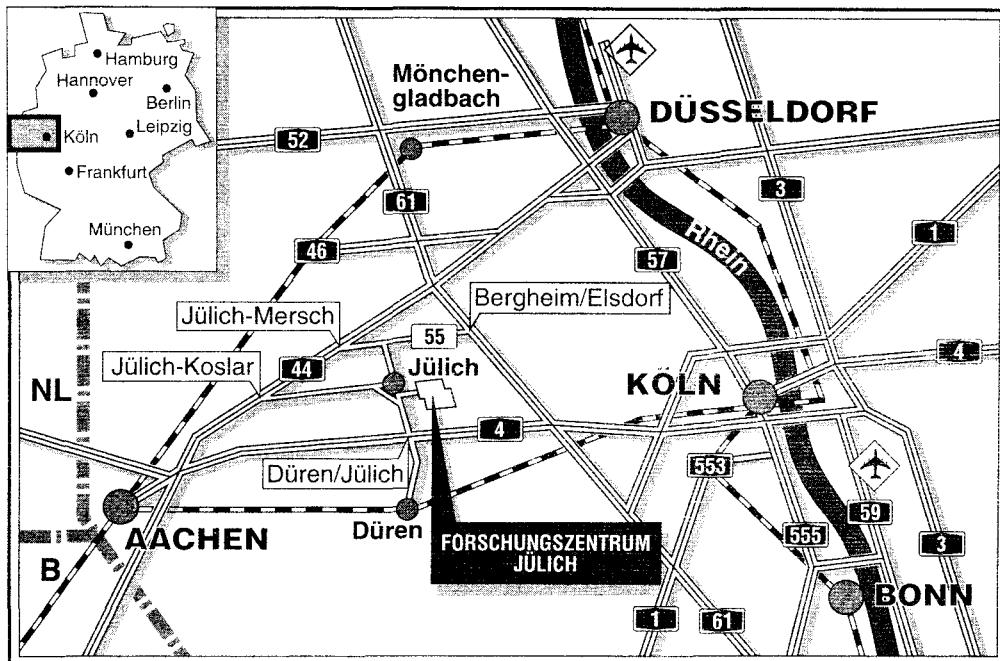


*Zentralabteilung Forschungsreaktoren
und Kerntechnische Betriebe
Institut für Werkstoffe der Energietechnik*

**JUDITH – Jülicher Divertor Testanlage
in den Heissen Zellen**

– eine Elektronenstrahlanlage für Materialtests –

R. Duwe W. Kühnlein J. Linke M. Rödiger



Berichte des Forschungszentrums Jülich ; 3183

ISSN 0944-2952

Zentralabteilung Forschungsreaktoren und Kerntechnische Betriebe

Institut für Werkstoffe der Energietechnik Jül-3183

Zu beziehen durch: Forschungszentrum Jülich GmbH · Zentralbibliothek
D-52425 Jülich · Bundesrepublik Deutschland

Telefon: 024 61/61-61 02 · Telefax: 024 61/61-61 03 · Telex: 833 556-70 kfa d

JUDITH – Jülicher Divertor Testanlage in den Heissen Zellen

– eine Elektronenstrahlanlage für Materialtests –

R. Duwe W. Kühnlein J. Linke M. Rödiger

JUDITH - Juelich Divertor Test Equipment in Hot Cells - an Electron Beam Test Apparatus for Materials Testing -

by

R. Duwe, W. Kühnlein

Zentralabteilung Forschungsreaktoren und Kerntechnische Betriebe - Heisse Zellen (ZFK-HZ)

J. Linke, M. Rödiger

Institut für Werkstoffe der Energietechnik (IWE-1)

Abstract

Testing of materials subjected to neutron irradiation will be carried out for fusion research programme at the KFA Jülich. An electron beam test apparatus Juelich Divertor Test Equipment in Hot Cells (JUDITH) has been installed in the Hot Cells of the Zentralabteilung Forschungsreaktoren und Kerntechnische Betriebe, complementing the test equipment available in Japan, USA, France and RF. Gamma ray emitting specimens are to be tested under thermal shock, thermal cycling and long-term loading conditions.

The apparatus consists of an electron beam unit with a beam power of 60 kW. The max. acceleration voltage is 150 kV, the max. beam current 400 mA. The beam can be deflected with a frequency of 100 kHz in xy-direction with an amplitude of ± 50 mm. Short pulses between 1 and 10 ms for the simulation of disruptions are possible, also longer pulses on actively cooled samples. The samples are positioned in a vacuum chamber by remote handling. The sample holder is mounted on a cross-table, allowing the appropriate beam position for each specimen to be defined.

Actively cooled divertor elements can be inserted through a flange at the side of the chamber. The water cooling circuit has a flow rate of 5 m³/h and a pressure of 4 Mpa, enabling a continuous thermal power operation. To handle beryllium and highly radioactive components additional precautions have been taken. An inner vacuum chamber was installed to avoid contamination of the electron beam unit as far as possible.

