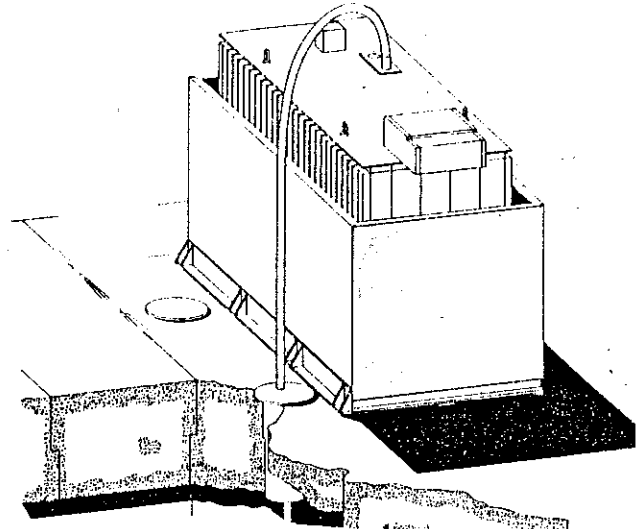


A 12

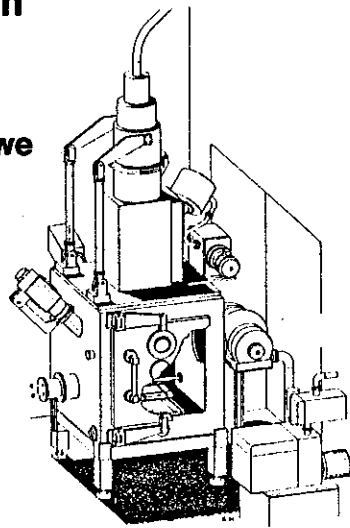
Forschungszentrum Jülich GmbH (KFA)
- Heisse Zellen -



**Elektronenstrahlanlage zur Untersuchung
des Thermoschockverhaltens von
radioaktiven Proben**

von
G. Pott , R. Duwe

IRW-IB-5/93
Mai 1993



Working Group "Hot Laboratories and remote handling"
Chinon (France) , 15./16. June 1993

1. Einführung

Für Fusionsanlagen werden Materialien für die erste Wand und für Divertoren sowie Divertorkomponenten benötigt, die trotz großer Temperaturgradienten und trotz einer schnellen Folge von Temperaturzyklen ihre Formbeständigkeit und Integrität behalten. Materialien dieser Art sind keramische Werkstoffe wie Graphit, CFC, Aluminium-Oxyde, Beryllium und Beryllium-Oxyde sowie Molybdän, Molybdän-Legierungen oder ähnliche Metalle. Durch hochenergetische Neutronen werden diese Materialien zum einen aktiviert, zum anderen treten mit zunehmender Neutronendosis Veränderungen der mechanischen Eigenschaften auf. Belastungstests und Werkstoffprüfungen erfordern daher besondere Abschirmmaßnahmen gegen radioaktive Strahlung solcher Proben. Eine der wichtigsten dieser Belastungstests sind Thermoschock-Prüfungen, die durch Ionenstrahl, Laserstrahl oder - wie im nachfolgenden Fall beschrieben - mittels Elektronenstrahl erzeugt werden.

2. Allgemeine Beschreibung (Abb. 1)

Die in den Heissen Zellen installierte Anlage besteht aus folgenden wichtigen Komponenten:

- Vakuumkammer mit Probenhaltersystem
- Elektronenstrahlkanone
- Vakuum-System
- Stromversorgung über Trafo
- Steuerschränke und Steuerstand
- Diagnose-Systeme
- Kühlkreislauf für Experimente

Die bei KFA Jülich aus 25 mm dicken Edelstahlblechen gefertigte Vakuumkammer hat ein Volumen von ca. $0,430 \text{ m}^3$ und ist so in der Heissen Zelle angeordnet, daß von der Bedienungsseite her die zu untersuchenden Proben eingebaut werden können. Da die Zelle auch auf der Rückseite Fenster und Manipulatoren hat, ist die Anlage von allen Seiten her zu bedienen. Vakuumstutzen an 3 Seiten gestatten das nachträgliche Einbringen von Komponenten, Meßsystemen bzw. das Anbringen von Beleuchtung, Video- und Infrarotkamera.

