

Bruchmechanische Prüfmethode an be-  
strahlten Druckbehälterstählen

H.D. Hebenbrock, F.J. Schmitt,  
W. Spalthoff  
(Inst. f. Werkstofftechnologie)

21. Treffen der EG-Arbeitsgruppe "Heiße Laboratorien  
und Fernbedienung" am 10./11. Juni 1982 in Mol, Belgien.

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH  
Max Planck Straße - Postfach 11 60 - 2054 Geesthacht  
Telefon (04152)12-1 - Telex 02 187 12 gkssg

## Inhalt

1. Einleitung	1
2. Prüfungen an bestrahlten Proben	2
2.1 Fallgewichts- und Kerbschlagbiege- versuch	3
2.2 $K_{IC}$ -Versuch	5
2.3 $J_{IC}$ -Versuch	8
3. Ausblick	11

## 1. Einleitung

Für die Sicherheit von Leichtwasserreaktoren ist der Reaktordruckbehälter das kritischste Bauteil, weil im Falle eines Druckbehälterversagens der Reaktorkern trocken fallen und es zu einer Kernschmelze kommen könnte. Um ein Versagen des Druckbehälters durch spröden oder zähen Bruch auszuschließen, sind seit dem Aufkommen der Leichtwasserreaktor-Technologie umfangreiche Untersuchungen an Druckbehälterstählen - sowohl ohne als auch mit Neutronenbestrahlung - durchgeführt worden. Eine gute Übersicht über die Problemstellung wird in dem Buch von Steele gegeben [1].

Bei der sicherheitstechnischen Beurteilung eines Reaktordruckbehälters werden gewisse hypothetische Fehler (z.B. Risse mit einer Tiefe bis zu einem Viertel der Wanddicke) zugrunde gelegt und nachgewiesen, daß es auch dann unter keinen Umständen zum Behälterversagen kommen kann [2, 3].

Für die Beurteilung wird u.a. das sogenannte Porse-Diagramm herangezogen (Abb. 1). Hier ist als Beispiel im rechten Teil die berechnete Spannung in einer Druckbehälterwand ohne Riß beim An- und Abfahren und beim Dauerbetrieb des Reaktors eingetragen. Im linken Teil sind Grenzkurven für den unbestrahlten und bestrahlten Zustand des Druckbehälters eingezeichnet, die bei keinem Betriebs- und Störfallzustand überschritten werden dürfen. Die Form der Grenzkurven wurde empirisch ermittelt und beruht auf der systematischen Auswertung von Schadensfällen an konventionellen Anlagen durch Pellini u. Mitarb. im NRL. Die Lage der Kurve hinsichtlich der Temperaturachse wird durch die NDT-Temperatur (nil-ductility transition) des betr. Druckbehälterwerkstoffs festgelegt, die im Fallgewichtsversuch [4] an unbestrahlten Proben bestimmt wird. Die Versprödung durch die im Laufe der Betriebszeit aufgenommene Neutronendosis wird durch eine Verschiebung der Grenzkurve nach rechts berücksichtigt. Diese Verschiebung der NDT-Temperatur kann entweder direkt durch Auswertung von bestrahlten Fallgewichtsproben bestimmt werden oder - da Fallgewichtsproben relativ groß sind - näherungsweise im Kerbschlagbiegeversuch [5] an bestrahlten und unbestrahlten ISO-V-Proben.

Eine zweite Möglichkeit zur sicherheitstechnischen Beurteilung eines Druckbehälters bietet das Bruchmechanik-Diagramm (Abb. 2). Mit den Methoden der Bruchmechanik ist es im Prinzip möglich, die Tragfähigkeit eines fehlerbehafteten Bauteils vorherzusagen, indem man einerseits - z.B. an Hand von Formeln oder mit Finite-Element-Rechnungen - den mechanischen Belastungszustand in dem Bauteil in der Nähe der Fehlstelle berechnet und andererseits diese Belastungen mit den kritischen Kennwerten des betreffenden Werkstoffs vergleicht. In dem Bruchmechanik-Diagramm ist rechts als Beispiel die mit Hilfe der linear-elastischen Bruchmechanik berechnete Spannungsintensität  $K_I$  in einer Druckbehälterwand mit Auslegungsriß beim An- und Abfahren und beim Dauerbetrieb des Reaktors eingetragen. Im linken Teil sind die an dem betreffenden Druckbehälterwerkstoff gemessenen Bruchzähigkeitskurven  $K_{IC}(T)$  für den bestrahlten und unbestrahlten Zustand eingezeichnet. Diese Grenzkurven dürfen bei keinem Betriebs- oder Störfallzustand überschritten werden, wenn eine Rißerweiterung vermieden werden soll.

Die  $K_{IC}$ -Bestimmung [6] erfordert mit zunehmender Temperatur so große Probendicken (200 mm und darüber), daß Bestrahlungsversuche sehr aufwendig oder technisch nicht mehr durchführbar sind. In diesem Falle können  $K_{IC}$ -Werte - unter gewissen Einschränkungen - näherungsweise aus kritischen J-Integralwerten  $J_{IC}$  berechnet werden. Für die  $J_{IC}$ -Bestimmung [7] genügen Probendicken bis 25 mm.

Zur sicherheitstechnischen Beurteilung eines Reaktordruckbehälters werden neben den Zähigkeits- noch die Festigkeitswerte des Druckbehälterwerkstoffs benötigt. Ihre Bestimmung erfolgt im normalen Zerreißversuch und soll hier nicht weiter behandelt werden.

## 2. Prüfungen an bestrahlten Proben

Wie schon in der Einleitung erwähnt, wird die Zähigkeit eines Druckbehälterwerkstoffs durch die Neutronenstrahlung deutlich herabgesetzt. Dies gilt besonders für die Ringzone des Druckbehälters in Höhe des Reaktorkerns. Für einen Leistungsreaktor vom LWR-Typ wird der Zähigkeitszustand dieser besonders gefährdeten Zone in mehreren

Schritten ermittelt:

- Messungen am unbestrahlten Werkstoff.  
Hier gelten im Prinzip keine Einschränkungen hinsichtlich der Probenart und -größe.
- Messungen an Proben, die in einem Materialprüfreaktor bestrahlt wurden. Hier können die Bestrahlungsbedingungen hinsichtlich Temperatur, Neutronenflußdichte und -fluenz in weiten Grenzen variiert werden, und es können bei geeigneter Versuchstechnik auch relativ große Proben, z.B. Pellini-Proben und Bruchmechanikproben bis zu 100 mm Dicke, verwendet werden.
- Messungen an sogenannten Einhänge- oder Voreilproben, die in dem betreffenden Leistungsreaktor bestrahlt wurden. Aus Platzgründen können hier nur kleine Proben, z.B. ISO-V-Proben oder Bruchmechanikproben bis 25 mm Dicke, verwendet werden.

Mit Hilfe der so gewonnenen Zähigkeitsdaten des betreffenden Werkstoffs können dann in dem Porse- bzw. Bruchmechanik-Diagramm die Grenzkurven eingezeichnet werden und mit den Betriebs- und Störfallkurven des Leistungsreaktors verglichen werden.

### 2.1 Fallgewichts- und Kerbschlagbiegeversuch

Beide Prüfungen sind schon seit langem als Norm eingeführt und sollen daher nur kurz behandelt werden. Sie sind im engeren Sinne keine bruchmechanischen Prüfungen, weil sie Probenformabhängige Kennwerte liefern, mit deren Hilfe zur Zeit nur über Erfahrungsregeln Grenzkurven für Behälterversagen aufgestellt werden können (Porse-Diagramm).

Abb. 3 zeigt die in Geesthacht verwendete Fallgewichtsmaschine. Sie befindet sich in einer mit 15 cm Blei abgeschirmten Zelle, die mit Fenstern und einfachen Stangengreifern ausgerüstet ist. Beim Fallgewichtsversuch läßt man aus bestimmter Höhe einen Hammer auf eine Probe fallen und prüft anschließend optisch unter mäßiger Vergrößerung, ob die Probe einen nach den Seiten durchgehenden Riß hat oder nicht.

Abb. 4 zeigt die Fallgewichtsprobe. Sie hat auf der Unterseite eine angekerbte Schweißbraupe, die als Riß-Starter dient. Bei einer Versuchsreihe werden 6 bis 8 Proben bei verschiedener Temperatur geprüft, und als NDT-Temperatur gilt die höchste Temperatur, bei der noch ein durchgehender Riß gefunden wird. Zu einer Messung wird die Probe zunächst in einem trockenen Temperiertopf auf die Versuchstemperatur gebracht und dann vollautomatisch durch einen pneumatisch angetriebenen Schwenkarm auf den Amboß gelegt und sofort geschlagen (s. Abb. 3 unten). Der Temperiertopf hat eine kombinierte Flüssigstickstoff-Kühlung und Elektroheizung und erlaubt Prüftemperaturen zwischen -180 und +300 °C.

Der Fallgewichtsversuch ist im Prinzip ein Riß-Stopp-Versuch. Die NDT-Temperatur ist qualitativ mit der aus der Bruchmechanik bekannten Riß-arrestfähigkeit  $K_{Ia}$  verknüpft.

In Abb. 4 ist auch die ISO-V-Probe für den Kerbschlagbiegeversuch eingezeichnet. Für die Prüfungen wird ein instrumentiertes 300 Joule-Pendelschlagwerk verwendet, das sich in einer mit 10 cm Blei abgeschirmten und mit Fenstern und Stangengreifern ausgerüsteten Zelle befindet. Die Probentemperierung erfolgt auf die gleiche Weise wie beim Fallgewichtsversuch.

Für eine Versuchsreihe werden 12 bis 20 Proben benötigt. Die Proben werden von dem Pendel mit vorgegebener Energie und Geschwindigkeit (etwa 5 m/s) in zwei Hälften zerschlagen, und es werden in Abhängigkeit von der Temperatur folgende Größen ermittelt:

- verbrauchte Kerbschlagarbeit [Joule],  
abgelesen aus der Steighöhe des Pendels  
nach dem Schlag;
- Zähbruchanteil an der Bruchfläche [%],  
bestimmt mit dem Fernsehmikroskop;
- Probenbreitung [mm],  
gemessen mit der Mikrometerschraube.

Für weitere Einzelheiten muß auf die Norm verwiesen werden. Abb. 5 zeigt als Beispiel die mit einem Rechnerprogramm aus den Meßwerten ermittelte Kurve für die Kerbschlagarbeit in Abhängigkeit von der Temperatur [8]. Aus der Kurve wird die Temperatur, bei der die Kerbschlagarbeit einen bestimmten Wert überschreitet, als Übergangstemperatur vom spröden zum zähen Werkstoffzustand abgegriffen. Durch Bestrahlung wird die Kerbschlagkurve nach rechts verschoben. Die Zunahme der Kerbschlag-Übergangstemperatur durch Bestrahlung  $\Delta T T$  (transition temperature) kann näherungsweise der Zunahme der NDT-Temperatur durch Bestrahlung  $\Delta NDT-T$  gleichgesetzt und damit in das Porse-Diagramm eingegangen werden.

Der Kerbschlagbiegeversuch ist im Prinzip ein dynamischer Versuch und qualitativ mit der aus der Bruchmechanik bekannten dynamischen Bruchzähigkeit  $K_{Id}$  verknüpft. Beim instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch wird neben den oben genannten Größen (Kerbschlagarbeit usw.) auch ein Kraft-Weg-Diagramm aufgenommen. Die auf die Probe wirkende Kraft wird mit Dehnungsmeßstreifen an der Hammerspitze gemessen, und der Weg der Hammerspitze wird durch ein Rechenprogramm aus der Kraft-Zeit-Kurve berechnet [9]. Es ist zu erwarten, daß in absehbarer Zeit durch verbesserte Finite-Element-Rechnungen die  $K_{Id}$ -Berechnung aus Kraft-Weg-Kurven für die ISO-V-Probe möglich ist.