To test small divertor mock-ups without integrated cooling circuit connectors a special clamping mechanism was installed. The measurements of temperatures and material changes are performed by pyrometers, infrared camera systems, thermocouples and visual monitoring by video camera.

JUDITH - Jülicher Divertor Testanlage in den Heissen Zellen - eine Elektronenstrahlanlage für Materialtests -

von

R. Duwe, W. Kühnlein

Zentralabteilung Forschungsreaktoren und Kerntechnische Betriebe - Heisse Zellen (ZFK-HZ)

J. Linke, M. Rödiger

Institut für Werkstoffe der Energietechnik (IWE-1)

Kurzfassung

Die Elektronenstrahlanlage „JUDITH“ (Jülicher Divertor Testanlage in Heissen Zellen) ist für Wärmebelastungstests an Materialien ausgelegt, die in künftigen Fusionsanlagen als Wand- bzw. Komponentenwerkstoffe eingesetzt werden sollen. Grundsätzlich werden zwei Arten von Tests durchgeführt. Zum einen Thermoschockversuche, wobei Instabilitäten des Plasmas simuliert werden (Disruption) und in wenigen Millisekunden hohe Wärmebelastungen auf die Materialoberfläche einwirken. Zum anderen werden Thermozykliertests durchgeführt, die repräsentativ für den Normalbetrieb sind, wobei Wärmeleistung mit einer Pulsdauer von mehreren Sekunden und zwischenzeitlichem Abkühlen an aktiv gekühlte Komponenten abgegeben wird.

Die Maximalleistung der Anlage von 60 kW kann vom Millisekundenbereich bis Dauerbetrieb bereitgestellt werden, wobei der in xy-Richtung mit bis zu 100 kHz abgelenkte Strahl eine quasi-flächige Belastung der Materialoberfläche gestattet. Die maximal belastbare Fläche beträgt 10x10 cm². Um Neutronen-bestrahlte Materialien testen zu können, wurde die Anlage in einer gegen radioaktive Strahlung abgeschirmten „Heissen Zelle“ aufgebaut, was eine vollständig fernbediente Handhabung der radioaktiven Probe ermöglicht. Für Tests mit aktiv gekühlten Komponenten ist ein Druckwasser-Kühlkreislauf vorhanden ($P_{\max} = 4 \text{ Mpa}$). Die Beobachtung, Dokumentation und Auswertung der Tests erfolgt durch ein PC-unterstütztes Datenerfassungssystem, Video- und Infrarotkamera sowie pyrometrische und kalorimetrische Messungen.

Für den Umgang mit stark kontaminierenden Stoffen (z.B. Beryllium oder radioaktive Proben) wurde die Anlage mit einem zusätzlichen Schleussystem, bestehend aus Handschuhbox, Schleuse und zusätzlichem Schutzbehälter in der Arbeitskammer, versehen. Die bisher in der Anlage auch mit internationaler Beteiligung durchgeführten Tests haben die hohe Anpassungsmöglichkeit an die verschiedensten Komponentengeometrien und Testbedingungen gezeigt.

Inhaltsverzeichnis

Seite

1.	Einleitung.....	1
2.	Beschreibung der Elektronenstrahlanlage JUDITH	4
2.1	Vakuumkammer	4
2.2	Strahlerzeuger	5
2.3	Kühlkreislauf	7
3.	Versuchsdurchführung	9
3.1	Thermoschockversuche.....	9
3.1.1	<i>Kontaminationsschutz (Innenbehälter)</i>	<i>9</i>
3.1.2	<i>Strahlablenkung für den Schutzbehälter</i>	<i>11</i>
3.1.3	<i>Strommessung während des Thermoschocktests</i>	<i>12</i>
3.1.4	<i>Temperaturmessung während des Thermoschocktests.....</i>	<i>13</i>
3.2	Thermozykliertests an Divertorelementen	19
3.2.1	<i>Temperaturmessung</i>	<i>21</i>
3.2.2	<i>Restgasanalyse (RGA)</i>	<i>26</i>
3.2.3	<i>Keramografie und Metallografie</i>	<i>27</i>
3.2.4.	<i>Profilometrie.....</i>	<i>29</i>
3.2.5	<i>Rechnerische Simulation von Wärmebelastungstests.....</i>	<i>31</i>
4.	Sicherheitsvorkehrungen und Verriegelungen	33
4.1.	Schutz des Personals	33
4.2	Anlagenschutz	33
4.3	Probenüberbelastung.....	35
5.	Weitere Arbeiten	36
	Literaturverzeichnis	37

