

## WERKSTOFFKENNWERTE ZUR BEURTEILUNG DER BRUCHSICHERHEIT VON KERNREAKTORDRUCKBEHÄLTERN

E. KLAUSNITZER,

*Siemens AG, Reaktortechnik, Erlangen, Germany*

### ABSTRACT

For stress calculations and safety analyses of reactor pressure vessels, a great number of material properties must be known. Reliable results can only be obtained with the applicable actual values, since empirical minima or mean values do not suffice. Cuts in the contemplated scope of testing must frequently be accepted because of the limited quantities of material available, tight schedules and budgets. Fundamental investigations, not tied to specific projects, are therefore considered to be of great importance.

Depending on the computation models employed and the acceptance requirements set forth, different test methods are used.

Recently, investigations into the fracture mechanics have gained in significance over the conventional methods of obtaining quantitative information on the fracture toughness.

Wall thicknesses of reactor pressure vessels in pressurized-water reactors vary between 100 mm and 1,000 mm. With material in this order of thickness, different properties must be expected depending on the location and orientation of the specimen. Fundamental relations are disclosed.

Recent test results obtained during systematic tests on actual pressure-vessel forgings are discussed.

## 1. Einleitung

Zur Beurteilung der Bruchsicherheit von Kernreaktordruckbehältern werden einerseits die auftretenden Beanspruchungen und andererseits die Werkstoffkennwerte benötigt. Während sich die Beanspruchungen aus den Betriebsdaten, wie z.B. Druck, Temperatur, Schwingungen, Geometrie, ergeben, sind die Werkstoffkennwerte in Versuchen zu bestimmen. In einer Sicherheitsanalyse werden dann die auftretenden Beanspruchungen mit den zulässigen verglichen. Dabei ist nachzuweisen, daß in allen Betriebszuständen ein ausreichender Sicherheitsabstand gegen das Versagen eines Bauteiles vorliegt.

Mit Hilfe der Bruchmechanik, die sich in den letzten 10-15 Jahren als neues Teilgebiet der Festigkeitslehre entwickelt hat, ist es möglich, den besonders kritischen Fall eines Sprödbruches theoretisch zu beherrschen. Allerdings ergibt sich damit die Notwendigkeit eine Reihe neuer Werkstoffkennwerte zu bestimmen. Die Prüfverfahren sind in vielerlei Hinsicht (z.B. Prüfausrüstung, Materialbedarf, Kosten, Prüfzeit) sehr aufwendig, so daß sie nicht in der bisher üblichen Weise zur Anwendung kommen können. Umso dringlicher sind umfangreiche Grundsatzuntersuchungen, die unabhängig von bestimmten Projekten in enger Zusammenarbeit zwischen Hochschulen, Forschungsinstituten, Verbänden und Industrie durchgeführt werden müssen.

Weitere Schwierigkeiten für die Bestimmung der Werkstoffkennwerte ergeben sich aus den großen Abmessungen der verwendeten Schmiedestücke, die teilweise erhebliche Eigenschaftsgradienten innerhalb der Wanddicke zur Folge haben. Neben den Werkstoffkennwerten der Schmiedestücke müssen auch diejenigen der sie verbindenden Schweißnähte und der Wärmeeinflußzonen bestimmt werden. Schließlich ist noch zu erwähnen, daß bestimmte Teile von Kernreaktordruckbehältern einer Strahlenversprödung unterliegen, die durch geeignete Proben überwacht werden muß. Die Bestimmung von Werkstoffkennwerten an bestrahlten Proben gehört zu den aufwendigsten Prüfverfahren innerhalb der gesamten Werkstoffprüfung.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einige der genannten Aspekte bei der Bestimmung der Werkstoffkennwerte von Kernreaktordruckbehältern näher zu beleuchten. Dabei liegen allen Ausführungen die Verhältnisse von SIEMENS-Druckwasserreaktoren in Leistungseinheiten von 300 - 1200 MW<sub>e1</sub> zugrunde.

## 2. Prüfverfahren

Die infrage kommenden Prüfverfahren ergeben sich aus den einschlägigen Prüfvorschriften und der Anwendung der Bruchmechanik zum Nachweis der Sprödbruchsicherheit. Im wesentlichen kommen folgende Prüfverfahren in Betracht:

Kerbschlagbiegeversuche,  
Zugversuche,  
Fallgewichtsversuche (Pellini-Test),  
Dynamic-Tear-Test,  
Messung der Bruchzähigkeit,  
Dauerschwingversuche,  
Zeitschwingversuche (low cycle fatigue),  
Messung des Rißwachstums.

Entsprechend den Betriebs- oder Prüfbedingungen werden die Versuche bei tiefen oder hohen Temperaturen, an Luft, unter Vakuum, Schutzgas oder in Flüssigkeiten (z.B. Primärwasser), bei niedrigen oder hohen Frequenzen bzw. Geschwindigkeiten, kraft- oder dehnungsgesteuert, vor oder nach Bestrahlung durchgeführt. Die verwendeten Probenformen sind sehr mannigfaltig, was Abb. 1 verdeutlichen soll.

Im Interesse einer rationellen Versuchsdurchführung müssen für die Probenfertigung, Prüfung und Auswertung hochqualifiziertes Personal, moderne Werkzeugmaschinen, zuverlässige Prüfgeräte und EDV-Anlagen eingesetzt werden.