## 2.2 $K_{IC}$ -Versuch

Die Bruchzähigkeit  $K_{IC}$  ist ein Werkstoffkennwert, der nach den Ansätzen der linear-elastischen Bruchmechanik (plastisch verformter Bereich in der Probe beim Bruch klein gegen Probenabmessungen; überwiegend ebener Dehnungszustand im Bereich der Rißfront) nur an ausreichend großen Proben ermittelt werden kann. Abb. 6 zeigt die für Bruchmechanik-Versuche an bestrahlten Druckbehälterstählen in Geesthacht benutzte CT(compact tension)-Probe, und in der folgenden Tabelle sind einige Daten der verwendeten Standardgrößen zusammengestellt.

	CT25	CT50	CT100
Dicke B	25 mm	50 mm	100 mm
Höhe $2H = 2,4 B$	60 "	120 "	240 "
Breite $W_1 = 2,5 B$	62,5 "	125 "	250 "
Gewicht	640 g	5,1 kg	41 kg
$K_{IC}$ -Prüfkapazität, bis etwa	1900 N/mm <sup>3/2</sup>	2700 N/mm <sup>3/2</sup>	3800 N/mm <sup>3/2</sup>

Zur  $K_{IC}$ -Bestimmung wird die CT-Probe vor der Bestrahlung mit einem Ermüdungsanriß der Länge  $a = (0,5 \pm 0,05)W$  versehen ( $W = 2B$ ). Die für eine  $K_{IC}$ -Bestimmung erforderliche Probengröße ergibt sich aus dem Dicken- bzw. Rißlängenkriterium der ASTM-Norm [6]:

$$B \text{ und } a \geq 2,5 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{0,2}} \right)^2$$

wobei  $K_{IC}$  und  $\sigma_{0,2}$  die bei der Prüftemperatur vorliegende Bruchzähigkeit und Streckgrenze des Werkstoffs sind. Bei etwa gleichbleibender Festigkeit des Druckbehälterstahls ( $\sigma_{0,2} \approx 500$  bis  $600 \text{ N/mm}^2$ ) sind mit zunehmender Zähigkeit wachsende Probenabmessungen erforderlich, um gültige  $K_{IC}$ -Werte messen zu können. In der vorhergehenden Tabelle sind grob abgeschätzte Prüfkapazitäten der verwendeten CT-Standardproben angegeben.

Für die Bestrahlungsversuche in dem Geesthachter Forschungsreaktor FRG-2, einem 18 MW-Schwimmbadreaktor, werden Kapseln mit einem besonders grossen Probenvolumen (etwa 12 Liter) verwendet, die zwei CT100-Proben oder entsprechende Pakete kleinerer Proben aufnehmen können (Abb. 7). Es können gleichzeitig bis zu drei Kapseln dieses Typs am Kernrand des FRG-2 eingesetzt werden (Abb. 8).

Die  $K_{IC}$ -Bestimmung an einer CT-Probe erfolgt durch einen Zerreiβversuch, indem die Probe mit einem entsprechenden Gehänge in eine normale Zerreiβmaschine eingespannt wird und bei monoton von Null ansteigender



Belastung das Last-Rißaufweitungs-Diagramm bis zum Bruch aufgenommen wird (Abb. 9). Während die Last von der in der Maschine eingebauten Lastmeßdose abgenommen wird, wird die Rißaufweitung direkt an der Probe mit einem mit Dehnungsmeßstreifen ausgerüsteten Wegaufnehmer gemessen. Um eine einheitliche Prüftemperatur in der Probe zu gewährleisten, ist sie während des Zerreiβversuchs von einer Temperierkammer umschlossen. Nach dem Versuch wird an den Bruchflächen optisch die genaue Länge des Ermüdungsanrisses in der Probe vor dem Bruch ausgemessen und die Bruchzähigkeit berechnet:

$$K_{Ic} = \frac{P_c}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right)$$

( $P_c$  = kritische Last; B, W, a = Probenabmessungen, s. Abb. 6;  
 $f(a/W)$  = Geometriefunktion, tabelliert in [6]).

Weitere Einzelheiten können der Norm [6] entnommen werden.

Für die  $K_{Ic}$ -Bestimmungen stehen in Geesthacht drei abgeschirmte Zerreiβmaschinen zur Verfügung. Ihre Maximalkräfte sind auf die drei zu prüfenden Probengrößen zugeschnitten. In allen drei Maschinen können die CT-Proben während des Zerreiβversuchs durch eine sie umschließende Klimakammer auf die Prüftemperatur gebracht werden. Die Kammer enthält ein Umluftgebläse und eine kombinierte Einrichtung zum Kühlen durch Flüssig-Stickstoff-Einspritzung und zum elektrischen Heizen. In der folgenden Tabelle sind einige Daten der Zerreiβmaschinen zusammengestellt.

Maximalkraft	50 kN	250 kN	2500
Antrieb	mechanisch	hydraulisch	hydraulisch
Hersteller	Instron	Schenck	Schenck
Probengröße	CT25	CT50	CT100
Temperaturbereich	-180/+200°C	-100/+300°C	-50/+300°C
Bleiabschirmung	10 cm	20 cm	

Die CT25-Probe ist relativ leicht, und entsprechend ist die Bleizelle für die 50 kN-Zerreißmaschine nur mit einem Kleinmanipulator und einigen Stangengreifern ausgertet.

Die Einrichtungen für die Prüfung der CT50- und CT100-Proben befinden sich in einer gemeinsamen großen Bleizelle. Weitere Einzelheiten sind aus den Abb. 10 bis 14 zu ersehen. Die 2500 kN-Zerreißmaschine ist eine 4-Säulen-Maschine, an deren Traverse im hinteren Teil ein 250 kN-Zylinder zusätzlich befestigt ist. In beiden Prüfeinrichtungen werden die Proben wegen ihres großen Gewichts mit speziellen, pneumatisch angetriebenen Vorrichtungen in die Gehänge eingebracht. Beide Prüfeinrichtungen haben getrennte Temperierkammern. Zur Instrumentierung der Proben vor dem Versuch und der optischen Auswertung der Probenhälften nach dem Bruch ist die Zelle mit den entsprechenden Fenstern und Manipulatoren ausgertet.

Zum Ein- und Ausschleusen der Proben hat die Zelle in der Ostwand eine Schleuse, an die ein Bleitransportbehlter angekoppelt werden kann. Wie aus der Abb. 10 andeutungsweise zu erkennen ist, wurde die Zelle auf dem Dach einer Betonzellenreihe aufgestellt.

### 2.3 $J_{IC}$ -Versuch

-----

Die Bestimmung eines kritischen J-Integralwertes  $J_{IC}$  erfolgt wie der  $K_{IC}$ -Versuch an einer CT-Probe, wie sie in Abb. 6 dargestellt ist. Im Prinzip wird bei der  $J_{IC}$ -Messung die von der Probe in einem quasi-statischen Zugversuch aufgenommene Arbeit bis zum Beginn einer Rißverlängerung gemessen und daraus  $J_{IC}$  berechnet.

Der kritische J-Integralwert  $J_{IC}$  ist ebenso wie  $K_{IC}$  ein Werkstoffkennwert, für dessen Bestimmung eine Mindest-Probengröße erforderlich ist. Nach der ASTM-Norm [7] lautet die Grenbedingung:

$$B \text{ und } W-a \geq 25 \frac{J_{IC}}{\sigma_{f1}}$$

wobei  $J_{IC}$  der gemessene kritische J-Integralwert und  $\sigma_{f1}$  die bei der

Prüftemperatur vorliegende Fließgrenze des Werkstoffs sind. Als Fließgrenze gilt die Mitte zwischen Streckgrenze und Bruchfestigkeit:  $\sigma_{f1} = \frac{1}{2}(\sigma_{0,2} + \sigma_B)$ .

Diese Größenbedingung beinhaltet, daß bei der  $J_{IC}$ -Bestimmung - im Gegensatz zu  $K_{IC}$  - eine relativ größere Zone in der Probe plastisch verformt werden darf. In den Abb. 9 und 15 sind die beim  $K_{IC}$ - und  $J_{IC}$ -Versuch zugelassenen plastischen Zonen vor der Rißspitze näherungsweise angedeutet. In der Praxis bedeutet dies, daß für die  $J_{IC}$ -Bestimmung an bestrahlten oder unbestrahlten Druckbehälterstählen Proben mit einer Dicke von 25 mm, d.h. CT25-Proben, ausreichen.

Die Vorbereitung der CT-Proben für eine  $J_{IC}$ -Bestimmung ist etwas anders als die für eine  $K_{IC}$ -Messung. Der vor der Bestrahlung in die Probe eingebrachte Ermüdungsanriß hat eine Länge von  $a = (0,6 + 0,15/-0,1)W$ . Außerdem haben wir, um die Voraussetzungen für einen ebenen Dehnungszustand im Rißfrontbereich der Probe zu verbessern, die Proben mit Seitenkerben versehen. Die Proben wurden außerdem an der Stirnseite mit vier elektrischen Anschlüssen für die Potentialmessung zur Erfassung des Beginns der Rißverlängerung versehen.

Die  $J_{IC}$ -Bestimmung an einer CT-Probe erfolgt ähnlich wie die  $K_{IC}$ -Messung durch einen Zerreißversuch: Die Probe wird in eine Zerreißmaschine mit Temperierkammer eingespannt, und es wird bei langsam von Null ansteigender Belastung das Last-Rißaufweitungs-Diagramm bis zum Einsetzen einer Rißverlängerung aufgenommen (Abb. 15). Die Maschine kann entweder mit konstanter Rißaufweitungs- oder konstanter Kraftgeschwindigkeit gefahren werden.

Für die Versuchsdurchführung sind zwei x-y-Schreiber erforderlich. Auf dem einen Schreiber wird die an der Lastmeßdose der Maschine gemessene Last gegen die Rißaufweitung in der Lastlinie, gemessen mit dem elektrischen Wegaufnehmer, aufgetragen. Der zweite Schreiber registriert die Potentialänderung an der Probe über die Rißaufweitung. Das Potential hat, wie unsere bisherigen Versuche an verschiedenen Stahlarten zeigten, einen typischen Verlauf mit zunehmender Rißaufweitung, wobei das Potentialminimum den Beginn der Rißerweiterung anzeigt [10].

Abb. 16 zeigt das Schema der elektrischen Meßanordnung für das von uns angewandte Wechselstrom-Potentialverfahren, und Abb. 17 zeigt als Beispiel die an einer Probe aufgenommenen Meßkurven für die Last und die Potentialänderung gegen die Rißaufweitung. Der Zerreißversuch wird kurz nach dem Durchlaufen des Potentialminimums abgebrochen, und die Probe wird bei tiefer Temperatur spröde in zwei Hälften zerbrochen. Anschließend wird an den Bruchflächen optisch die genaue Länge des Ermüdungsanrisses in der Probe vor dem Bruch ausgemessen und der kritische J-Integralwert berechnet:

$$J_{IC} = \frac{A}{B_{net}(W-a)} N\left(\frac{a}{W}\right).$$

( $A = \int_0^{v_i} P dv$  = von der Probe aufgenommene Arbeit bis zum Beginn der Rißerweiterung;  $B_{net}$  = Probendicke B abzüglich 20 % Seitenkerbung; W und a = Probenabmessungen;  $N(a/W)$  = Geometriefunktion, tabelliert in [7]).

Weitere Einzelheiten können der Norm [7] entnommen werden. Das von uns angewandte Wechselstrom-Potentialverfahren zur  $J_{IC}$ -Bestimmung ist eine Einprobenmethode, die uns als besonders geeignet für Untersuchungen an bestrahlten Druckbehälterstählen erscheint, da sie wenig Bestrahlungsraum erfordert und in der Heißen Zelle gut handhabbar ist. Demgegenüber erscheinen uns die in der Norm [7] bisher beschriebenen zwei Methoden\*) für unsere Zwecke weniger geeignet.