Für die Montage der Testproben (Abb. 2) ist in erster Linie ein in x/y-Richtung verfahrbarer Kreuztisch mit außenliegenden Antrieben in der Kammer montiert. Beladen wird der Probenhalter von der Frontseite der Kammer über ein 660 mm x 660 mm großes Tor. In die Tür eingesetzt ist ein sogenannter "Anfahrblock", ein mit Wasser gekühlter Kupferblock, auf dem der Elektronenstrahl auf Leistung gefahren wird, bevor er die Probenfläche abrastert. Weiterhin kann eine aktiv gekühlte Probe z.B. ein Divertorelement (Abb. 3) durch einen seitlichen Kammerflansch von ca. 140 mm ϕ eingesetzt werden. Dieses Element muß so vormontiert werden, daß die Vakuumkammer über den Seitenflansch wieder dicht verschlossen wird und flexible Kühlschläuche fernbedient angekoppelt werden können. Der Kühlkreislauf (Abb. 4) ist für einen Kühlmitteldurchfluß von 5 m³/h und einem Druck von maximal 40 bar ausgelegt, um 40 kW im Dauerbetrieb abführen zu können. Eine Hochdruckpumpe fördert das Kühlwasser zur Probe in der Vakuumkammer. Dabei werden Durchflußmenge, Temperatur und Druck gemessen. Das in der Strahlanlage erhitzte Wasser wird noch in der Heissen Zelle auf weniger als 5 bar entspannt und fließt in einen Vorratsbehälter. Aus diesem Reservoir wird das Kühlwasser angesaugt und wird, bevor es in die Hochdruckpumpe gelangt, in einem Wärmetauscher abgekühlt. Die aus der Versuchsanordnung abgeführte Leistung wird kalorimetrisch durch Volumenstrom und Temperaturdifferenzmessung ermittelt.

3. Strahlanlage (Abb. 5)

Die Elektronenstrahlkanone ist oberhalb der Vakuumkammer angeordnet. Die Elektronen werden von einer direkt geheizten Wolfram-Bandkathode emittiert, durch eine Steuerelektrode elektrostatisch gebündelt und durch eine Anode beschleunigt. Bei einer maximalen Beschleunigungsspannung von 150 kV und Verwendung einer 60 kW Stromversorgung fließt ein Strahlstrom von maximal 400 mA. Durch ein besonders ausgebildetes Ventil besteht die Möglichkeit, die Elektronenstrahlkanone von der Vakuumkammer zu trennen, um bei Arbeiten an der Kammer das Vakuum von $< 10^{-5}$ mbar im Strahlerzeugungssystem aufrecht zu erhalten. Unterhalb dieses Schiebers befinden sich 2 weitere Spulen, von denen eine die Strahlform (fokussiert oder defokussiert) regelt, die zweite den Strahl in x-y Richtung ablenkt. Die räumliche

Anordnung und die vorhandene Ablenkfrequenz von bis zu 100 kHz gestattet eine Fläche von 10 cm x 10 cm abzurastern und eine quasi-flächige Energieeintragung zu gewährleisten.

Kurzzeitige Impulse (bis 100 ms) erhalten ihre Energie aus einem aufgeladenen Kondensator, wobei der Impulsanstieg und -abfall 100 μ s beträgt. Bei längeren Impulsen muß die Leistungszufuhr über den Hochspannungstransformator geregelt werden, wobei die Zeitkonstante für die Regelung 400 ms beträgt, um insbesondere bei Impulsabschaltung eine induzierte Überspannung zu vermeiden. Die Einstellung der Strahlparameter kann sowohl manuell als auch automatisch über eine programmierbare Steuerung erfolgen. Die automatische Steuerung ist insbesondere dann notwendig, wenn eine bestimmte Impulsfolge gefahren werden soll.

Der vorab erwähnte Hochleistungstransformator wurde auf dem Zellendach installiert und ist über ein Hochspannungskabel von ca. 120 mm ϕ mit der Elektronenstrahlkanone verbunden.

Sämtliche elektrischen Steuerelemente, die Niederspannungsversorgungen für Elektronenstrahlkanone und für das Vakuumsystem einschließlich Registriereinrichtungen für die Kreislaufsysteme sind in Steuerschränken im Bedienungsgang der HZ aufgestellt. Das für den Betrieb der Anlage notwendige Steuerpult befindet sich im Bereich des Zellenfensters.