### 3. Versuchskosten

Es ist schwierig, exakte Angaben zu den Versuchskosten zu machen, da diese von vielen Faktoren (z.B. Fertigungsmethoden, Toleranzen, Probenanzahl, Prüfausrüstung) abhängen. In Abb. 2 werden deshalb relative Kosten für eine Reihe von Prüfverfahren angegeben. Zur Erläuterung des Diagrammes ist folgendes zu bemerken: die Kostenkalkulation bezieht sich auf Serien von 5 - 20 Proben, das Probenmaterial ist bereits zerlegt, das Verhältnis der Stundensätze für Fertigung: Prüfung/Auswertung beträgt 1:2,5, die Kosten des Probenmaterials sind mit DM 3,--/kg angesetzt. Aus dem Diagramm geht hervor, daß konventionelle Kerbschlagbiege- und Zugversuche um den Faktor 100-200 billiger sind als eine  $K_{IC}$ -Messung an einer großen Probe. Bei den großen Proben fallen die Materialkosten sehr stark ins Gewicht, obwohl der angenommene Materialpreis sehr niedrig ist. Die Versuchskosten für bestrahlte Proben liegen um den Faktor 10-100 höher als für unbestrahlte.

### 4. Materialbedarf

Aus den Materialkosten in Abb. 2 ist bereits ersichtlich, daß insbesondere die Proben für  $K_{IC}$ -Messungen sehr groß sind. Die größten bisher geprüften 12 T-Proben haben Abmessungen von etwa 300x760x730 mm und ein

Gewicht von 1200 kg. Abgesehen von den Kosten stehen in den meisten Fällen derartige Mengen von Probematerial aus den Originalschmiedestücken nicht zur Verfügung, weil die erforderlichen Blockgrößen ohnehin schon die vorhandene Herstellungskapazität stark ausnutzen. Einen Ausweg aus dieser Situation können nur Grundsatzuntersuchungen bieten, die die prinzipiellen Zusammenhänge zwischen chemischer Zusammensetzung, Abmessungen, Herstellungsverfahren, Wärmebehandlung, Verformungsgrad und Probenlage aufzeigen. Hervorragendes Beispiel für derartige Grundsatzuntersuchungen ist das amerikanische HSST (Heavy Section Steel Technology) - Programm.

Weitere Möglichkeiten Originalmaterial einzusparen, bieten sich durch die Verwendung von geschweissten Verbundproben. Diese Technik wurde bei einem Teil der in Abb. 1 gezeigten Proben erfolgreich angewendet, wobei die Verbindung zwischen Original- und Hilfswerkstoff durch Elektronenstrahlschweißen hergestellt wurde. Speziell über die Verwendung von Verbundproben für die Messung der Bruchzähigkeit wurde in [ 1 ] berichtet. Nähere Angaben zu den verwendeten Probenformen enthält Abb. 3. Die bisher erzielten Meßergebnisse an CTS-Proben der Größe 1 T und 2 T sind positiv, d.h., es wurden die gleichen  $K_{Ic}$ -Werte wie an Kompaktproben gemessen.

Die Entnahme von Proben aus den Schweißnähten oder den plattierten Flächen des Kernreaktordruckbehälters direkt ist in der Regel nicht möglich. Hierfür müssen Arbeitsproben unter Original-Bedingungen hergestellt werden. Die Probeentnahme erfordert hier besondere Sorgfalt, weil sich die Probenlage häufig nach bestimmten Stellen der Schweißnaht (z.B. Wurzel, Wärmeeinflußzone) orientieren muß. Als Beispiel ist in Abb. 4 die Entnahme von WOL-1X-Proben aus der Rundnaht zwischen den zylindrischen Ringen eines Kernreaktordruckbehälters gezeigt. Das vorgearbeitete Probematerial wurde angeätzt, so daß die Probenlage genau festgelegt werden kann.

## 5. Ablauf der Prüfungen

In Abb. 5 ist ein stark vereinfachter Terminplan eines Kernreaktordruckbehälters wiedergegeben. Daraus ist ersichtlich, daß während des größten Teils der Fertigungszeit Wärmebehandlungen vorzunehmen sind, die die Eigenschaften des Stahles verändern können. Sowohl aus wirtschaftlichen, als auch terminlichen Überlegungen ist es nicht möglich, die Prüfungen erstmals nach der letzten Wärmebehandlung durchzuführen. Es wird deshalb folgendermaßen vorgegangen: Nach dem Vergüten der Schmiedestücke wird das vorgesehene Probematerial abgetrennt und für die nachstehend aufgeführten Untersuchungen aufgeteilt:

- 1.) Prüfung des vergüteten Zustandes zur Sicherung der sinnvollen Weiterbearbeitung der Schmiedestücke.
- 2.) Prüfung des simulierten Endzustandes. Aufgrund des Fertigungsplanes sind sämtliche Wärmebehandlungen, die der Kernreaktordruckbehälter erfährt, bekannt. Ein Teil des Probematerials wird dementsprechend vorab wärmebehandelt und geprüft. Damit ist auch der voraussichtliche Endzustand bekannt.
- 3.) Prüfung des Endzustandes. Der restliche Teil des Probematerials durchläuft sämtliche Wärmebehandlungen mit den jeweiligen Schmiedestücken bzw. dem Kernreaktordruckbehälter, so daß Änderungen gegenüber dem Fertigungsplan erfaßt werden. Die daran ermittelten Werkstoffkennwerte gehen letztlich in die Beurteilung der Bruchsicherheit ein.