Um sicher zu gehen, daß die von uns gemessenen  $J_{IC}$ -Werte nicht zu hoch liegen, d.h. auf der sicheren Seite sind, brechen wir den Zerreißversuch - wie schon oben erwähnt - nach dem Durchlaufen des Potentialminimums unmittelbar ab und überprüfen später an den Bruchflächen der Proben im Rasterelektronenmikroskop, ob beim Versuch eine merkliche Rißerweiterung stattgefunden hat und damit eine zu hohe Arbeit A gemessen wurde. Eine solche Rißerweiterung, hervor-

---

\*) Mehrprobenmethode mit Lastunterbrechung,  
Einprobenmethode mit partieller Entlastung.

gerufen durch stabiles Rißwachstum, ist im REM-Bild der Bruchflächen durch Grübchenstrukturen erkennbar, die sich zwischen dem Ermüdungsanriß einschließlich Stretch-Zone und dem Sprödbereich befinden.

### 3. Ausblick

Die Bruchmechanik beansprucht bzw. hat sich zum Ziel gesetzt, den Belastungszustand eines fehlerbehafteten Bauteils, z.B. eines Reaktor-druckbehälters, quantitativ beschreiben zu können und durch Vergleich mit Werkstoffkennwerten, die im Laborversuch bestimmt werden, den Sicherheitsabstand des Bauteils zahlenmäßig angeben zu können. Soweit sich auf den Druckbehälter die linear-elastische Bruchmechanik anwenden läßt, der Werkstoff hinsichtlich seiner Werkstoffkennwerte keine räumlichen Schwankungen aufweist und als Fehler einfache Einzelrisse vorliegen, kann dieses Ziel als erreicht angesehen werden: Der Belastungszustand in der Umgebung eines einfachen Risses läßt sich über den Spannungsintensitätsfaktor  $K_I$  beschreiben und der kritische Werkstoffkennwert  $K_{IC}$  läßt sich messen.

Insoweit hat die Bruchmechanik daher auch Eingang in das Regelwerk gefunden (s. Abb. 2). Wir bemühen uns, gültige  $K_{IC}$ -Werte für bestrahlte RDB-Werkstoffe nach dem weiter vorn beschriebenen Verfahren möglichst exakt zu ermitteln. Soweit dies wegen unzureichender Probengrößen nicht möglich ist, lassen sich kritische Spannungsintensitätsfaktoren aus  $J_{IC}$ -Werten näherungsweise berechnen:

$$K_{IC} \approx K_{Ji} = \sqrt{\frac{J_{IC} \cdot E}{1 - \nu^2}}$$

(E = Elastizitätsmodul;  $\nu$  = Poisson'sche Querzahl).

Dieses Näherungsverfahren ist allerdings nicht unbestritten und muß durch weitere Untersuchungen auf seinen Zulässigkeitsbereich geprüft werden.

Wenn man die eingangs genannten Voraussetzungen der Sicherheitsanalyse laut Regelwerk mit den realen Zuständen und Belastungen eines Reaktordruckbehälters vergleicht, erkennt man, daß bisher nur ein geringer Teilbereich durch die Bruchmechanik abgedeckt ist. Weite Bereiche, die sich pauschal mit den Ausdrücken Fließbruchmechanik und plastisches Versagen kennzeichnen lassen, werden zur Zeit noch durch summarische und mehr oder weniger auf Empirie beruhende Sicherheitsaufschläge abgedeckt. Für diese Bereiche müssen quantitative Beschreibungsmethoden des Belastungszustandes, geeignete Werkstoffkennwerte und Methoden zu ihrer Messung im Laborversuch gefunden oder weiterentwickelt werden. Sobald hierüber eine gewisse Klarheit herrscht, können dann der Einfluß der Bestrahlung auf diese Kennwerte untersucht werden.

Literatur:

- [1] Steele, L.E.; Neutron irradiation embrittlement of reactor pressure vessel steels. IAEA Technical Report Nr. 163, Wien 1975.
- [2] ASME-Code, Section III, Appendix G.
- [3] Dorner, H.; Die Betriebssicherheit von Reaktordruckgefäßen. Atomwirtschaft, März 1974, S. 120-125.
- [4] Stahl-Eisen-Prüfblatt 1325 (12/79): Fallgewichtsversuch nach W.S. Pellini.  
ASTM E208-69: Standard method for conducting drop-weight test to determine nil-ductility transition temperature of ferritic steels.
- [5] DIN 50 115(02/75): Kerbschlagbiegeversuch.  
ASTM E23-78: Standard methods for notched bar impact testing of metallic materials.
- [6] ASTM E399-72: Standard test method for plain-strain fracture toughness of metallic materials.
- [7] ASTM E813-81: Standard test for  $J_{IC}$ , a measure of fracture toughness.
- [8] Bellmann, D.; Anpassung von  $A_V$ -T-Kurven mit dem Gaussintegral. Technische Notiz WV 79/5. GKSS, 1979.
- [9] Müller-Roos, J. und Richter, G.; Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch - Ein Beitrag zur Untersuchung des Bruchverhaltens von Stählen, GKSS-Jahresbericht 1979. S. 35-45.  
Müller-Roos, J.; Kerbschlag - Ein Programm zur Auswertung von instrumentierten Kerbschlagbiegeversuchen. GKSS 80/I/11, 1980.
- [10] Schmelzer, F., Schmitt, F.J. und Spalthoff, W.;  
Crack initiation detection using the alternating current potential drop method.  
GKSS-Bericht, in Vorbereitung.