4. Diagnostik

Zur Messung und Beobachtung von Oberflächentemperaturen sowie Materialveränderungen sind folgende Diagnosegeräte installiert:

4.1 *Infrarot-Pyrometer zur punktförmigen Erfassung der Temperatur von 200 - 1100 °C*

Es handelt sich um ein Einfarbenpyrometer, bei dem der entsprechende Emissionsfaktor materialabhängig eingestellt werden muß. Bei der vorgegebenen Kammerdimension beträgt der Meßabstand 70 cm und der Meßfleckdurchmesser 3 mm. Das Pyrometer reagiert sehr empfindlich auf Fensterverunreinigungen (Bedampfung).

4.2 Infrarot-Pyrometer für den Temperaturbereich von 1000 - 3500 °C

Das Pyrometer arbeitet auf dem Zweifarbenprinzip und hat damit den Vorteil, durch Fensterverunreinigungen nicht beeinflusst zu werden. Der Meßfleckdurchmesser beträgt ebenfalls 3 mm. Die Ansprechzeit des Pyrometers beträgt 10 ms, so daß Kurzimpulse im ms-Bereich mit diesem Gerät nicht erfaßt werden können.

4.3 Infrarot-Hochtemperaturkamera mit einer Aufnahme Frequenz von 25 Bildern/sec in Videotechnik im Temperaturbereich ≥ 800 °C

Die IR-Kamera arbeitet im nahen Infrarotbereich ($\lambda = 950$ nm) und basiert auf handelsüblicher VHS-Videotechnik. Sie ist angeschlossen an einen PC mit Bildprozessorkarte, über den mit entsprechendem Programm aus dem Graustufenbild eine Falschfarbendarstellung mit Temperatureichung erstellt werden kann. Die Blendenverstellung sowie die Verschlusssteuerung sind fernbedient möglich.

4.4 Videokamera zur visuellen Kontrolle eines Tests

Die Videokamera in VHS-Technik ist mit einem fernsteuerbaren Zoomobjektiv ausgerüstet, zusätzlich kann die Kamera horizontal und vertikal geschwenkt werden, um Objekteinzelheiten zu erfassen.

4.5 Restgasanalysator

Der Restgasanalysator besteht aus einem direkt an die Kammer angeflanschten Quadrupolmassenspektrometer, mit dem gasförmige Stoffe der Massen 1-100 gemessen werden können, die bei den thermischen Belastungstests freigesetzt werden. Hier sind von besonderem Interesse z.B. Feuchte oder Kohlenwasserstoff.

4.6 Datalogger für z.B. Thermoelemente

Die Messung von Temperaturen in den Proben oder im Kühlwasser wird durch Thermoelemente ermöglicht, die durch ein PC-gesteuertes Dataloggersystem abgefragt werden. Zusätzlich

können Elektronenstrahlraten sowie Kühlwasserparameter z.B. Durchflußmenge erfaßt und ausgewertet werden.

Die Charakterisierung der Probenoberflächen vor und nach dem Test kann mit den vorhandenen metallografischen Untersuchungsmethoden in den Heissen Zellen durchgeführt werden, insbesondere mit einem in eine Heisse Zelle eingebauten Mikroskop für radioaktive Proben bzw. mit dem Rasterelektronenmikroskop.

5. Fernbedienung

Die Anlage ist für die Untersuchung von radioaktiven Proben ausgelegt. Folgende Möglichkeiten sind vorhanden:

Beladen der Vakuumkammer mit Proben fixiert auf einem Arbeitstisch, der in x-y Richtung verfahrbar ist. Dies bedeutet, Öffnen und Schließen der Kammertür, Einsetzen der Proben in vorbereitete Halterungen, Entladen der Kammer nach erfolgtem Test (Abb. 2). Für den Fall, daß radioaktive Divertorelemente geprüft werden, müssen diese in eine außerhalb der Zellen vorbereitete Teststrecke montiert werden (Abb. 3). Das Element und die Teststrecke werden dann in der Zelle zusammengebaut, durch einen Flansch von 140 mm ϕ in die Kammer eingebracht und anschließend vakuumdicht mit der Kammer verbunden. Der Anschluß an den Kühlkreislauf erfolgt über Steckkupplungen. Wartungsarbeiten sind teilweise auch fernbedient durchzuführen:

