trois surfaces est identique



MP 139.8

Fig. 8: Größenvergleich der drei verwendeten Probenformen (je eine Hälfte)

Size comparison of the three specimen shapes (one half of each)

Comparaison de la grandeur des trois formes d'éprouve (une moitié de chacune)

a Kompaktprobe
compact specimen
épreuve CT

b „Käseprobe“
„cheese“
„fromage“

c Biegeprobe
bending specimen
épreuve de flexion

7. Schlußfolgerungen

Nach den geschilderten Untersuchungen kann folgendes „Rezept“ für die K_{Ic} -Bestimmung mit der „Käseprobe“ angegeben werden: Der Probekörper und die Krafteinleitungsbedingungen sollen Fig. 1 entsprechen. Als Auswerteformel kann Gl. (2) benutzt werden. Die Korrekturfunktion $f(a/W)$ ist in Fig. 6 dargestellt.

Was die weiteren Einzelheiten und Kriterien (z. B. die des Ermüdungsanschwingens usw.) betrifft, so sind die Richtlinien der amerikanischen Norm ASTM E 399-74 sinngemäß zu befolgen. Bei der Mindestabmessung der Rißlänge $a \geq 2,5$ ($K_{Ic}/\sigma_{0,2}$)² wäre zu empfehlen, den Faktor 2,5 für die „Käseprobe“ auf 1,9 zu reduzieren. Diese Verminderung ergibt sich aus der veränderten Geometrie der Probe. Das Kriterium gelte damit in orthodoxer Form für den Hebelarm zwischen der Wirkungslinie der Kraft F und der Rißfront (Fig. 1).

Die vorliegenden Untersuchungen stellen erste Schritte dar. Weitere Arbeiten werden nicht nur der statistischen Erhärtung der Eichwerte sondern auch der elasto-plastischen Auswertung (etwa nach dem COD-Verfahren), eventuell auch der weiteren Verkleinerung der Proben dienen müssen. Eingehender wird zum Thema berichtet in einer Nachdiplomarbeit [10], welche im Rahmen des Forschungsprojektes „BRUMM“ („Bruchversuche mit Metallen“) der EMPA durchgeführt wurde. Privatdozent Dr. T. Varga von der Firma Sulzer leistete bei der praktischen Ausführung der Untersuchung wertvolle Hilfe.

Literatur

- [1] ASTM: Book of Standards, Part 31: Physical and mechanical testing of metals (1969), bes. S. 1099/144; Brown, W. F.: Review of Developments in Plane Strain Fracture Toughness Testing. ASTM Spec. Techn. Publ. Nr. 463, 1970; —, J. E. Strawley: Plane strain crack toughness testing of high strength metallic materials. ASTM Spec. Techn. Publ. Nr. 410, 1969.
- [2] Erismann, T. H.: Bruchmechanik für den Nichtspezialisten. Material u. Techn. 3 (1975) Nr. 3 S. 120.
- [3] Varga, T.: Praktische Bruchmechanikprüfung. Material u. Techn. 1 (1973) Nr. 2 S. 83/88.
- [4] Feddern, G., E. Macherauch: Eine neue Probenform für bruchmechanische Experimente. Z. f. Metallkde. 64 (1973) Nr. 12 S. 882/84.
- [5] —: Zur Methodik der Bruchzähigkeitsbestimmung. Dissertation am Lehrstuhl und Institut für Werkstoffkunde I (Dir.: Prof. Dr. E. Macherauch) der Univ. Karlsruhe, 1973; —, Zur Rißerzeugung durch Werkstoffzerrüttung an 3-Punkt-Biege- und CT-Proben verschiedener geometrischer Abmessungen. Materialprüf. 16 (1974) Nr. 8 S. 238/40.
- [6] Boyle, R. W., A. M. Sullivan, J. M. Krafft: ASME MET-13 (1962); —, —, —: Welding J. 41 (1962) S. 428/32.
- [7] Kassem, M. A.: Zur Bruchzähigkeit und deren Bestimmung. Materialprüf. 16 (1974) Nr. 7 S. 197/202.
- [8] Griffith, A. A.: The phenomena of rupture and flow in solids. Phil. Trans. A. (1920) Nr. 221 S. 163.
- [9] ● Irwin, G. R.: Fracture. Encyclopedia of Physics (Ed. Flügge). Vol. 6, Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1958, bes. S. 551.
- [10] Prodan, M.: Entwicklung eines neuen Probekörpers für bruchmechanische Untersuchungen. Unveröffentlichte Nachdiplomarbeit ETH/EMPA, Zürich 1975. MP 139