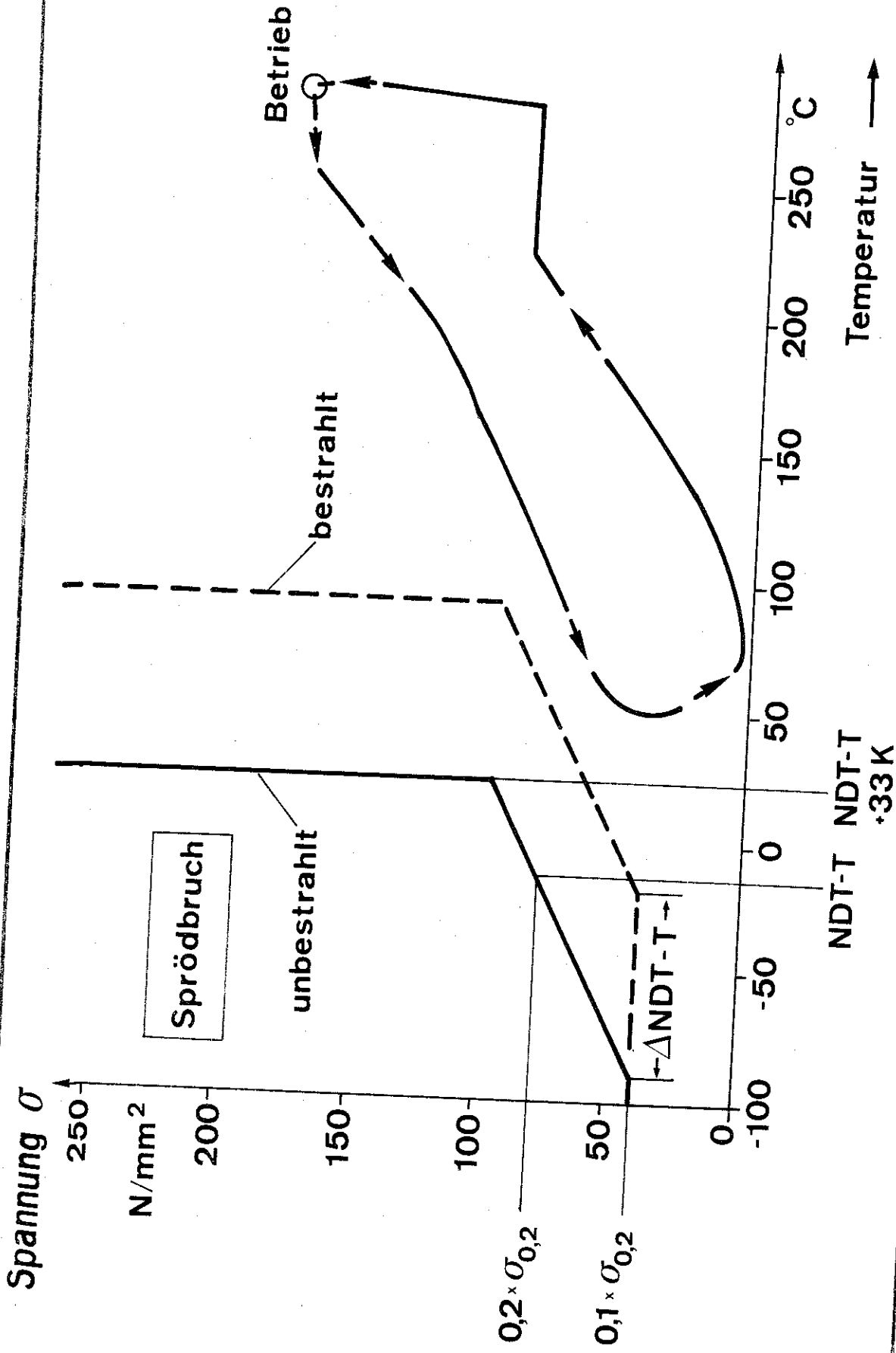


Abb. 1

IfW/WE

Porse - Diagramm



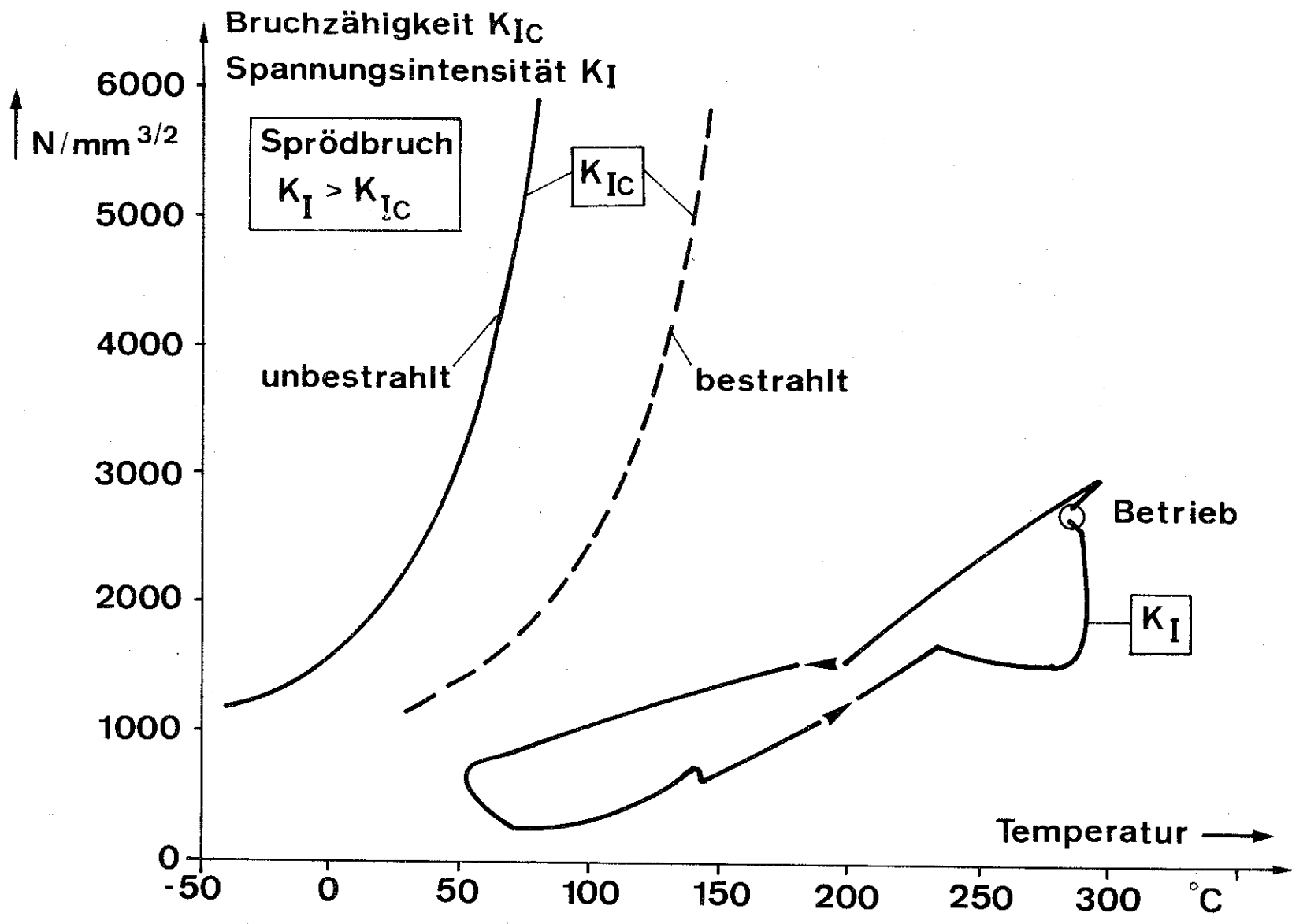


Abb. 2

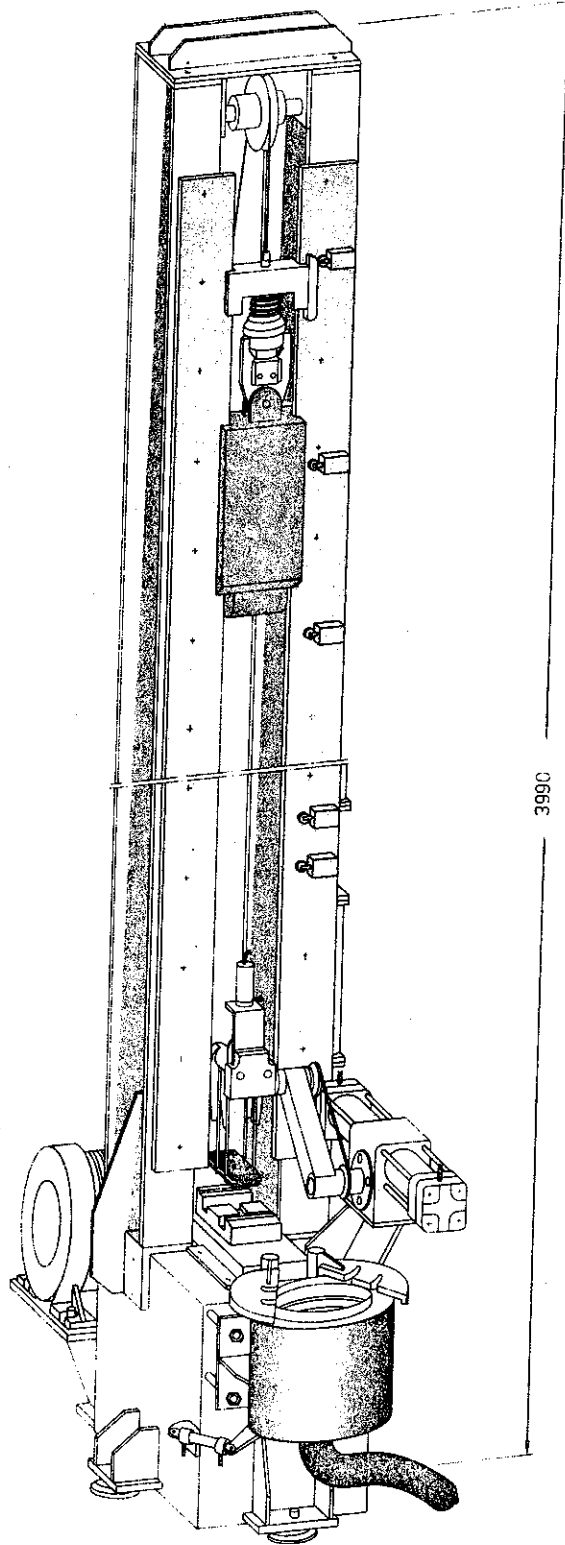
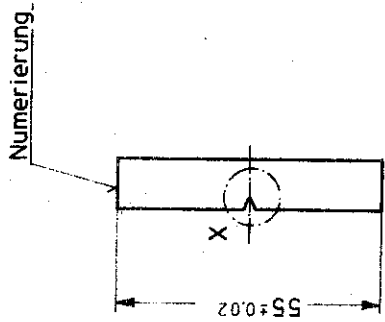
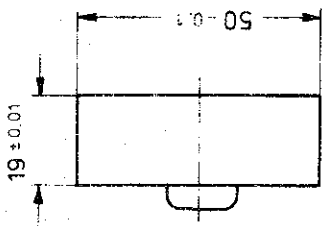


Abb. 3

## Fallgewichtsmaschine

IfW/WE

**GKSS**  
FORSCHUNGSZENTRUM GEESTHACHT GMBH



V-Kerb nicht entgratet

Einzelheit X

M 10:1

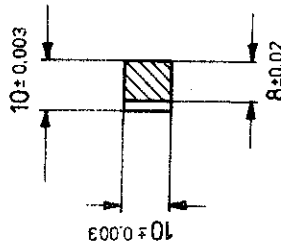
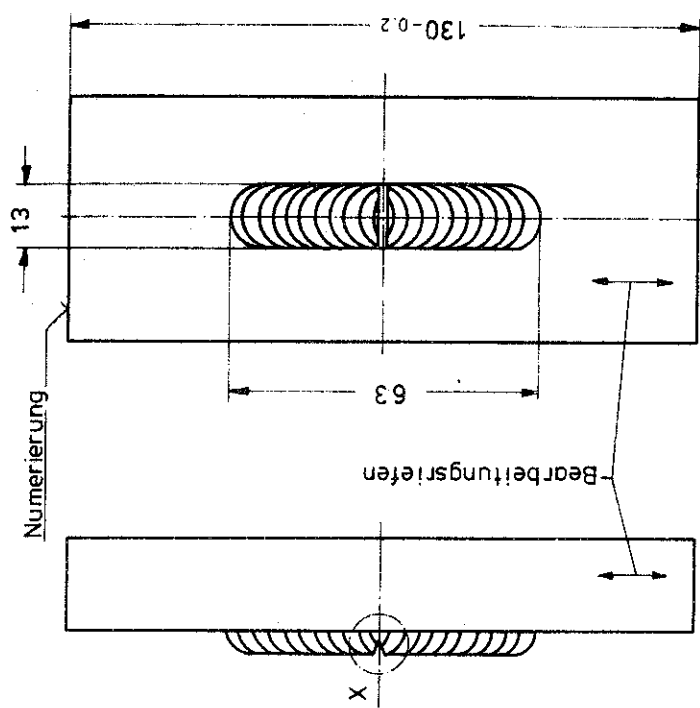


Abb. 4

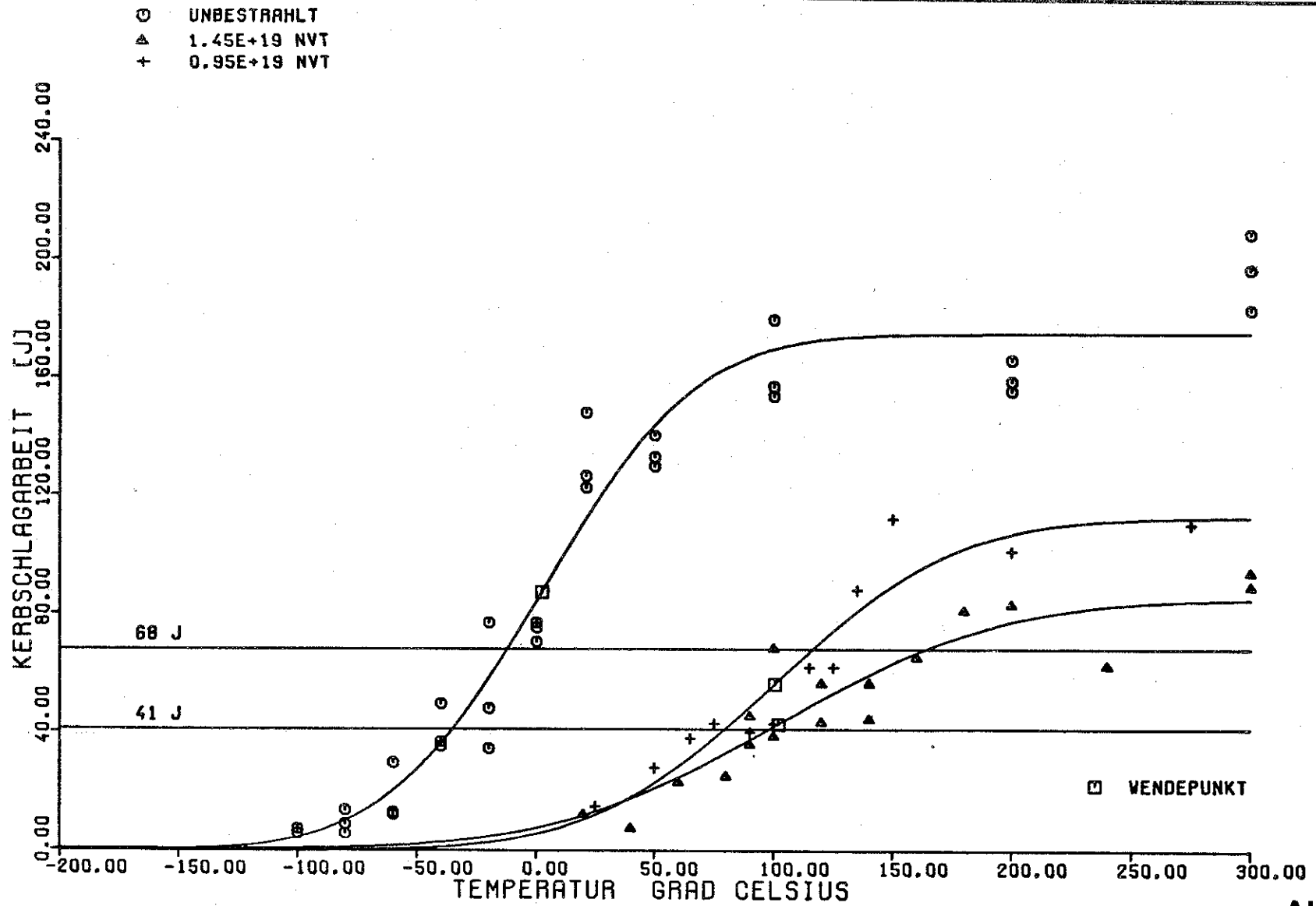
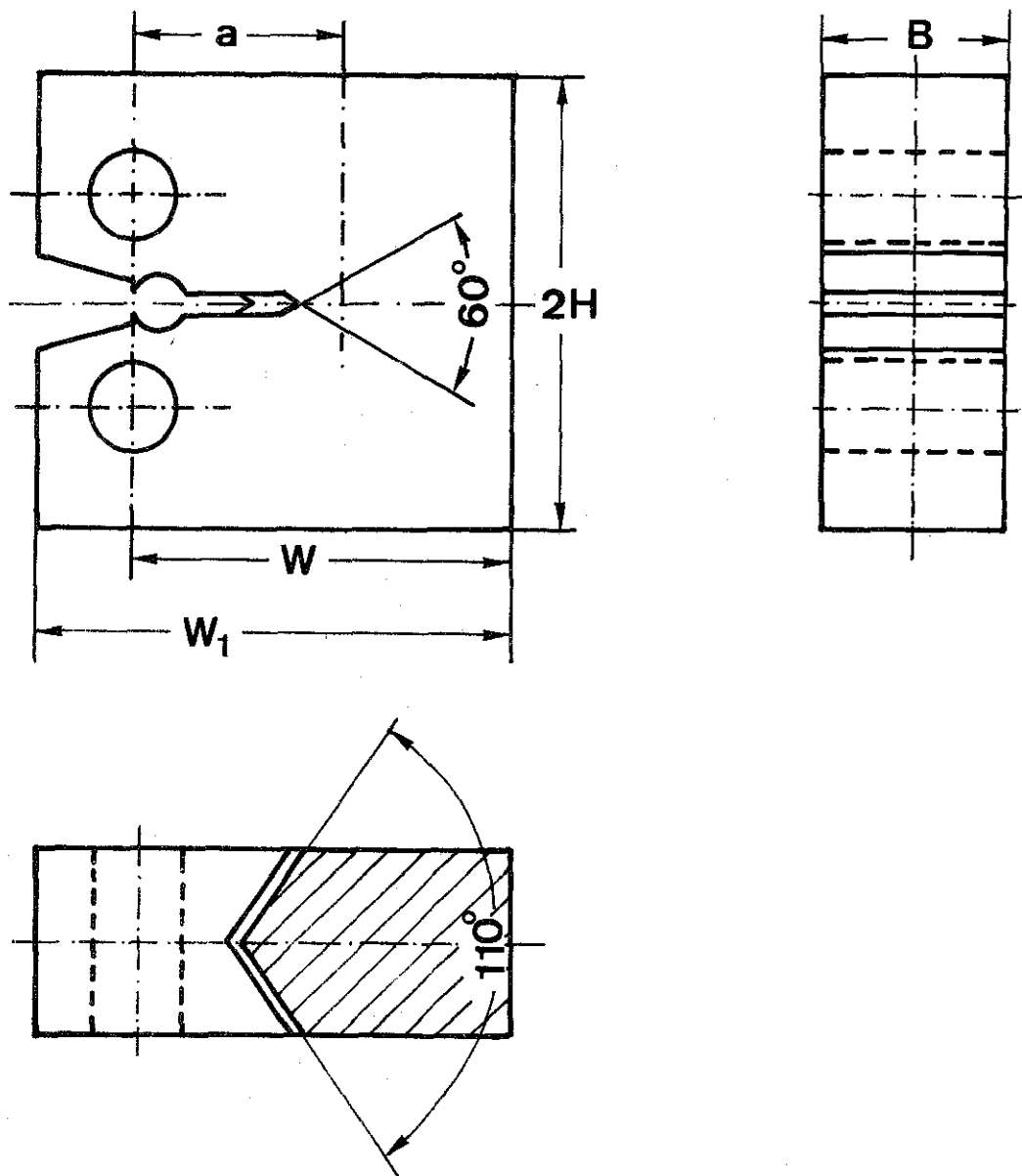