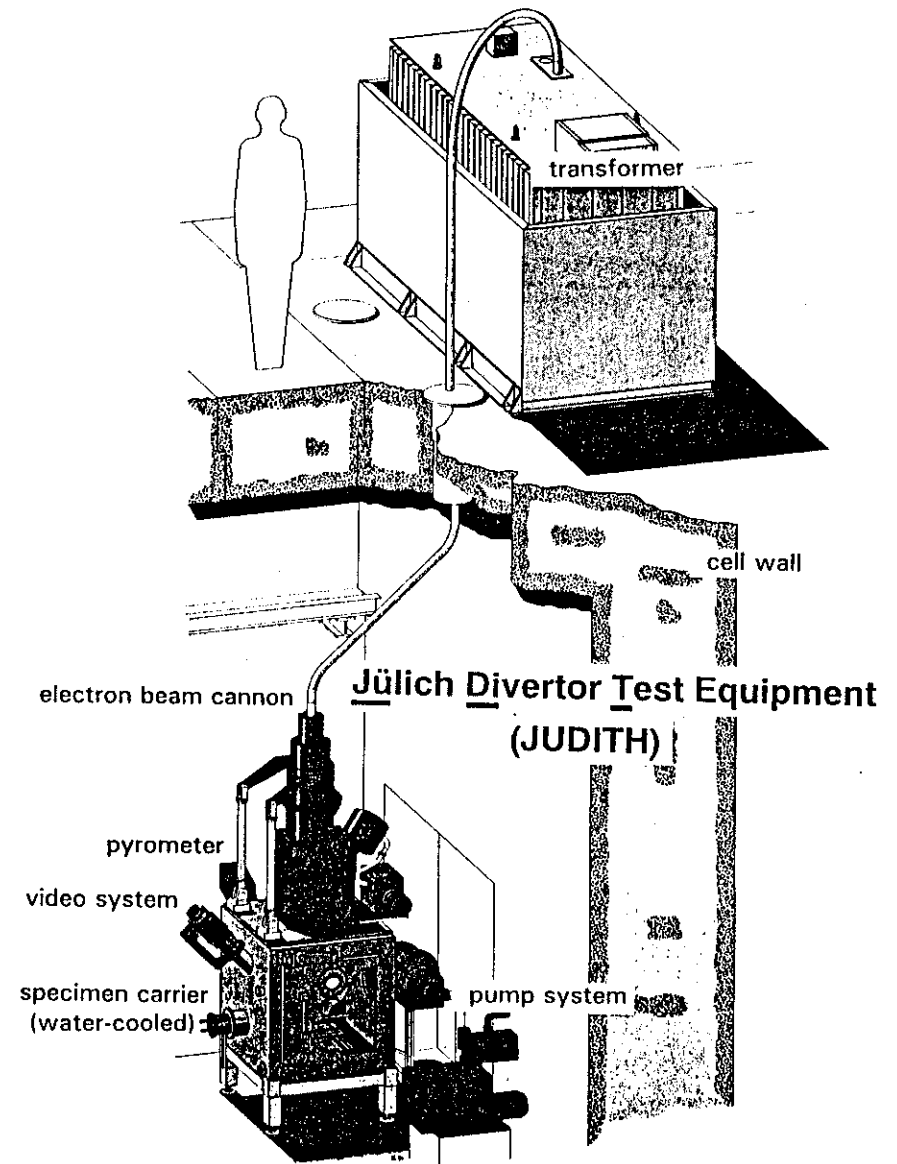
- Austausch von Sichtfenstern für Diagnosegeräte (Video, Infrarotkameras usw.)
- Einstellung der Diagnosegeräte und deren Justierung
- Pumpenservice (z.B. Ölwechsel)
- Kleinere Maschinenreparaturen