Planung und Konstruktion

G. Pott
R. Duwe
W. Kühnlein
H. Münstermann
W. Reisen

Aufbau der Anlage

H. Münstermann
H. Klöcker
G. Krings
H.J. Kunitz
H. Hamacher
A. Dombrowa

Betrieb und Experimentbetreuung

R. Duwe
W. Kühnlein
H. Münstermann

Projektbetreuung und Auswertung

J. Linke
M. Rödiger
H. Bolt
G. Breitbach
E. Wallura
J. You
A. Schuster

1. Einleitung

Die Elektronenstrahlanlage JUDITH (Juelicher Divertor Testanlage in Heissen Zellen) in den Heissen Zellen (HZ) des Forschungszentrums Jülich GmbH (KFA) ist speziell für Wärmebelastungstests an Materialien ausgelegt, die in künftigen Fusionsanlagen als Wand- bzw. Komponenten-Werkstoffe eingesetzt werden sollen. Die Probleme der Komponentenentwicklung im Bereich der dem Plasma zugewandten Bauteile sind darin begründet, daß auftreffende Plasmateilchen und elektromagnetische Strahlung hohe Wärmeflüsse erzeugen und zusätzlich z.B. durch Neutronen Materialveränderungen bewirkt werden.

Während des Normalbetriebes einer Fusionsanlage wird ein Teil der im Plasma freigesetzten Fusionsenergie an die erste Wand abgestrahlt und muß von dort durch ein Kühlsystem abgeführt werden. Ein spezielles Bauteil, der „Divertor“, dient dabei zur Beseitigung von Verunreinigungen des Plasmas, wie Helium oder Atomen, die aus dem Wandmaterial stammen. Der Divertor ist besonders stark belastet und nimmt daher in der Komponentenentwicklung eine Sonderstellung ein. Ziel der Entwicklung ist, möglichst Plasma-verträgliches Material mit einem Kühlkörper zu verbinden, so daß mehrere tausend Wärmeimpulse ohne Schäden an das Kühlmedium abgegeben werden können.

Zusätzlich zum Normalbetrieb treten durch Plasmaabrisse, sogenannten „Disruptionen“, für einige Millisekunden extrem hohe thermische Beanspruchungen auf, die an den Oberflächen des Wandmaterials zu Materialabtrag durch Verdampfung und Abplatzen führen. Aufgrund dieser Erosion ist die Lebensdauer der Bauteile begrenzt. Ein weiteres Ziel von Versuchen muß daher sein, geeignete Kandidatenwerkstoffe schockartig mit hohen Wärmeflüssen zu belasten, um quantitative Aussagen über die Erosionsrate machen zu können.

Aufgrund der thermischen Belastungen werden für die Wandmaterialien hohe Wärmeleitfähigkeit, niedriger thermischer Ausdehnungskoeffizient, hohe mechanische Festigkeit, hohe Schmelz- oder Sublimationstemperatur und geringe Erosionsrate gefordert. Da das Material während des Fusionsbetriebes auch noch mit Neutronen von bis zu 14 MeV beschossen wird, was Gitterfehlstellen zur Folge hat, muß durch Versuche der Einfluß der Neutronenbestrahlung auf die Materialparameter untersucht werden. Die dabei unvermeidbar auftretende radioaktive Aktivierung einiger Materialien macht es daher

erforderlich, Wärmebelastungstests mit entsprechenden Abschirmmaßnahmen fernbedienbar in einer „Heissen Zelle“ durchzuführen.