Durch das geschilderte Vorgehen entstehen natürlich sehr hohe Prüfkosten. Es ist deshalb wichtig, die jeweils erforderlichen Prüfungen sorgfältig auszuwählen. Vergleichende Versuche an den verschiedenen Zuständen sind nur im Rahmen von Grundsatzuntersuchungen möglich.

#### 6. Werkstückgeometrie - Werkstoffkennwert

Kernreaktordruckbehälter gehören sowohl hinsichtlich der äußeren Abmessungen, als auch der Wanddicken zu den größten Einheiten des Schwer-Apparatebaus. Abb. 6 zeigt eine Reihe bereits gebauter bzw. im Bau befindlicher Kernreaktordruckbehälter für  $H_2O$ -Druckwasserreaktoren. Daraus ist ersichtlich, daß die Wanddicken im Bereich von 100-1000 mm liegen, ebenso auch die Schweißnähte. Bei diesen Abmessungen und dem z.Zt. verwendeten Stahl 22 NiMoCr 37 treten Eigenschaftsgradienten innerhalb eines Schmiedestückes und Unterschiede zwischen den verschiedenen Schmiedestücken auf. Neben den umfangreichen Abnahmeprüfungen sind deshalb Grundsatzuntersuchungen notwendig, die gültige Schlüsse zulassen von den Abnahmewerten auf die Eigenschaften des gesamten Schmiedestückes.

#### 7. Versuchsergebnisse

Die nachstehend aufgeführten Versuchsergebnisse stammen entweder aus projektgebundenen Untersuchungen (z.B. Abnahmeprüfungen) oder aus Grundsatzuntersuchungen des seit 1967 laufenden Forschungsvorhabens. "Sprödbruchprüfung von Druckbehälterstählen und Anwendung der Ergebnisse zur Überwachung von Reaktordruckbehältern", das mit Mitteln des Bundesministers für Bildung und Wissenschaft (Kennzeichen Inv.Reaktor 45 b) ge-

fördert wird. Alle Untersuchungen wurden an Schmiedestücken aus dem Stahl 22 NiMoCr 37 durchgeführt, aus dem z.Zt. alle Kernreaktordruckbehälter von SIEMENS hergestellt werden. Die Richtanalyse dieses Stahles ist in Abb.12 angegeben.

#### 7.1 Flansch - Segment, 540 mm Wanddicke

In Abb. 7 sind die Ergebnisse aus Zugversuchen (Einzelwerte) bei RT und 330°C, Kerbschlagbiegeversuchen (Mittelwerte aus 3 Proben) bei 0°C und -12°C, sowie aus Fallgewichtsversuchen im Endzustand nach [ 2 ] dargestellt. Es zeigt sich, daß sich die Kerbschlagzähigkeit und die NDT-Temperatur innerhalb der Wanddicke sehr stark ändert. Weniger ausgeprägt ist die Abhängigkeit der Streckgrenze und Zugfestigkeit. Bei der Bruchdehnung und -einschnürung kann eine Abhängigkeit durch die bei diesen Werkstoffkennwerten höhere Streuung überdeckt sein.

#### 7.2 Flanschring, 385 mm Wanddicke

Aus einer großen Zahl von Abnahmeprüfungen sind in Abb. 8 die Ergebnisse aus Kerbschlagbiegeversuchen (Mittelwerte aus 3 Proben) bei +20°C aufgetragen.

Entsprechend den Abnahmevorschriften wurden die Proben aus der Lage 1/4 T - 1/2 T (T = Wanddicke) entnommen. Aus den Ergebnissen sind folgende Schlüsse zu ziehen:

1. In Umfangrichtung ist kein Eigenschaftsgradient vorhanden.
2. Zwischen den Probenlagen tangential und radial ist ein deutlicher Unterschied vorhanden, der auf die Schmiedeverformung zurückzuführen ist.
3. Die zusätzlichen Wärmebehandlungen nach dem Vergüten (Spannungsfrei-glühen im Bereich bis 650°C) führen nur zu einem geringen Abfall der Kerbschlagzähigkeit.
4. Der Unterschied zwischen dem simulierten Endzustand und dem Endzustand ist ebenfalls gering.

#### 7.3 Schmiedestücke verschiedener Wanddicken

Im Rahmen des bereits erwähnten Forschungsvorhabens werden an folgenden Schmiedestücken bruchmechanische Untersuchungen durchgeführt:

##### 7.3.1 Material A: Platte, 915 mm Wanddicke, 2770 mm $\phi$ .

Aus dem in Abb. 9 gezeigten Schmiedestück, das für die Rohrplatte eines Dampferzeugers vorgesehen war und wegen nichtmetallischer Einschlüsse ver-

worfen werden mußte, wurde der schraffierte Bereich mit Zug-, Kerbschlagbiege-, Pellini- und  $K_{IC}$ -Proben geprüft.

### 7.3.2 Material B: Platte, 700 mm Wanddicke, 700 mm $\emptyset$ .

Das in Abb. 10 skizzierte Schmiedestück wurde speziell für ein Untersuchungsprogramm hergestellt und mit den gleichen Proben wie Material A geprüft (Segmente A, B, C).