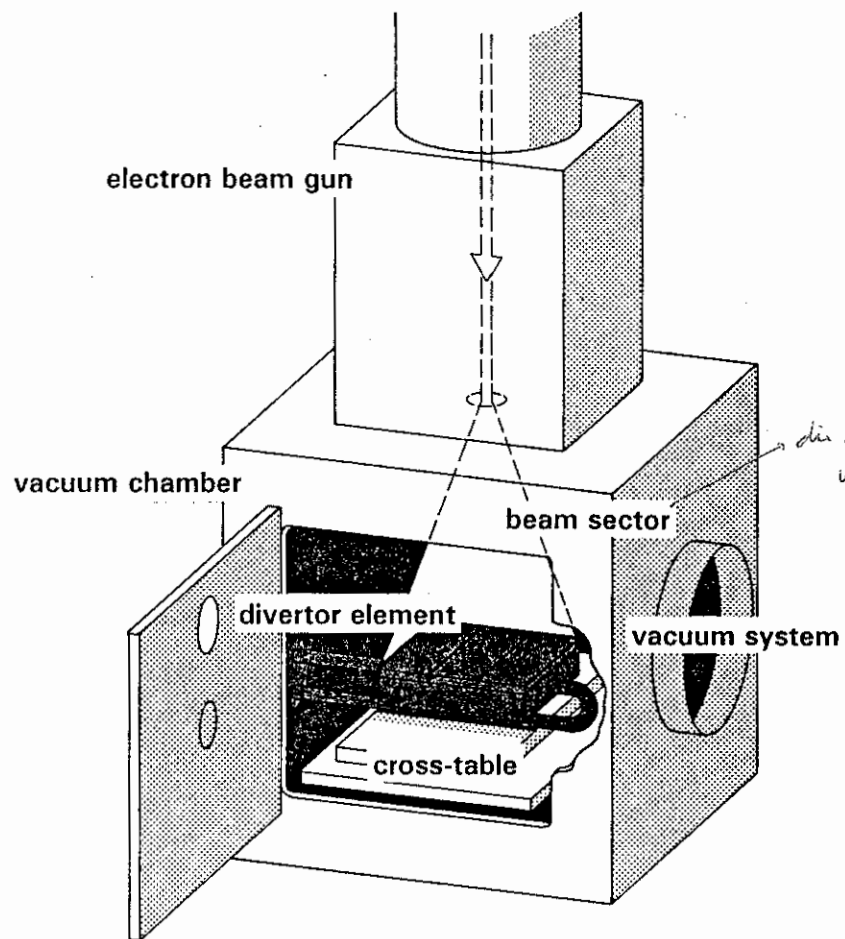
Ursprünglich war geplant, auch den Kathodenwechsel fernbedient durchzuführen. Die Elektronenstrahlkanone ist hierfür auch ausgelegt und läßt sich fernbedient über Preßluftzylinder öffnen. Der Wechselvorgang ist jedoch so kompliziert, daß dieser nur mit einem Zelleneinsatz vorgenommen werden kann.

Technische Daten:

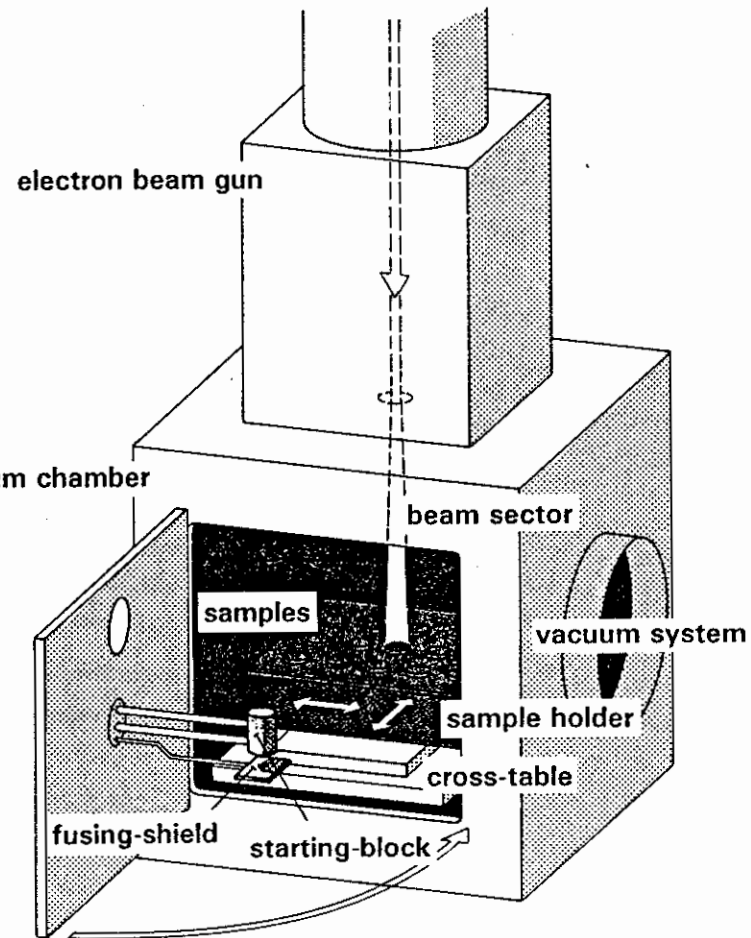
Strahlspannung	≤ 150 kV
Strahlstrom	≤ 400 mA
Strahl-Leistung	≤ 60 kW
Pulsbreite	≥ 1 ms
Pulsanstiegszeit	≤ 200 ¹⁰⁰ μ s
Ablenkung des Strahls <i>beam deflection</i>	± 5 cm in x,y
<i>Scanning</i> Ablenkfrequenz	≤ 100 kHz
Leistungsdichte	max. 6 MW/cm ²
Probendimensionen (cm)	$\leq 10 \times 10$ cm