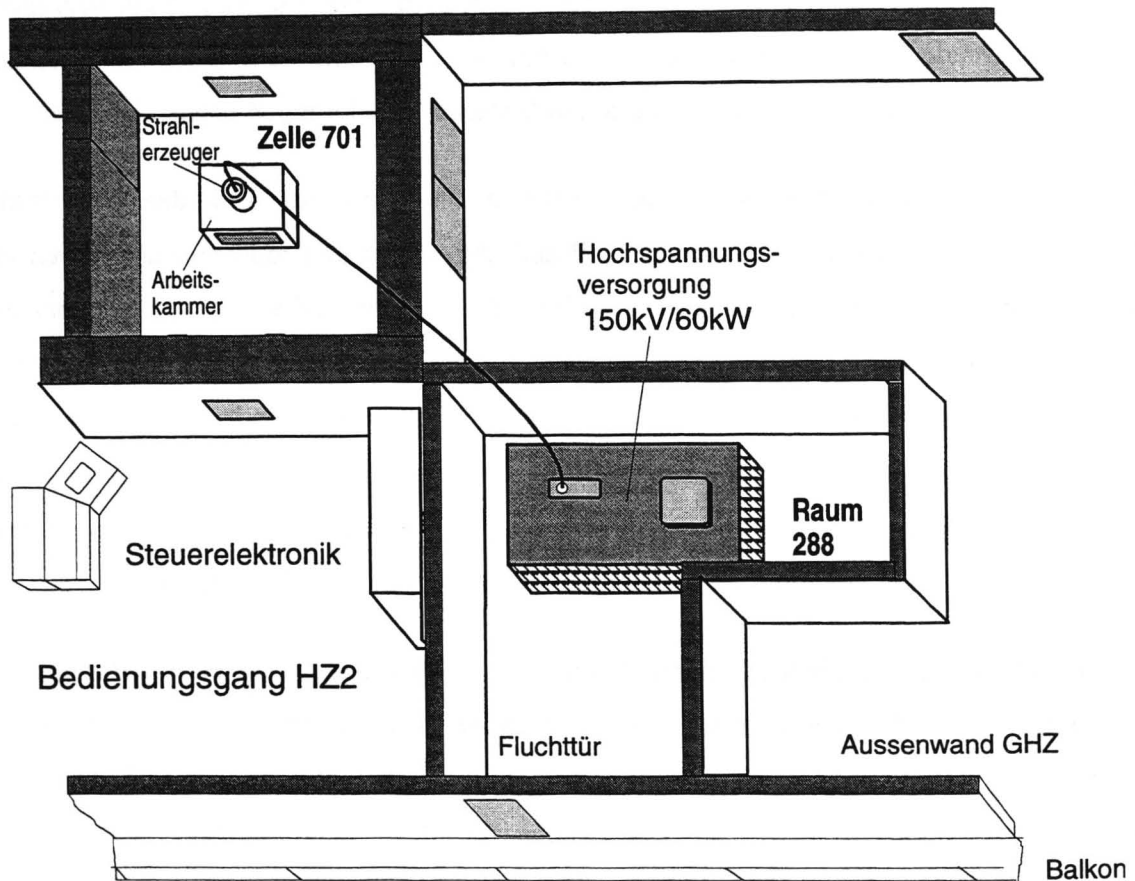


Abb. 1 Elektronenstrahlanlage JUDITH - räumliche Anordnung

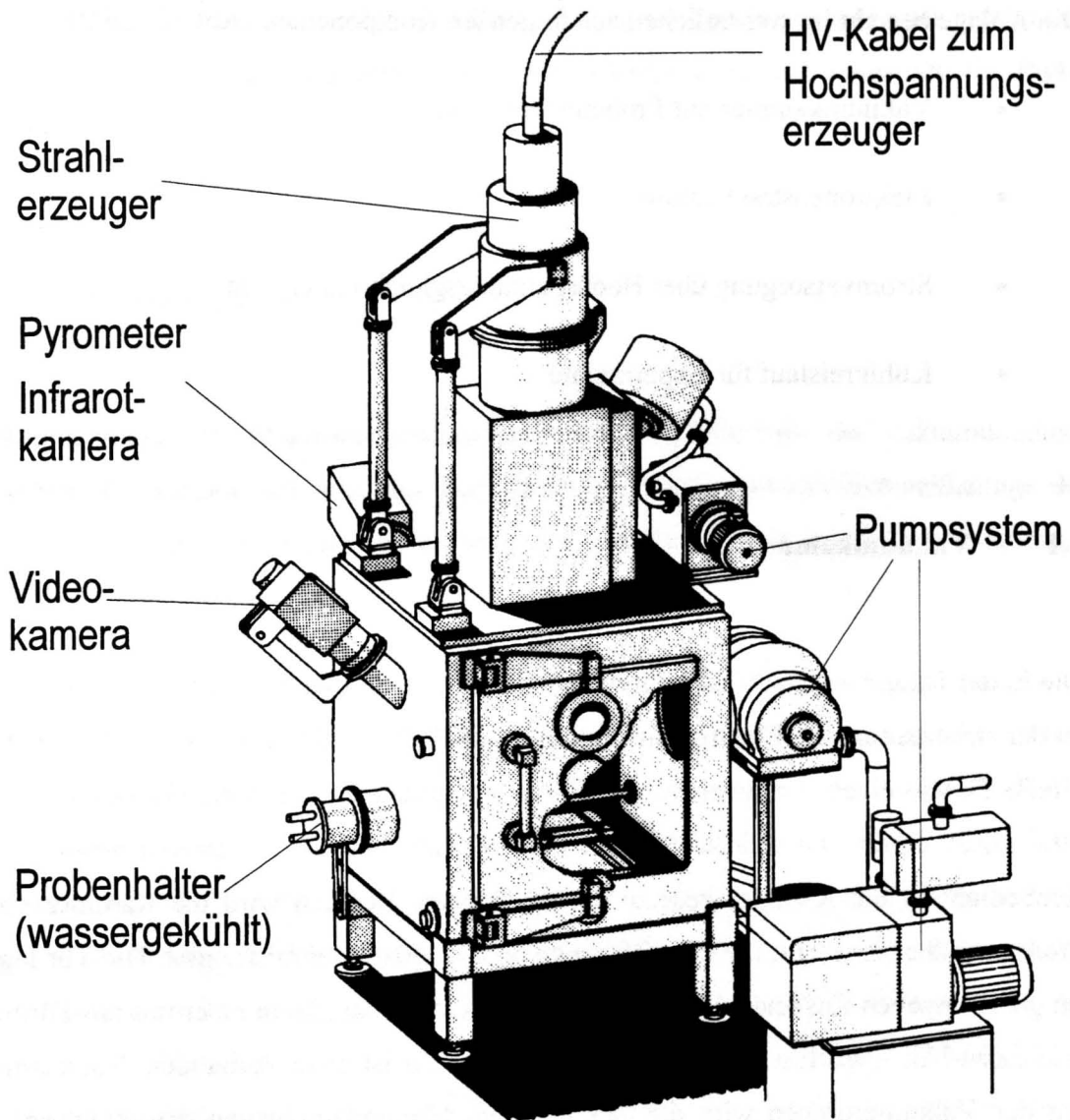


Abb. 2 Elektronenstrahlanlage JUDITH

2. Beschreibung der Elektronenstrahlanlage JUDITH

Die Anlage besteht im wesentlichen aus folgenden Komponenten (Abb. 1 und 2):

- Vakuumkammer mit Probenhaltersystem
- Elektronenstrahlkanone
- Stromversorgung über Hochspannungsgleichrichtergerät
- Kühlkreislauf für Experimente

2.1 Vakuumkammer

Die in der Hauptwerkstatt (ZAT) der KFA Jülich gefertigte kubusförmige Vakuumkammer ist der Arbeitsraum der Elektronenstrahlanlage und hat die Abmaße von 800x800x600 mm³ (HxBxT), was einem Volumen von ca. 0,4 m³ entspricht. Sie ist in der Heissen Zelle (Zelle 701/ HZ2) derart angeordnet, daß mit dem Manipulator die zu untersuchenden Proben fernbedient in die Kammer gesetzt werden können. Beladen wird die Kammer von der Frontseite über eine Tür, die eine Öffnung von ca. 600x600 mm² freigibt. Die Tür legt sich im geschlossenen Zustand an eine Rundschnurdichtung an, die in einer um die Türöffnung laufenden Nut liegt. Ein Verschlusssystem für die Tür ist nicht vorhanden. Nach Einschalten der Vakuumpumpen wird die Tür mit dem Manipulator gegen den Rundschnurring gedrückt, so daß der Unterdruck in der Kammer den Anpreßdruck aufbauen kann. Da die Zelle auch auf der Rückseite Fenster und Manipulatoren hat, ist die Anlage von allen Seiten her zu bedienen. Vakuumstutzen an drei Seiten gestatten das nachträgliche Einbringen von Komponenten, Meßsystemen bzw. das Anbringen von Beleuchtung, Video- und Infrarotkamera. In der Kammer selbst können die Proben auf einen in xy-Richtung verfahrbaren Kreutztisch mit außenliegendem Antrieb montiert werden und in einem Bereich von 300x400 mm² bewegt werden. Andere Möglichkeiten, wie zum Beispiel eine Probendrehvorrichtung, sind auch vorhanden. Die vier Sichtfenster der Kammer müssen nach einer Testserie gesäubert werden, da erodiertes Material sich auf der Glasoberfläche nieder-