### 7.3.3 Material C: Zylindrischer Ring, 220 mm Wanddicke.

Aus einem zylindrischen Ring für einen Kernreaktordruckbehälter wurden Proben entsprechend Abb. 11 geprüft.

Die chemische Zusammensetzung und Wärmebehandlung aller drei Schmiedestücke ist in Abb. 12 aufgeführt.

Die gemessenen  $K_{IC}$ -Werte sind die ersten Ergebnisse an Schmiedestücken des Stahls 22 NiMoCr 37 [ 3 ]. Um die  $K_{IC}$ -Werte richtig einordnen zu können, werden sie mit solchen an dem ähnlichen amerikanischen Stahl ASTM A 533 Grade B Class I verglichen [ 4 ] [ 5 ] [ 6 ]. Die daraus benutzten Vergleichswerte wurden an einem 300 mm dicken Walzblech aus dem genannten Stahl gemessen.

In Abb. 13 sind die Ergebnisse aus den Kerbschlagbiegeversuchen an ISO-V-Proben aufgetragen. Es handelt sich dabei um Mittelwertkurven aus jeweils 2 - 3 Proben.

Die Ergebnisse zeigen, daß die Kerbschlagzähigkeit sehr starke Unterschiede über die Dicke aufweist. Dafür sind der Durchschmiedungsgrad und die Abkühlgeschwindigkeit beim Abschrecken verantwortlich. Aufgrund der Ergebnisse an Material B sowie den Untersuchungen in [ 2 ] ist im Bereich der Übergangstemperatur ein stärkerer Einfluß der Abkühlgeschwindigkeit anzunehmen: An der Oberfläche liegen unabhängig von der Wanddicke überwiegend Werte im Bereich der Kurve für Material C vor. Das Referenzmaterial D fügt sich hier sehr gut ein. Der kristalline Fleck und die NDT-Temperatur in Tabelle 1 spiegeln qualitativ das gleiche Verhalten wieder.

Material A fällt aus dieser Betrachtung heraus, da es sich um ein Ausschußstück handelt, bei dem andere Ursachen vorliegen können.

An einem Teil der  $K_{IC}$ -Proben aus Material C wurden während des Anschwingens Messungen des Rißwachstums mittels Ultraschall durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 14 aufgetragen. Besonders zu beachten ist, daß das eingetragene Streuband unverändert aus [ 4 ] entnommen wurde. Da die Proben auch für die Messung der Bruchzähigkeit vorgesehen waren, konnten

beim Anschwingen entsprechend ASTM-E 399 nur niedrige  $\Delta K$  - Werte benutzt werden.

Die Übereinstimmung der Ergebnisse ist so gut, daß sie keiner Diskussion bedarf.

Wie aus Abb. 15 ersichtlich, fallen die Streckgrenzen der Materialien B und C praktisch mit Material D zusammen. Material A dagegen hat deutlich niedrigere Werte.

Bei dem Vergleich der Bruchzähigkeit in Abb. 15 ist zu beachten, daß für das Referenz-Material D die untere Grenzkurve, für die anderen Materialien jedoch die Mittelwertkurven dargestellt sind. Die Einzelwerte für die Materialien A, B und C sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Material A weist erwartungsgemäß die niedrigsten  $K_{IC}$ -Werte auf, die aber nur geringfügig unter der Grenzkurve für Material D liegen. Die Materialien B und C erreichen im Mittel wesentlich höhere  $K_{IC}$ -Werte, wobei aber betont werden soll, daß Einzelwerte fast die Grenzkurve D erreichen.

Bei  $-196^{\circ}\text{C}$  fallen die  $K_{IC}$ -Werte aller Materialien zusammen. Daraus wird deutlich, wie problematisch eine Extrapolation von sehr tiefen auf hohe Temperaturen ist.

## 8. Diskussion

-----

Die mitgeteilten Ergebnisse zeigen, daß die Werkstoffkennwerte großer Schmiedestücke aus 22 NiMoCr 37 von vielen Faktoren abhängig sind. Da es nicht möglich ist, sämtliche für die Beurteilung der Bruchsicherheit erforderlichen Untersuchungen an den Originalteilen vorzunehmen, sind Grund-  
satzuntersuchungen besonders dringlich.

Literatur:

- [ 1 ] KLAUSNITZER, E., "Messung der Bruchzähigkeit ( $K_{IC}$ ) metallischer Werkstoffe mittels Verbundproben. atomwirtschaft 16, S. 190 (April 1971).
- [ 2 ] CERJAK, H. and DEBRAY, W., "Properties of Nuclear Grade Forging Steel, Fourth Annual Information Meeting of the Heavy Section Steel Technology Program, Paper No. 7.
- [ 3 ] KLAUSNITZER, E, "Bruchzähigkeits- ( $K_{IC}$ )-Messungen an Schmiedestücken aus dem Stahl 22 NiMoCr 37".atomwirtschaft 16, S. 188 (April 1971).
- [ 4 ] CLARK, jr., W.G. and WESSEL, E.T., "Application of Fracture Mechanics Technology to Medium-Strength Steels", Scientific Paper 69-1D7-BFPWR-P2, Westinghouse Research Laboratories.
- [ 5 ] WESSEL, E.T., "Linear Elastic Fracture Mechanics for Thick-Walled, Welded Steel Pressure Vessels: Material Property Considerations", Scientific Paper 69-1D7-BFPWR-P1, Westinghouse Research Laboratories.
- [ 6 ] WESSEL, E.T., MAGER, T.R., "The Fracture Mechanics Approach to Reliability in Nuclear Pressure Vessels Edited by M.S.Wechsler," The Technology of Pressure-Retaining Steel Components.