Abb. 1: Elektronenstrahlanlage zur Untersuchung des Thermoschockverhaltens an radioaktiven Materialien





Test Configuration for a fixed and cooled
Divertor Element ($F \approx 30\text{cm}^2$)



Test Configuration
for small Samples ($F \approx 4\text{cm}^2$)
on Cross-Table

Abb. 2: Testanordnung für ein Divertorelement und für Kleinproben

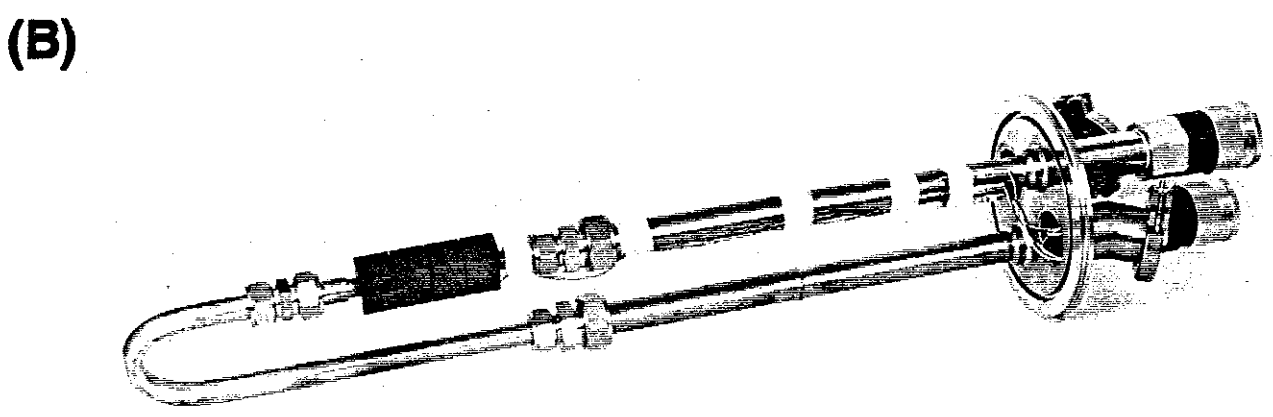
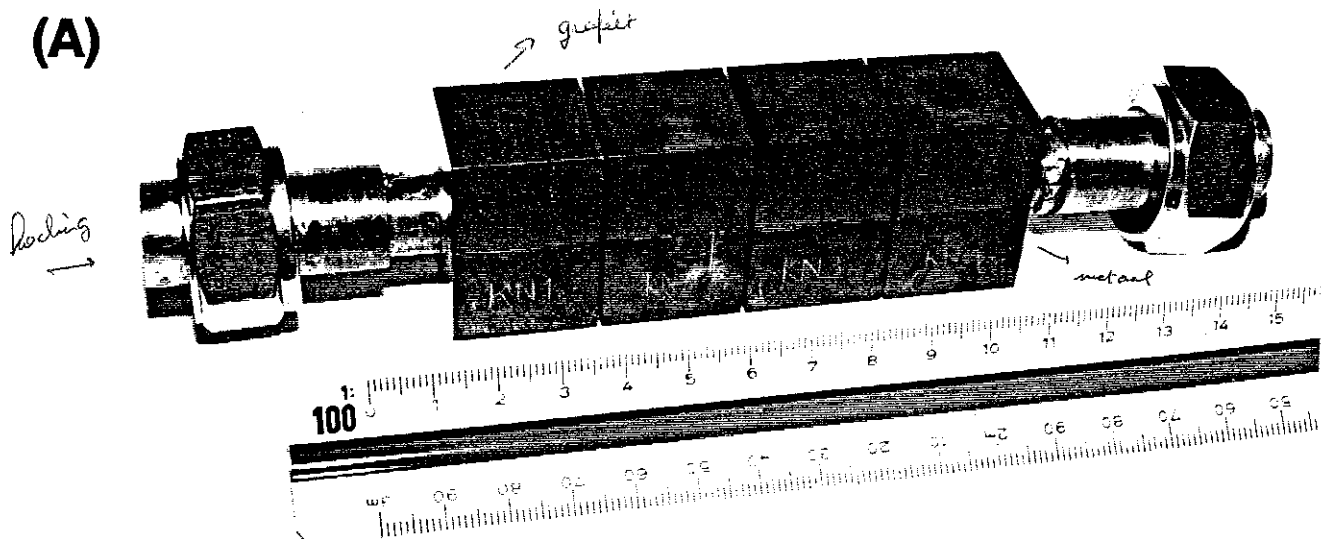