schlägt und die Sicht, insbesondere aber die Infrarotmessung der Proben temperatur behindert. Die Glasscheiben wurden daher sehr leicht austauschbar angebracht, sie können mit dem Manipulator aus einer Haltevorrichtung von einer O-Ring-Dichtung abgenommen und gegen neue Scheiben ersetzt werden. Die Beleuchtung des Kammerinnenraums erfolgt mit einer 20 W-Lampe durch ein Sichtfenster, wobei allerdings nur der Raum um die Probe beleuchtet wird.

2.2 Strahlerzeuger

Der Strahlerzeuger der Elektronenstrahlanlage ist auf der Oberseite der Vakuumkammer angeordnet. Es handelt sich um eine kommerzielle Elektronenstrahl-Schweißanlage der Firma PTR (Präzisionstechnik Remagen), die zusätzlich mit einer hochfrequenten Strahlablenkung versehen wurde.

Die Elektronen werden von einer direkt geheizten Wolfram-Bandkathode emittiert, durch eine Steuerelektrode elektrostatisch gebündelt und zur Anode hin beschleunigt. Bei einer maximalen Beschleunigungsspannung von 150 kV und einer Maximalleistung von 60 kW fließt ein Strahlstrom von maximal 400 mA. Durch Fokussierung des Strahls läßt sich ein Brennfleck von etwa 1 mm Durchmesser erzeugen. Durch ein groß dimensioniertes Schieberventil besteht die Möglichkeit, die Elektronenstrahlkanone von der Vakuumkammer zu trennen, um bei Arbeiten an der Kammer, die ein Fluten erforderlich machen, 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 xy-Richtung ablenkt. Die räumliche Anordnung und die bis zu 100 kHz einstellbare Ablenkfrequenz gestatten es, eine Fläche von 100x100 mm² abzurastern und eine quasi-flächige Energieeintragung zu gewährleisten. Die Strahlablenkung erfolgt dabei durch einen Dreiecksgenerator, was am Strahlumkehrpunkt allerdings zu einer Mehrbelastung des Materials führt.