Tabelle 1: Meßergebnisse an den Materialien A, B und C

Prüf- temperatur T in °C	Bruchzähigkeit $K_{Ic}$ in $\text{kpmm}^{-3/2}$		
	Material A	Material B	Material C
-196	84; 87; 93	83; 89; 86; 82;	82; 86
-150	---	99	105; 121; 125; 118
-120	---	---	199; 152
- 90	123; 128; 132	185; 227; 213; 187; 211	203; 214; 255; 248
- 75	120; 145; 128; 134	235; 211; 224; 214	240;
- 50	---	254; 273	271; 277; 300
- 35	---	307; 319; 278	---
- 25	185; 188	---	---
NDT-Tempe- ratur	+ 10°C	- 20°C	- 20°C

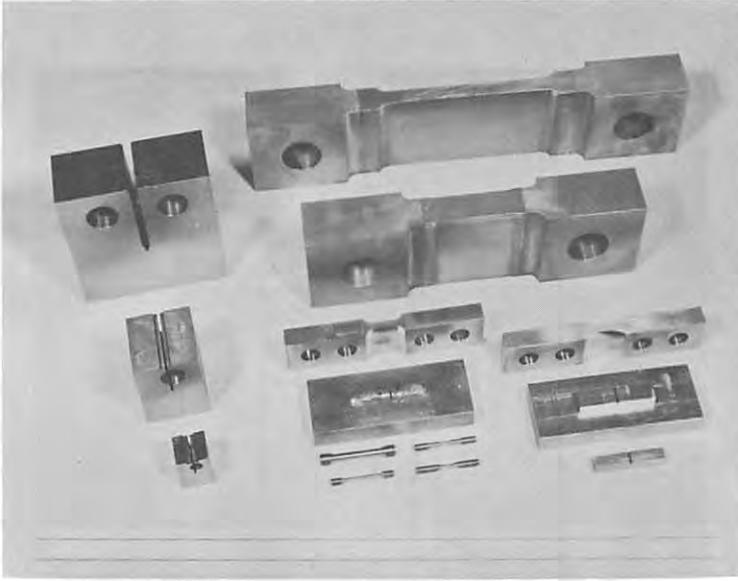


Abb. 1: Verschiedene Probenformen

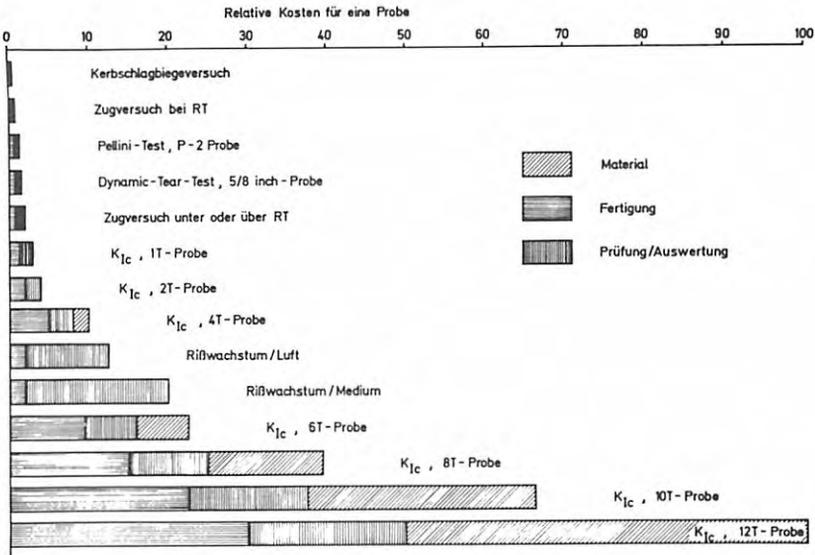


Abb. 2: Kostenvergleich

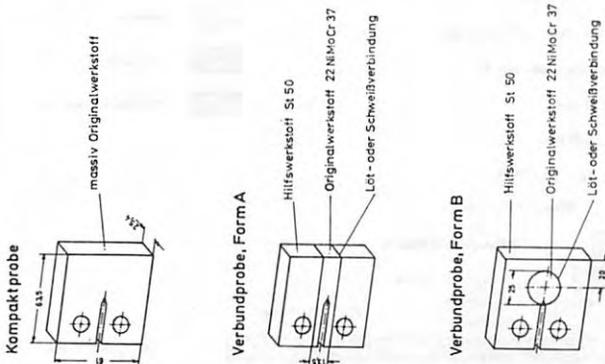


Abb. 3: Verbundproben zur  $K_{IC}$ -Messung