Abb. 3: (A) Divertorelement als Testelement
(B) Vormontierte Versuchsanordnung mit Dichtflansch

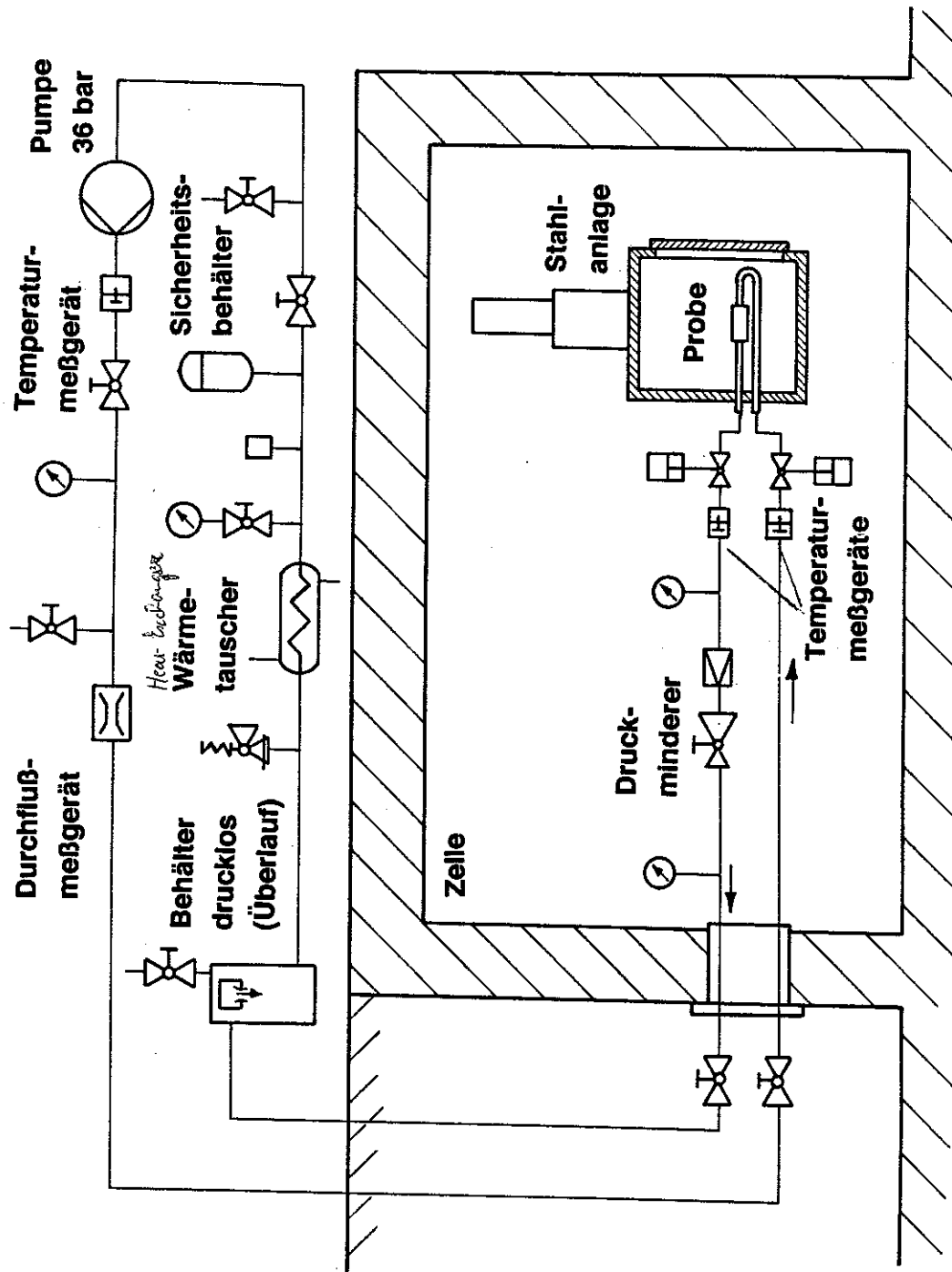