Kurzzeitige Impulse (bis 100 ms) erhalten ihre Energie aus dem aufgeladenen Glättungskondensator der Hochspannungsversorgung, wobei der Impulsanstieg und -abfall 100 µs beträgt und im Wesentlichen von Kabelkapazitäten und Regelverstärker abhängt. Bei längeren Impulsen muß die Leistungszufuhr über das Hochspannungsgleichrichtergerät

nachgeregelt werden, wobei die Zeitkonstante für die Regelung mehr als 400 ms beträgt, um insbesondere bei Impulsabschaltung die induzierte Überspannung so gering wie möglich zu halten. Die Einstellung der Strahlparameter kann sowohl manuell als auch automatisch über eine programmierbare NC-Steuerung erfolgen. Die automatische Steuerung ist dann empfehlenswert, wenn eine bestimmte Impulsfolge gefahren werden soll, zum Beispiel ein Zyklertest mit 1000 Aufheiz- und Abkühlphasen.

Das vorab erwähnte Hochleistungsgleichrichtergerät ist über ein Hochspannungskabel von ca. 60 mm Durchmesser und 10 m Länge sowie entsprechenden Steuerleitungen mit der Elektronenstrahlkanone und dem Steuerpult verbunden. Sämtliche elektrischen Steuerelemente, die Niederspannungsversorgungen für die Elektronenstrahlkanone und für das Vakuumsystem einschließlich Registriereinrichtungen für die Kreislaufsysteme sind in Steuerschränken im Bedienungsgang vor der abgeschirmten Zelle aufgestellt. Das für den Betrieb der Anlage notwendige Steuerpult befindet sich im Bereich des Zellenfensters.

Tabelle 1: Einige technische Daten der Elektronenstrahlanlage JUDITH:

Strahlleistung	60 kW max.
Beschleunigungsspannung	< 150 kV
Strahlstrom	< 400 mA
Strahldurchmesser	> 1,5 mm (fokussiert)
Strahlablenkung	+/- 3° (+/- 5cm) in XY-Richtung
Ablenkfrequenz	< 100 kHz
Pulsbreite	> 1 ms
Strahlanstiegszeit	< 100 μ s

Die Wolfram-Bandkathode hat eine begrenzte Lebensdauer, die aufgrund bisheriger Erfahrung zwischen 25 und 35 Betriebsstunden liegt. Zum Wechsel der Kathode wird der Strahlerzeugerraum geöffnet, indem der obere Kanonenteil pneumatisch aufgeschwenkt wird. Der Kathodenhalter kann anschließend durch Öffnen eines Bajonettverschlusses herausgenommen werden. Dieser Vorgang kann nicht fernbedient durchgeführt werden, sondern muß unter Beachtung der entsprechenden Schutzvorschriften manuell erledigt werden. Kathodenhalter und oberer Kanonenraum müssen vor der Wiederinbetriebnahme sorgfältig gereinigt werden, um Überschlüge zu vermeiden.

2.3 Kühlkreislauf

Im Normalbetrieb einer Fusionsanlage wird die gekühlte Wand pulsmäßig belastet, d. h. Aufheiz- und Abkühlphase wechseln nach jeweils einigen Sekunden. Die Simulation dieses Betriebszustandes in einer Elektronenstrahlanlage erfordert daher einen Kühlkreislauf, mit dem die in die aktiv gekühlte Komponente (z. B. Divertor) eingebrachte Wärme abgeführt werden kann. Der Kühlkreislauf muß so ausgelegt sein, daß sich unter thermischer Belastung kein Dampffilm an der Innenwand des Kühlrohres bildet. Dies würde zu einer Verschlechterung des Wärmeübergangs und damit zu einer Überhitzung der Komponente führen. Versuche und thermohydraulische Berechnungen ergaben, daß der Kühlmitteldruck bei einem abzuführenden Wärmefluß von bis zu 20 MW/m^2 über $3,0 \text{ MPa}$ und die Fließgeschwindigkeit im belasteten Rohrquerschnitt über 8 m/s liegen muß. Das Kühlwasser erwärmt sich bei voller Maschinenleistung (60 kW) und einem Kühlrohrdurchmesser von üblicherweise 10 mm um etwa 20 K . Der Kreislauf ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt.

Eine mehrstufige Kreiselpumpe saugt aus dem Niederdruckteil des Kreislaufs, der einen Vorratsbehälter, den Wärmetauscher und den Sicherheitsbehälter enthält, das Kühlwasser an und drückt es mit bis zu 4 MPa in den druckführenden Teil des Kreislaufs. Die Pumpe ist auf dem Zellendach installiert. Hinter der Pumpe werden Druck, Temperatur und Durchflußrate gemessen und am Bedienpult der Elektronenstrahlanlage angezeigt. In der Heissen Zelle kann der Kreislauf über flexible Druckschläuche mittels Steckkupplungen an die Elektronenstrahlanlage bzw. die aktiv gekühlte Komponente angeschlossen werden.