Abb. 5

IfW/WE

Kerbschlagbiegeversuch, SG 22NiMoCr37

**GKSS**  
FORSCHUNGSZENTRUM GEESTHACHT GMBH



	CT 25	CT 50	CT 100
B	25 mm	50 mm	100 mm
W	50 $\hat{=}$	100 $\hat{=}$	200 $\hat{=}$
W <sub>1</sub>	62,5 $\hat{=}$	125 $\hat{=}$	250 $\hat{=}$
2H	60 $\hat{=}$	120 $\hat{=}$	240 $\hat{=}$
a	~25 $\hat{=}$	~50 $\hat{=}$	~100 $\hat{=}$

Abb. 6

CT - Probe

IfW/WE

**GKSS**  
FORSCHUNGSZENTRUM GEESTHACHT GMBH

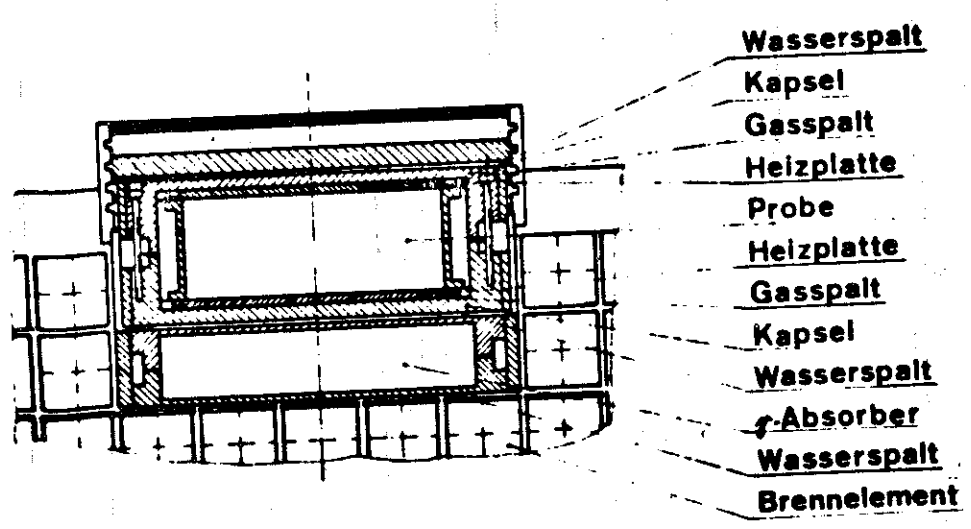
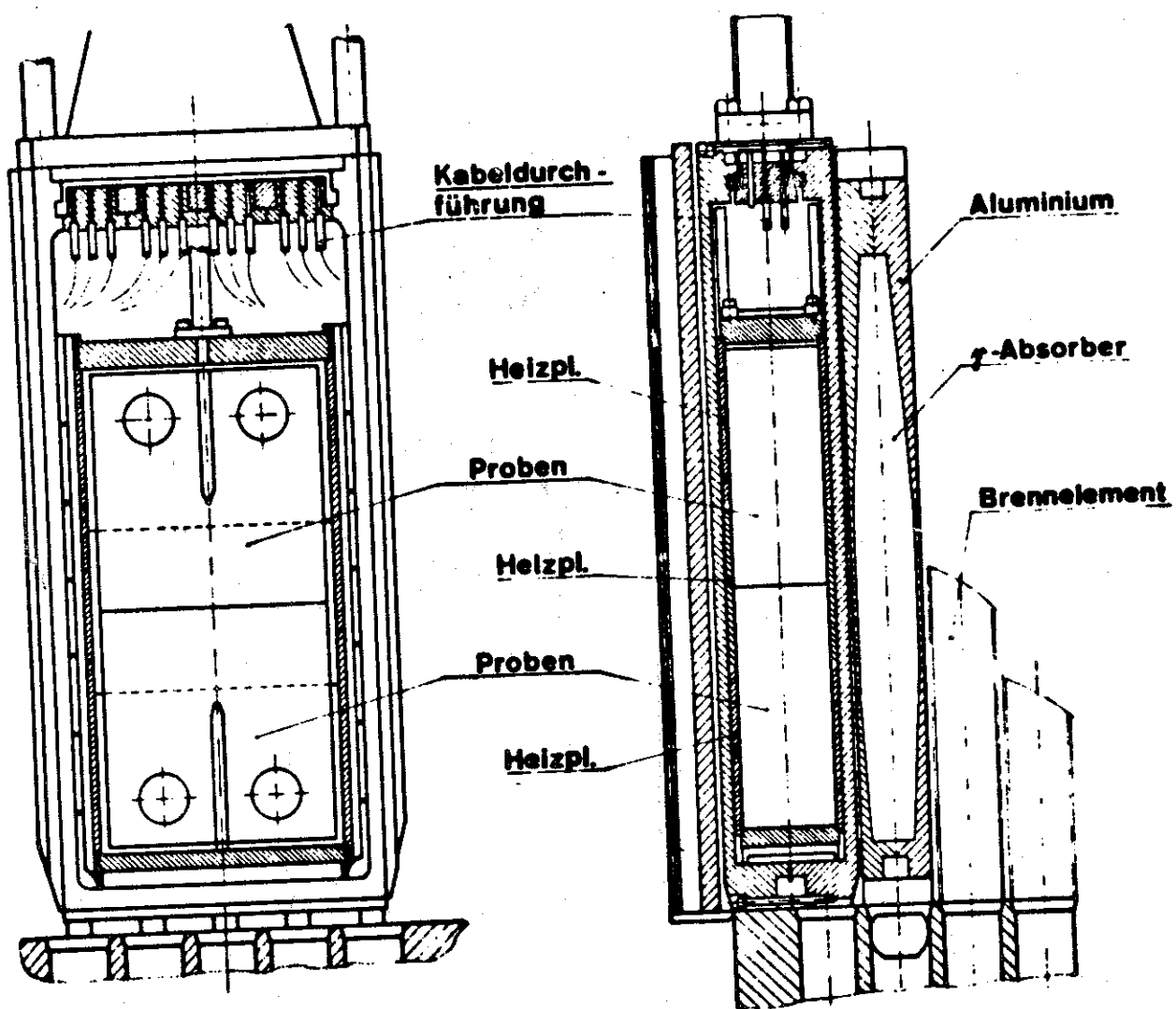
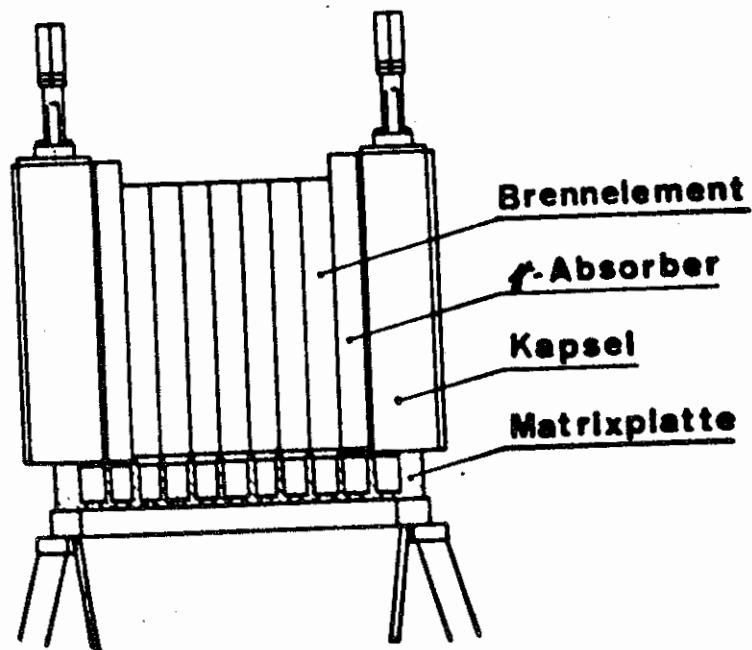