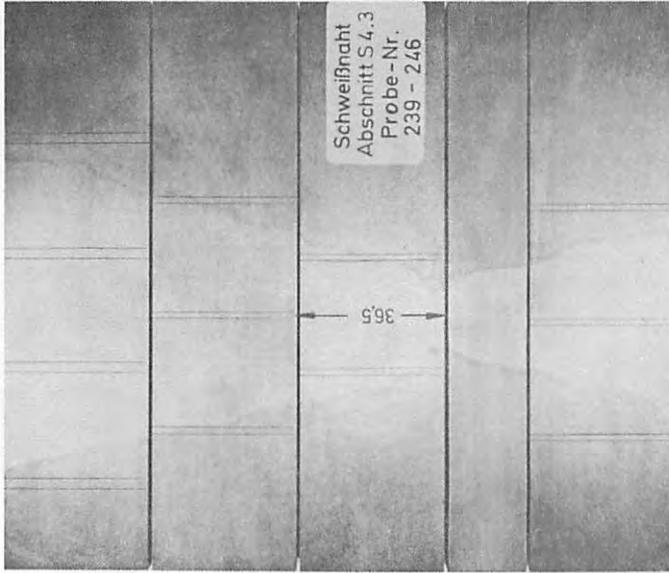


Abb. 4: Probenlagen in einer Schweißnaht



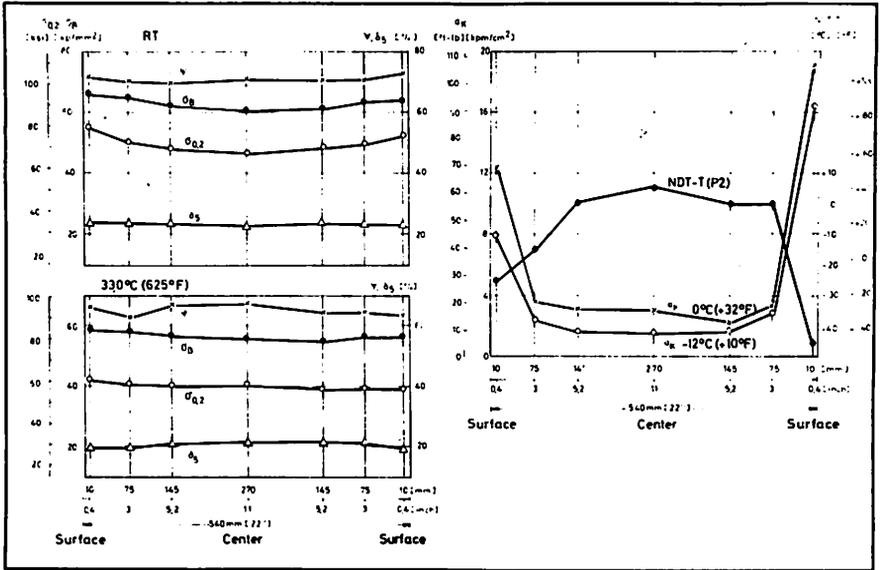


Abb. 7: Eigenschaftsgradient innerhalb der Wanddicke

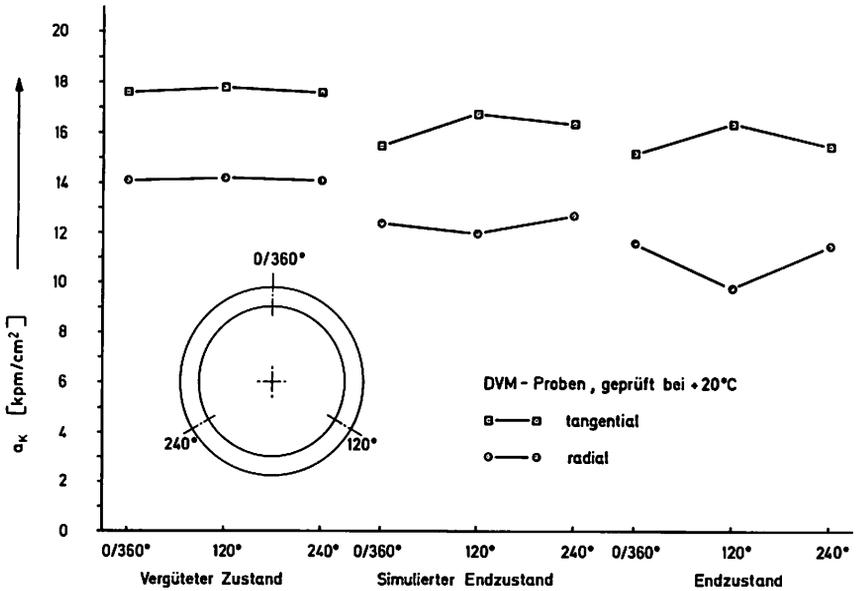


Abb. 8: Einfluß von Probenlage und Prüfzustand

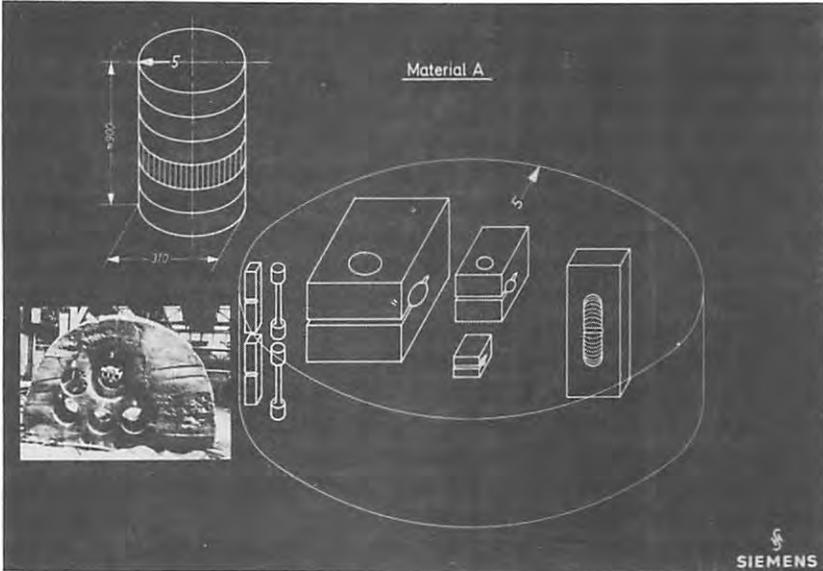


Abb. 9: Probenlageplan für Material A

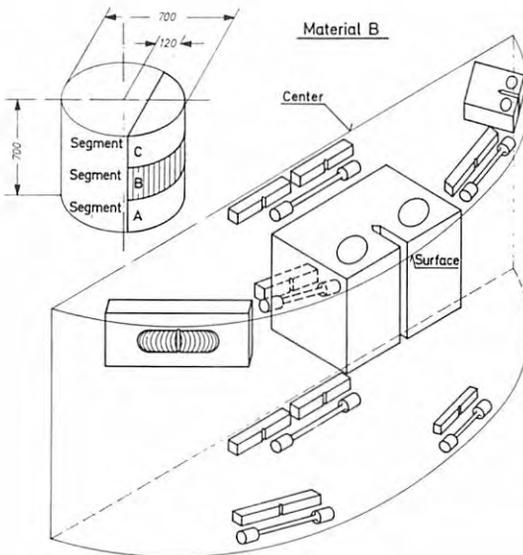


Abb.10: Probenlageplan für Material B

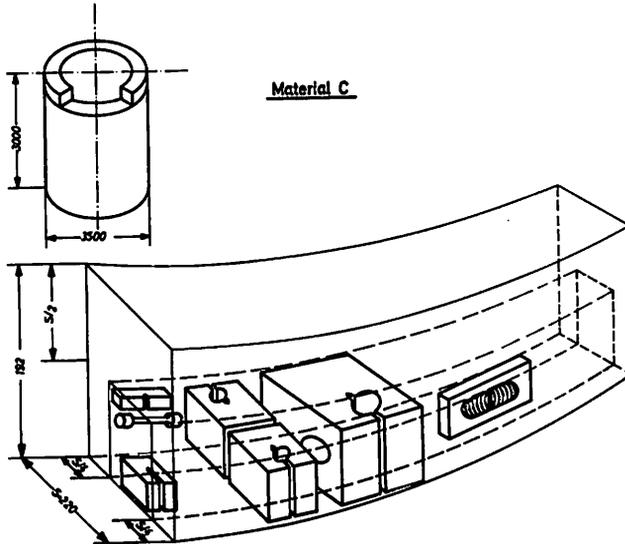


Abb.11: Probenlageplan für Material C

Identification	Chemical Composition (wt percent)									Heat Treatment		
	C	Mn	P	S	Si	Al	Ni	Cr	Mo	Austenitized	Tempered	Stress Relieved
22 Ni Mo Cr 37 Specification	0,17 0,25	0,50 1,00	max 0,015	max 0,015	0,05 0,35	max 0,05	0,50 1,00	0,30 0,50	0,60 0,80	_____	_____	_____
22 NiMoCr 37 Forging Plate A 110" Diam. 36" Thick	0,24	0,91	0,013	0,013	0,28	0,03	0,78	0,33	0,67	1740 °F for 16 hrs Water Quench	1250 °F for 20 hrs Furnace Cool	_____
22 Ni Mo Cr 37 Forging Bar B 28" Diam. 28" Length	0,25	0,56	0,013	0,011	0,26	0,02	0,86	0,44	0,59	1650 °F for 6 hrs Water Quench	1290 °F for 10 hrs Air Cool	1150 °F for 30 hrs Air Cool
22 Ni Mo Cr 37 Forging Ring C 139" Diam. 9" Thick 119" Length	0,27	0,76	0,015	0,011	0,30	0,045	0,83	0,35	0,64	1600 °F for 6 hrs Water Quench	1270 °F for 15 hrs Furnace Cool	1110 °F for 5 hrs Furnace Cool During fabrication of the vessel 6 times at 1000 °F - 1110 °F for 6 - 21 hrs Furnace Cool