Zwecks Kalorimetrie sind Wasserein- und auslaß mit Temperaturmeßstellen versehen. Durch einen fest eingestellten Druckminderer wird der Druck auf unter 0,4 MPa abgesenkt. Vor und hinter dem Druckminderer wird der Druck gemessen. Vor und hinter dem Druckminderer wird der Druck gemessen.

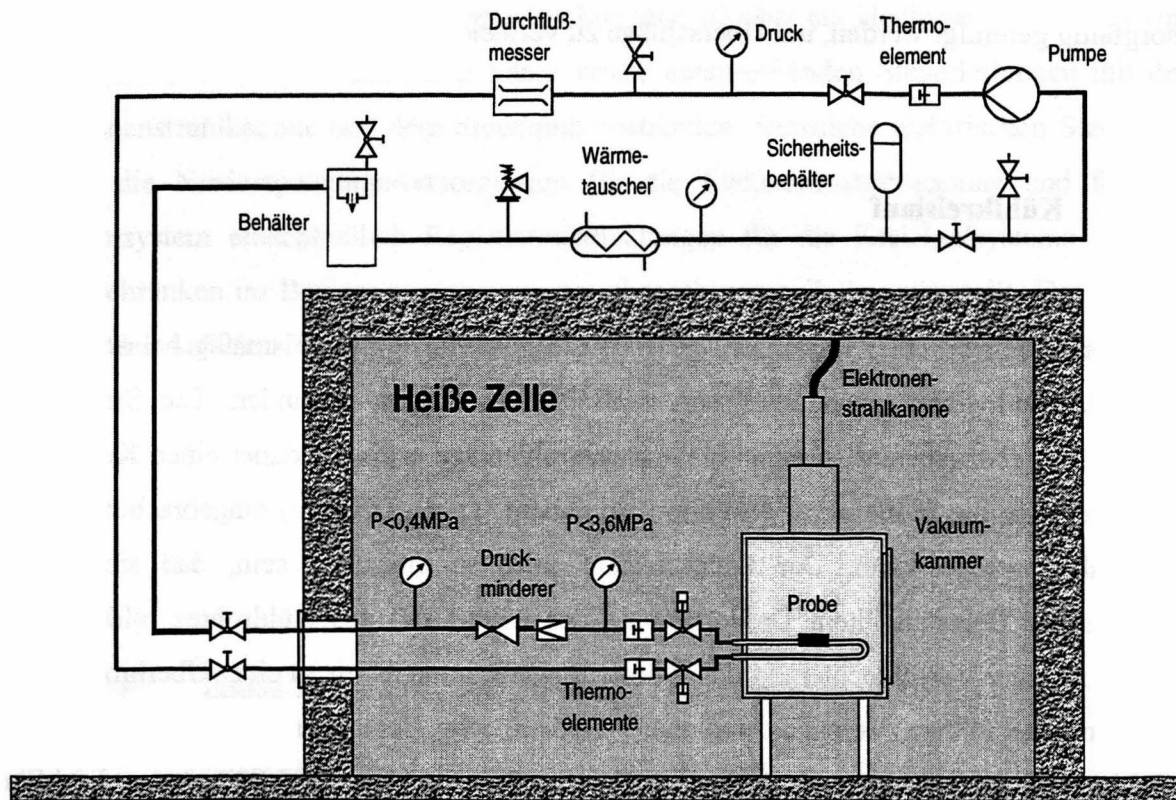


Abb. 3 Kühlkreislauf der Elektronenstrahlanlage JUDITH

Der Wärmetauscher ist sekundärseitig an das Kühlwassersystem der HZ angeschlossen. Die Verrohrung erfolgte mit 1^{1/2} Zoll - V 2 A - Rohr, das verschweißt wurde. Insgesamt befinden sich etwa 40 l Kühlflüssigkeit im Kreislauf. Als Kühlmedium wird Wasser mit Korrosionsschutzmittel verwendet.

3. Versuchsdurchführung

3.1 Thermoschockversuche

3.1.1 *Kontaminationsschutz (Innenbehälter)*

Die bei einem Zusammenbruch des Plasmas auftretenden kurzzeitigen Belastungen der ersten Wand betragen ein Vielfaches der im Normalbetrieb zu erwartenden Belastung, d. h. die im Millisekundenbereich aufgebrachte Wärmemenge kann mehrere MJ/m² betragen. Die in Tabelle 2 angegebenen Belastungsparameter sind als Standard für bisherige Tests an grafitischen Materialien anzusehen, wobei ein Verhältnis von thermisch aufgenommener zu elektrisch aufgebrachter Energie von 85% zugrunde gelegt ist. Ausgegangen wird dabei von einer belasteten Fläche von 3x3 mm² und einer Pulsdauer von 5 ms bei einer Beschleunigerspannung von 120 kV.