Abb. 7

GKSS

Kapsel CK 100

IfW/WV  
2.2



FRG 2

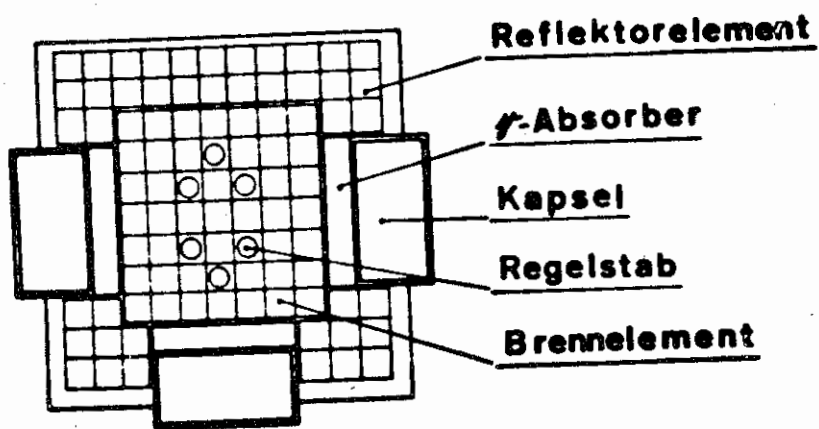


Abb. 8

<b>GKSS</b>	<b>Kapselanordnung</b>	<b>IfW/ WV</b>
		<b>2.3</b>

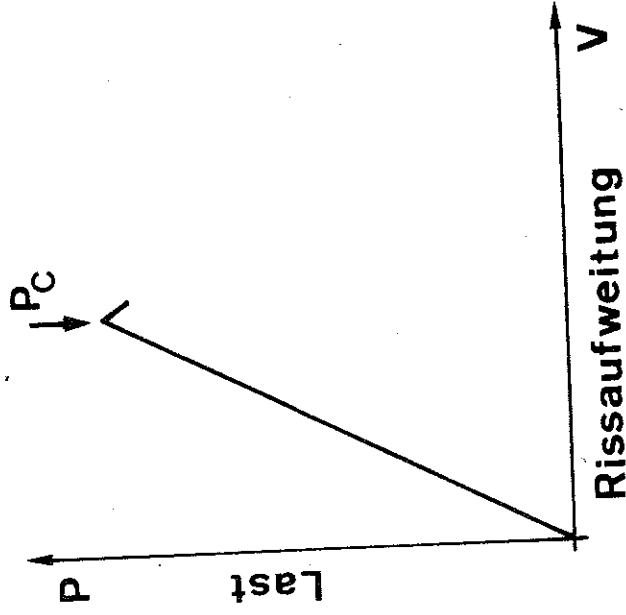
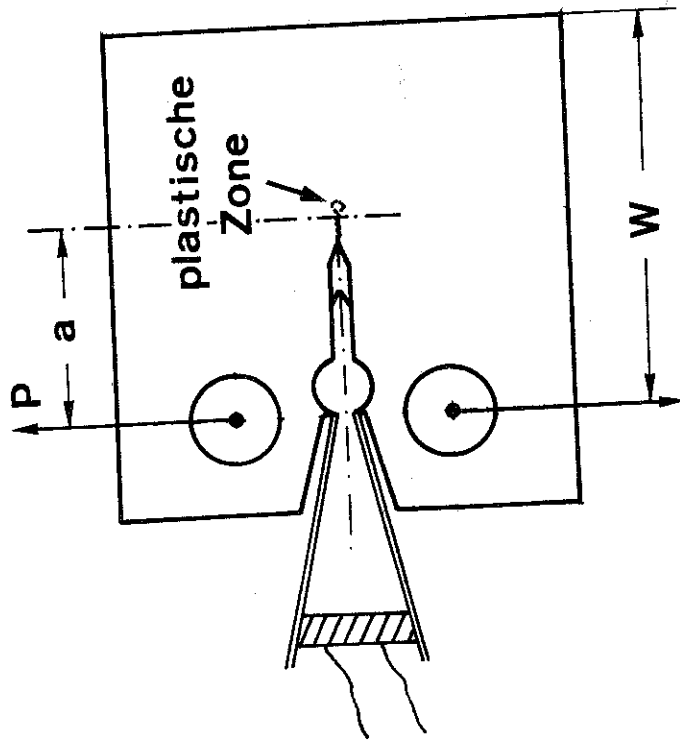


Abb. 9

$K_{Ic}$  - Versuch

IfW / WE



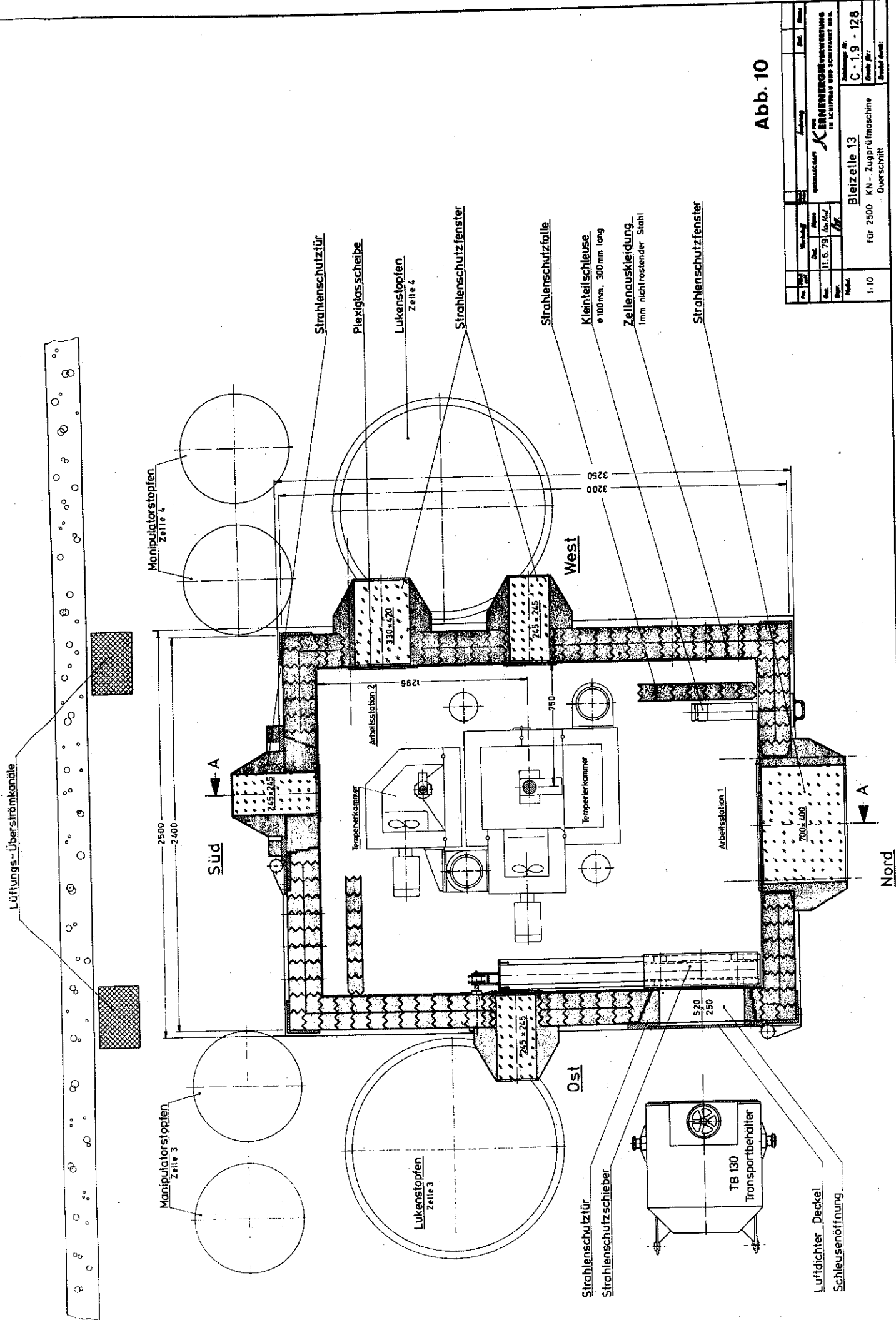


Abb. 10

Pos.	Bezeichnung	Menge	Einheit	Abt.	Abt.
1	Bleizelle 13	1	Stück		
2	für 2500 KN - Zugprüfmaschine				
3	Überschnitt				

KERNENERGIE-UNTERSUCHUNG IN SCHEIBEN UND SCHWIMMSTÄBE	
Zählrohr Nr.	C-19 - 128
Dauer Nr.	
Einheit Nr.	
Einzel-Nr.	
1:10	

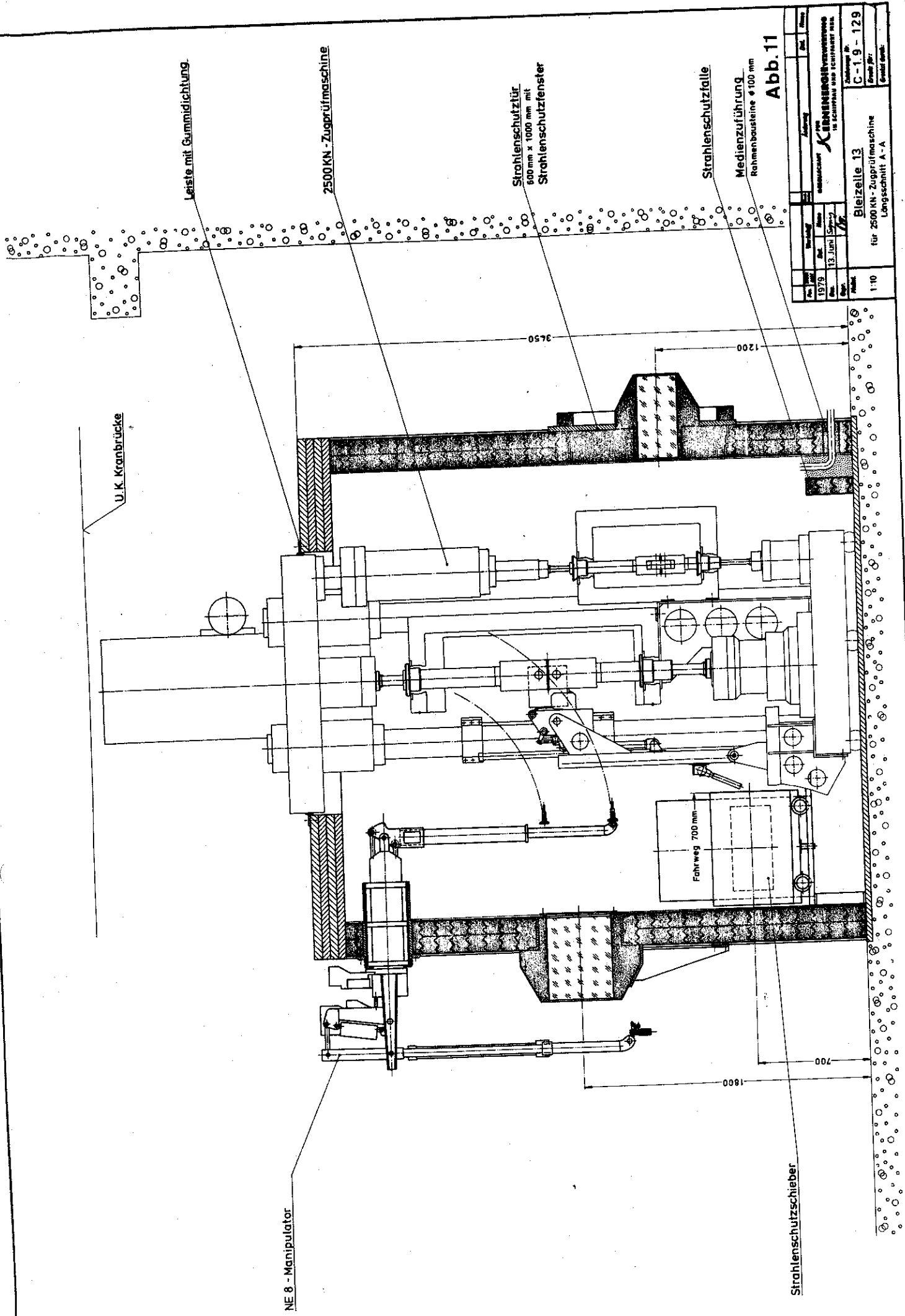


Abb. 11

1979 13. Juni 1:10		Zeichnung Nr. <b>C-19-129</b>
Bleizelle 13 für 2500 KN - Zugprüfmaschine Längsschnitt A - A		Gezeichnet von: 1:10
<b>KERNINGHOFF</b> IN SCHRIFT UND TECHNISCHER ZEICHNUNG		