Abb. 4: Kühlkreislauf für Elektronenstrahlanlage JUDITH

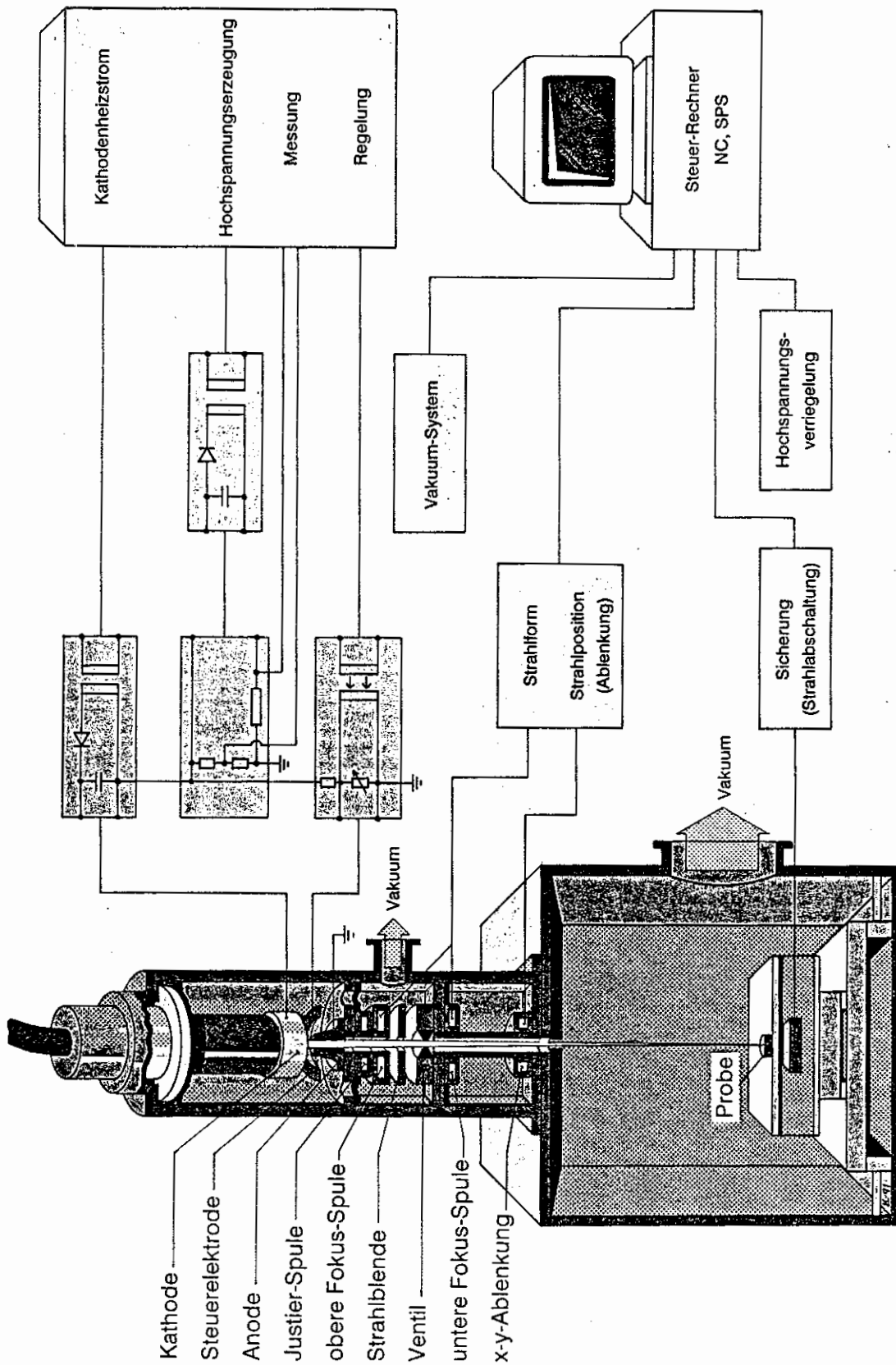


Abb. 5: Funktionsschema der Elektronenstrahlanode