Abb.12: Chemische Zusammensetzung und Wärmebehandlung

Material C

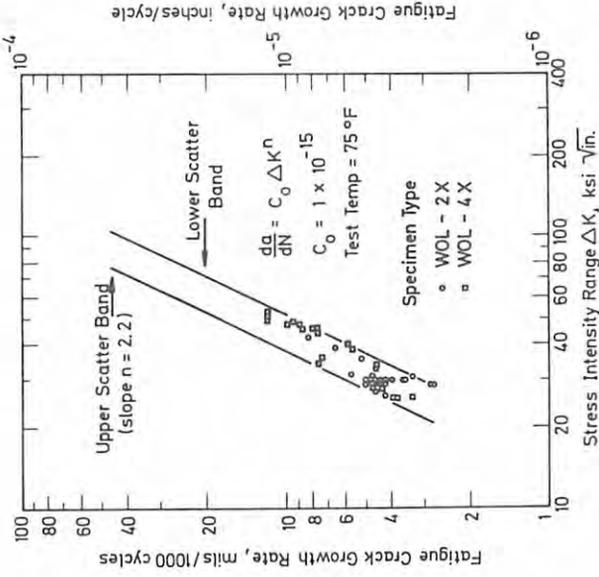


Abb.14: Rißwachstum unter zyklischer Beanspruchung an Material C

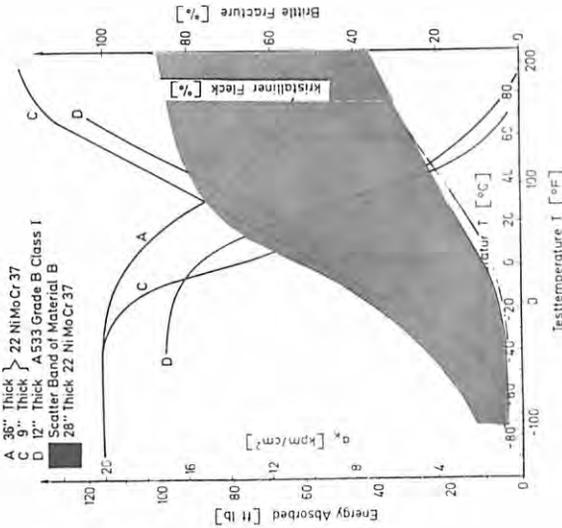


Abb.13: Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche an Material A, B und C

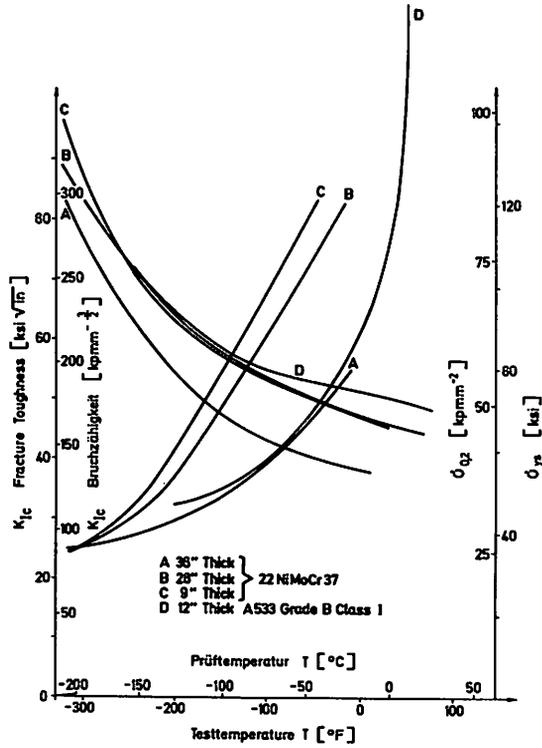


Abb.15: Ergebnisse der  $K_{IC}$ -Messungen an Material A, B und C

DISCUSSION

J. KAJAMAA, Finland

Q

In Fig. 8 the influence of the sample orientation is seen. I would like to know in more detail where these samples are taken ? Either from the surface area or from the middle ? Further, does this affect the ratio of tangential and radial  $a_K$ -values ?

E. KLAUSNITZER, Germany

A

All specimens were taken from quarter thickness, i. e. the notch has this distance to the surface. Therefore the ratio between tangential and radial  $a_K$ -values is not influenced by different distances from the surface.

G. BARTHOLOMÉ, Germany

Q

Sie erwähnen den Einfluss der Wanddicke des Werkstückes auf den  $K_{IC}$ -Werte. Erläutern Sie bitte diese Aussage ! (Einfluss der Probengrösse (size effect) und Einfluss der Vergütung).

E. KLAUSNITZER, Germany

A

Ihre Frage bezieht sich auf die in Abb. 15 dargestellten Ergebnisse von  $K_{IC}$ -Messungen, zu denen ich erwähnte, dass ein Einfluss der Wanddicke vorhanden ist.

Diese Aussage ist unter zwei Gesichtspunkten zu betrachten, und zwar

1. hinsichtlich der Abhängigkeit der Bruchzähigkeit innerhalb der Wanddicke eines Schmiedestückes und
2. hinsichtlich der Abhängigkeit der Bruchzähigkeit von der Wanddicke verschiedener Schmiedestücke bei identischer Probenlage, d. h. bei gleichem Abstand von der Oberfläche.

Zum ersten Punkt haben wir am Material B Orientierungsmessungen an je zwei WOL-4X-Proben durchgeführt, die ergaben, dass der  $K_{IC}$ -Wert bei  $-35^\circ\text{C}$  in der Mitte um etwa 20% niedriger ist als aussen.

Zum zweiten Punkt liegen z. Zt. noch keine eigenen Ergebnisse vor. Die bei Abnahmeprüfungen anfallenden Ergebnisse werden in Zukunft daraufhin ausgewertet.

Die Lösung des gesamten Fragenkomplexes ist sehr aufwendig, weil ausser der Wanddicke andere Parameter (Analysenschwankungen, Abkühlbedingungen, Probenlage in Bezug auf die Schmiedefaser, Werkstoffinhomogenitäten u. a. m.) als Einflussgrössen zu berücksichtigen sind. Es ist deshalb ein entsprechender Forschungsantrag beim BMBW gestellt worden.