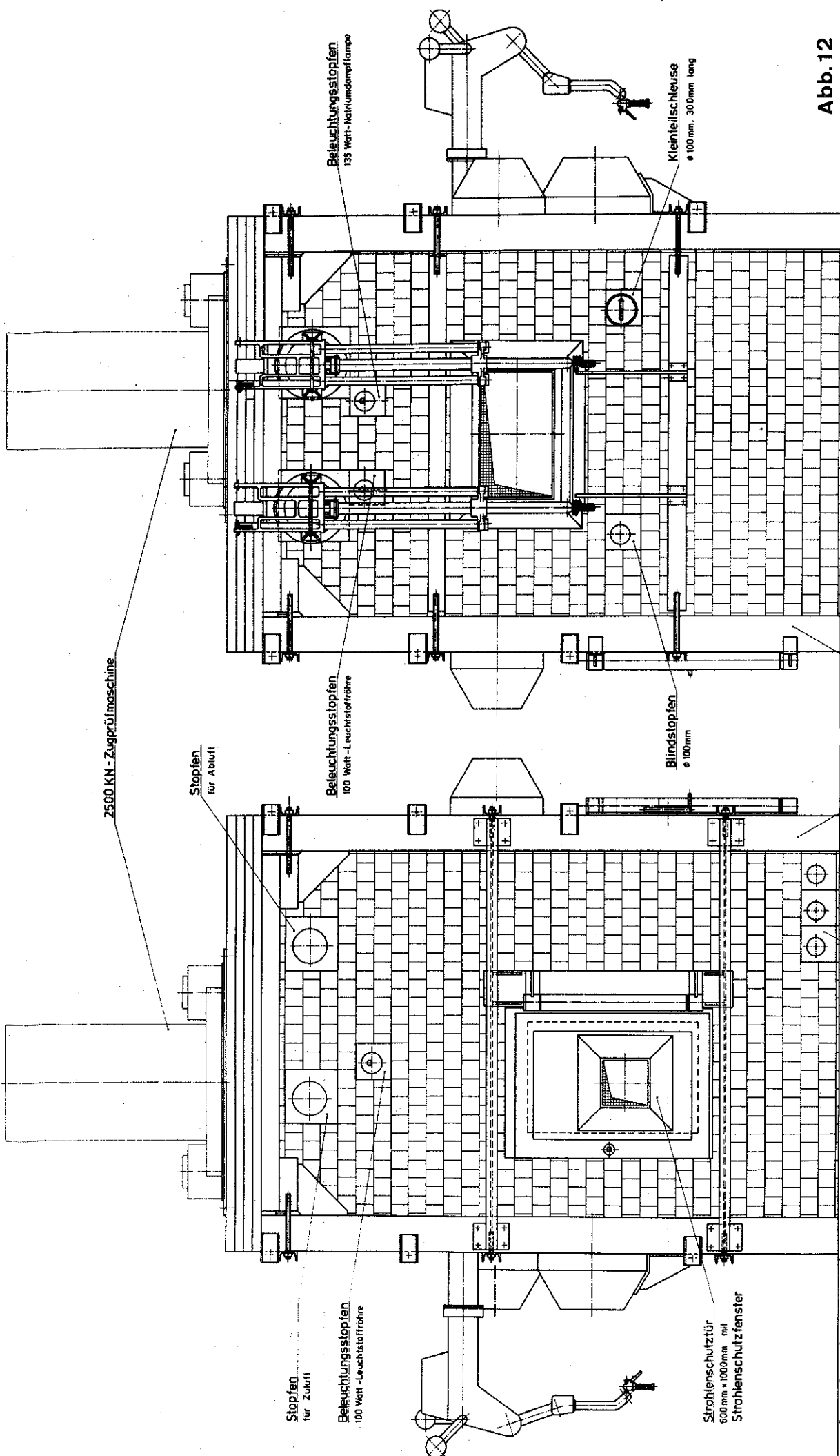
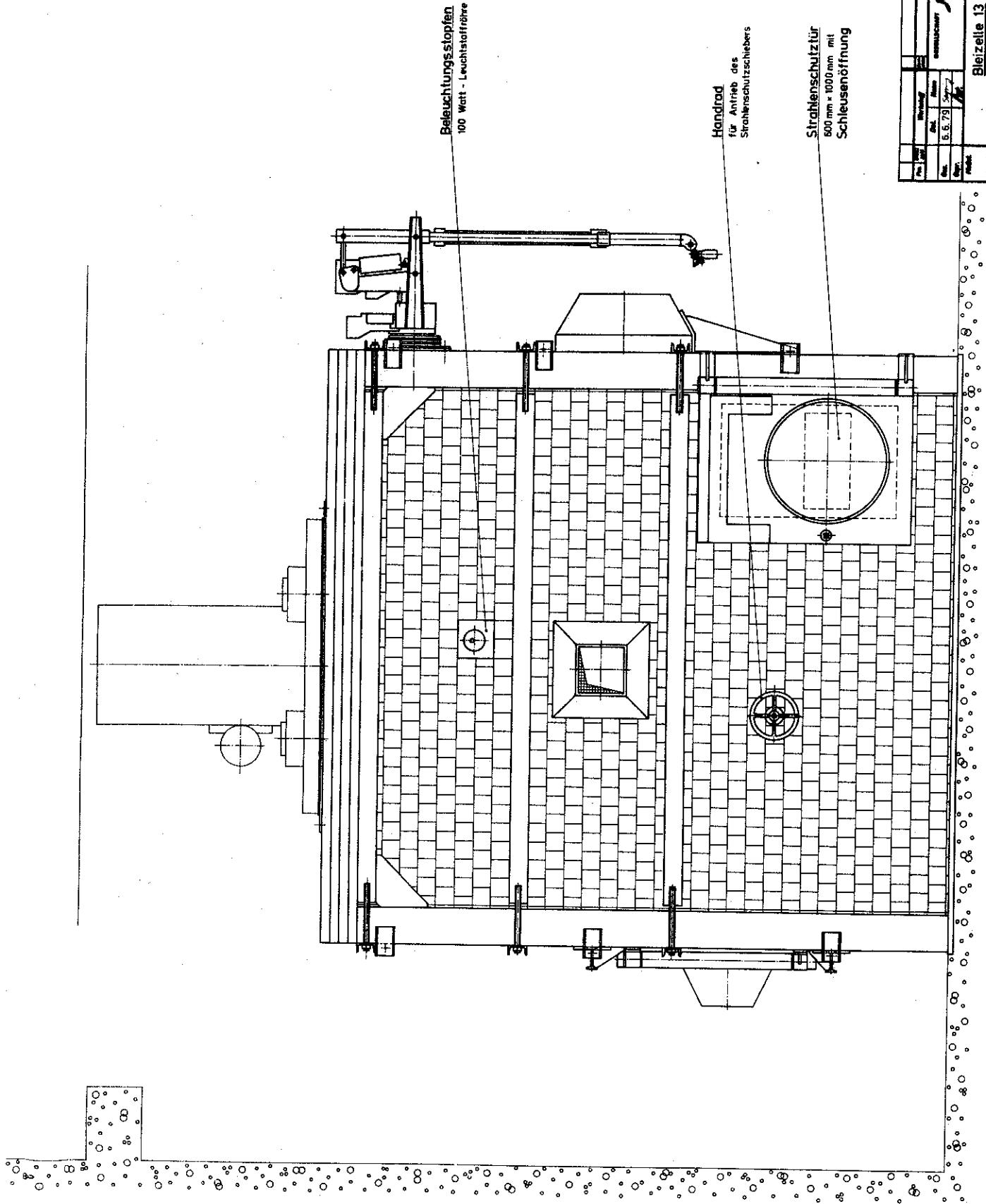


Abb. 12

Proj. Nr.	Verf. Nr.	Blatt	Zahl	Blatt
<b>KEMMERSCHWEISSWERKE</b> in Schwanau bei Schwetzingen				
<b>Bliezzelle 13</b> für 2500 KN-Zugprüfmaschine Nord- und Südseite				
C - 1.9 - 130				
1:10				

Nord

Süd



Beleuchtungsstopfen  
100 Watt - Leuchtstoffröhre

Handrad  
für Antrieb des  
Strahlenschutzschiebers

Strahlenschutztür  
800 mm x 1000 mm mit  
Schiebenöffnung

Abb. 13

Zustand		Anfertigung		Prüfung	
Gezeichnet		Gezeichnet		Geprüft	
Datum	5.6.79	Datum		Blatt	1/1
<b>KERNENERGIEUNTERSUCHUNG</b> IN SCHIFFAU UND SCHIFFAUER WERK					
<b>Bleizelle 13</b> für 2500 KN-Zugprüfmaschine Gesamtansicht				Zeichnung Nr. <b>C-19 - 131</b> Blatt Nr. (weiter folgen)	
Maßstab: 1:30					

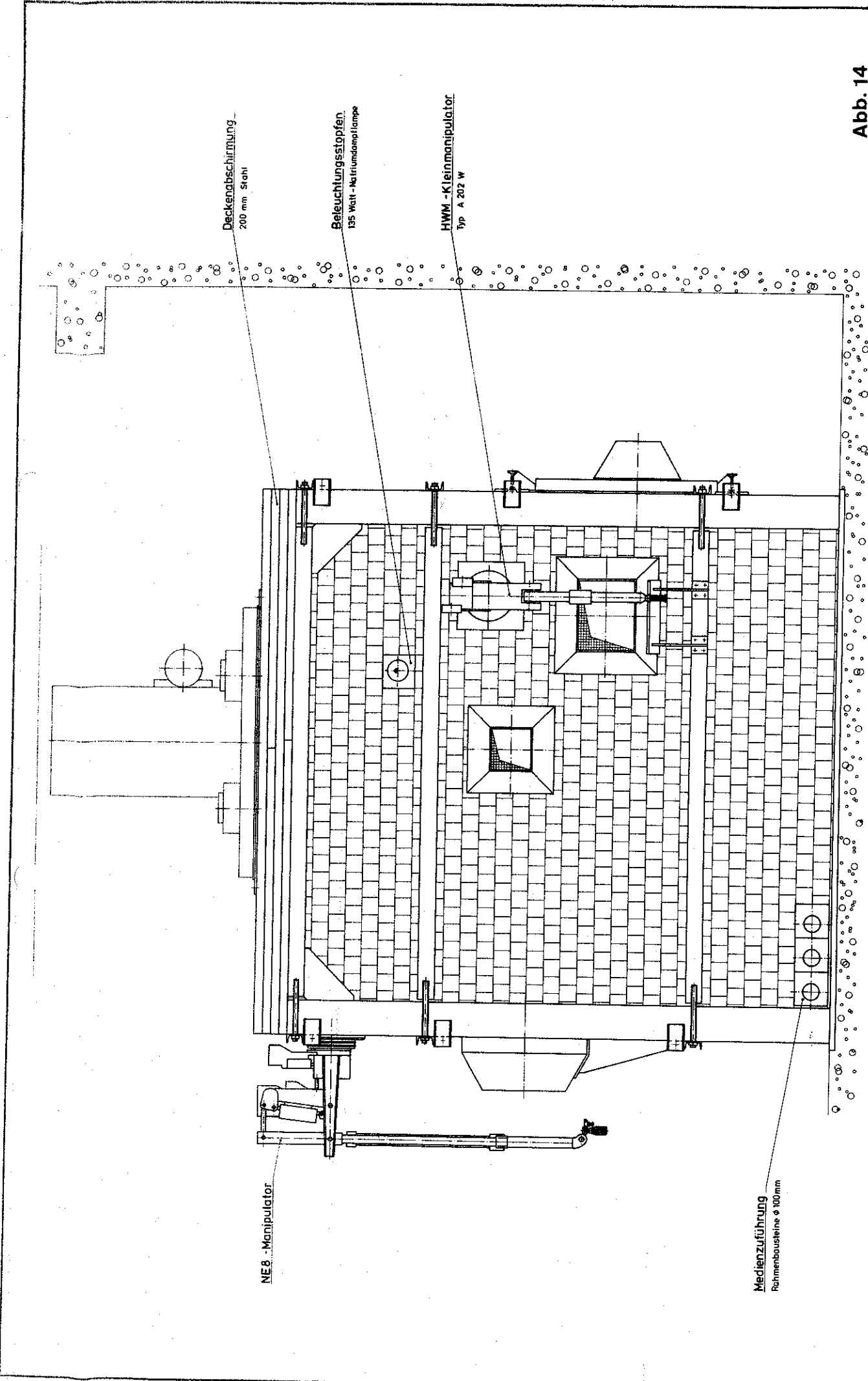


Abb. 14

Pro. Nr.	Verf.	Gepr.	Techn. Zeich.	Abg.	Zus.	Ausg.
FIRMENSCHIEDLICHKEIT				KIRCHENSCHIEDLICHKEIT		
VERBODEN						
FÜR SCHIFFHAFEN UND SCHIFFFAHRT WIRA						
Zeich. Nr.		Blatt Nr.				
6.6.79		C-19-132				
0.0.0.0						
0.0.0.0						
1:10						
Bleizelle 13						
für 2500KV - Zugprüfmaschine						
Westensicht						

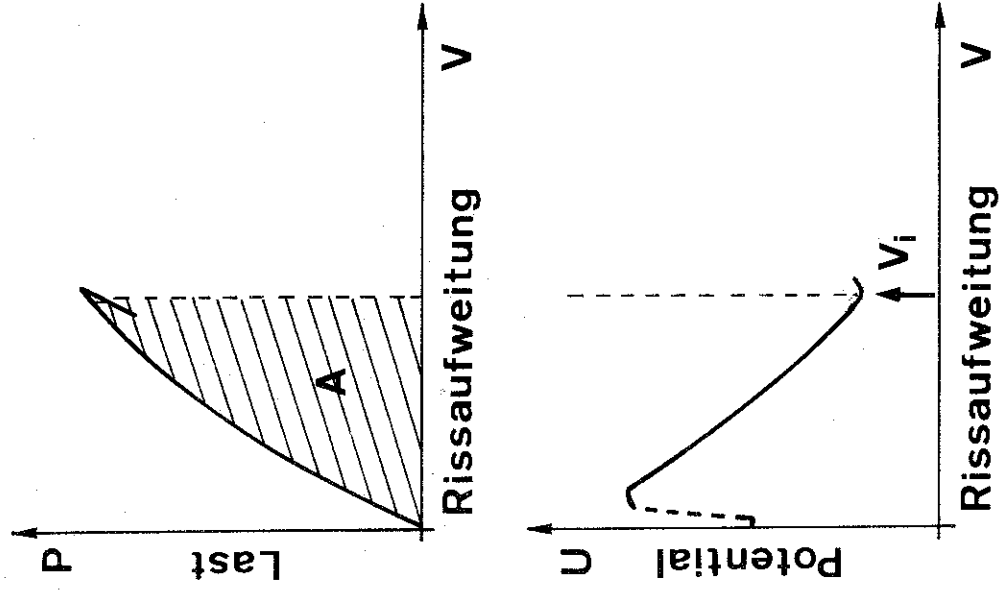
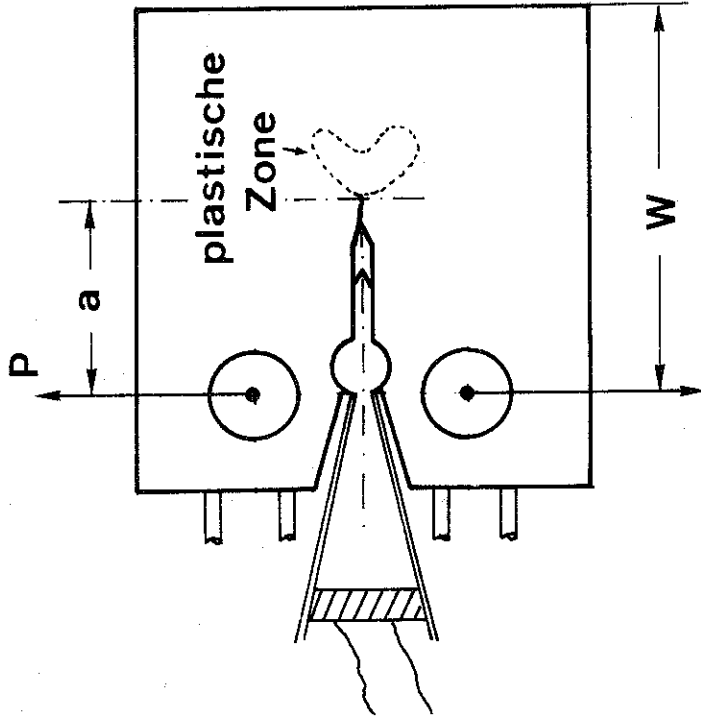


Abb. 15

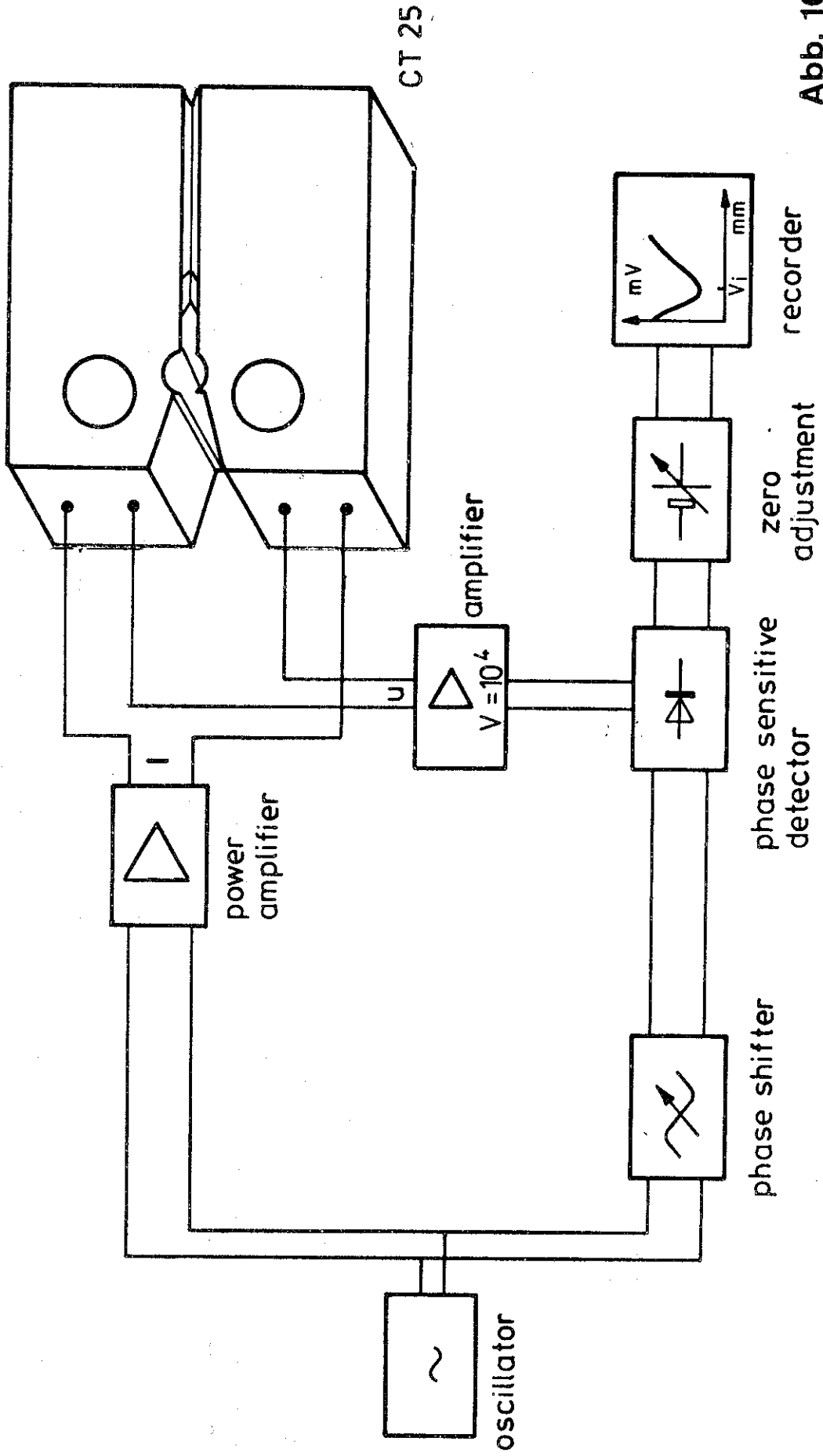


Abb. 16

ac potential drop method  
with CT - specimen

**GKSS**  
FORSCHUNGSZENTRUM GEESTHACHT GMBH

IfW/ WE

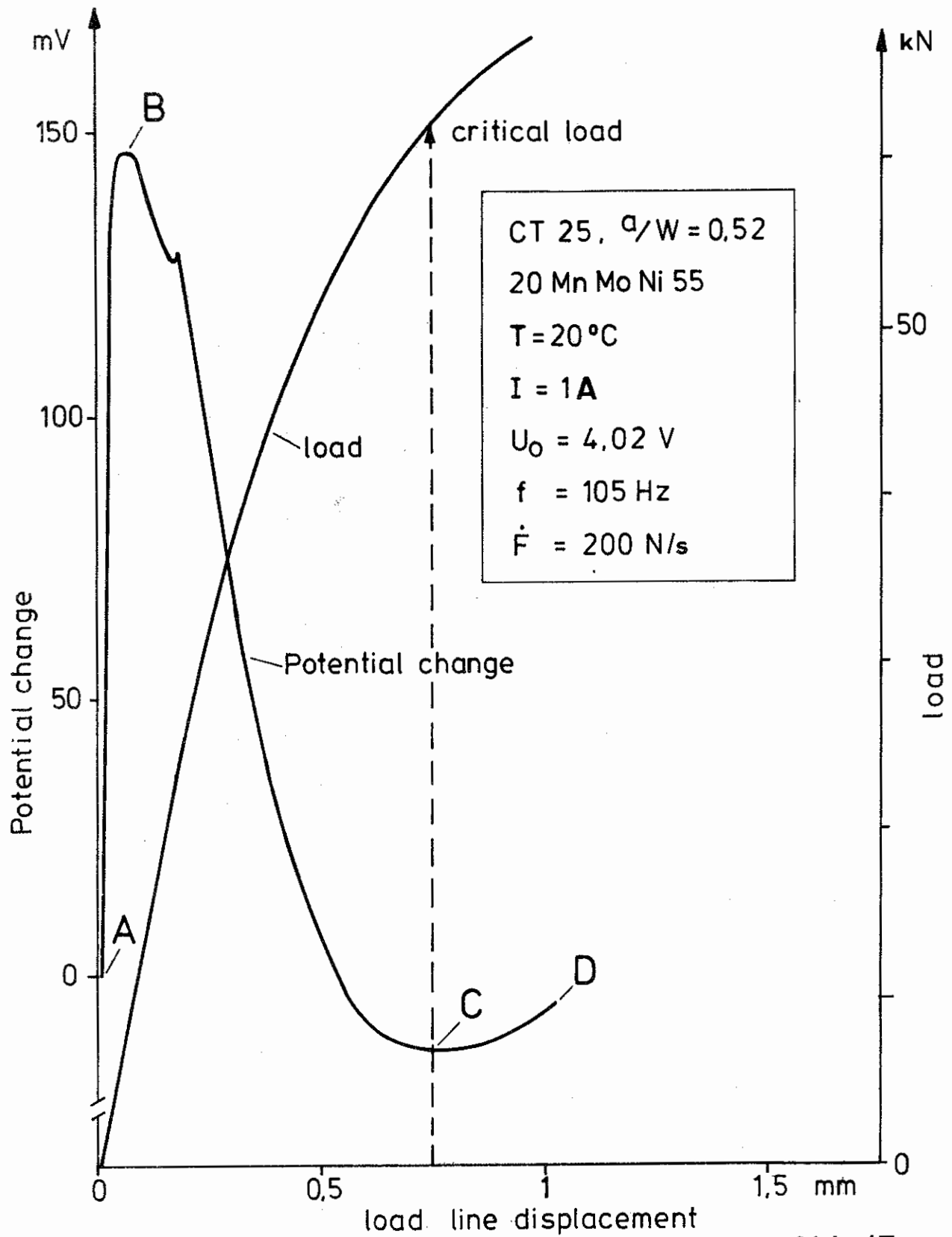


Abb. 17

Test record, ac potential drop method

IfW/WE

**GKSS**  
 FORSCHUNGSZENTRUM GEESTHACHT GMBH