Tab. 2 Belastungsparameter für grafitische Materialien

Strahlstrom (mA)	40	80	120	160	200	240	280
Energiedichte (MJ/m ²)	2,3	4,5	6,8	9,1	11,3	13,6	15,9
P _{therm} (MW/m ²)	453	907	1360	1813	2267	2720	3173

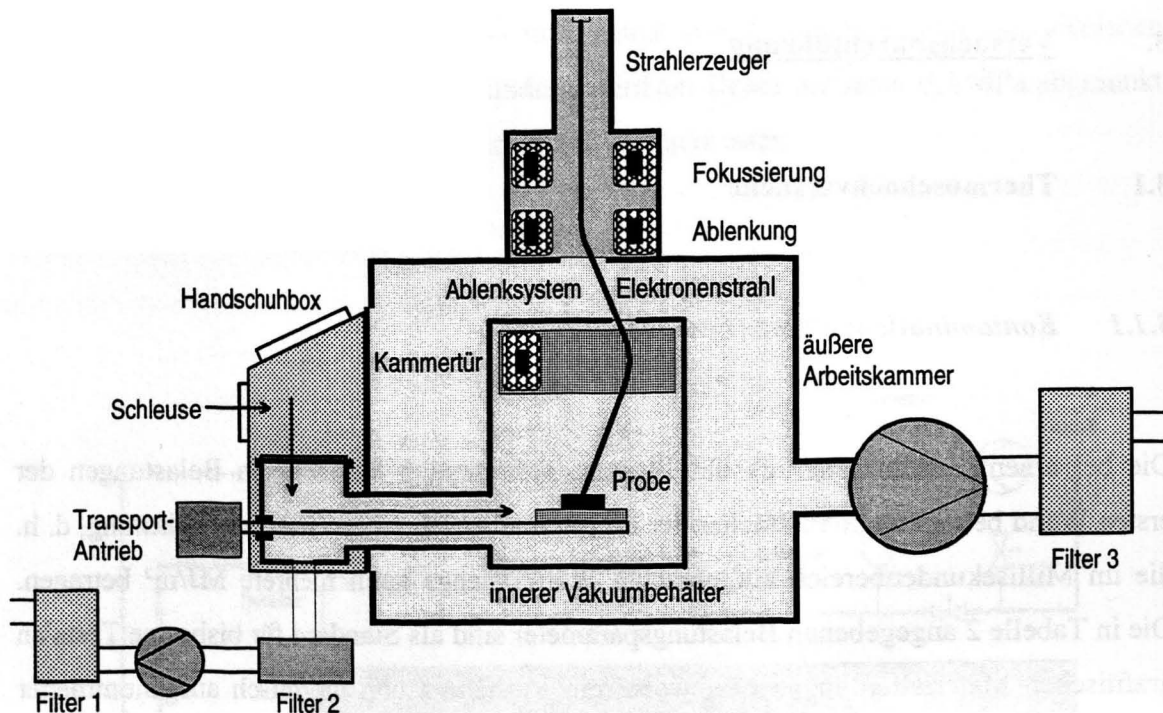


Abb. 4 Belastungstests in der Elektronenstrahlanlage JUDITH mit Beryllium-Proben

Das während der Tests abdampfende Material kondensiert an Wänden und Fenstern der Arbeitskammer, was insbesondere bei Neutronen-aktivierten oder giftigen Materialien (z.B. Beryllium) zu Handhabungsschwierigkeiten führt. Aus diesem Grund wurde in die Arbeitskammer ein innerer Schutzbehälter eingebaut, der als Kontaminationsschutz insbesondere auch für den Strahlerzeugerraum dient (Abb. 4). Hier führen elektrische Verunreinigungen zu Überschlügen und vorzeitigem Versagen der Kathode. Der Innenbehälter ist an der Kammertür befestigt und kann durch Öffnen der Tür aus der Kammer geschwenkt werden. Der kontaminierte Behälter lässt sich leicht abmontieren und kann anschließend zur Reinigung in eine außerhalb der Zelle stehende Handschuhbox gebracht werden.

Der Probenwechsel erfolgt über ein Transportsystem, welches durch eine Türöffnung in den Innenbehälter hineinreicht. Dabei kann ein Transportschlitten von einer vor der Kammertür angebrachten Beladestation durch einen Tunnel in die Bestrahlungsposition des Innenbehälters gefahren werden. An der Vorderseite der Tür ist eine mit einer Probenschleuse versehene Handschuhbox angebracht, über die insbesondere Proben, die der Gefahrenstoffverordnung unterliegen (z.B. Beryllium), auf den Transportschlitten gesetzt werden können. Für stark radioaktive Proben wird die Handschuhbox nicht benutzt, da in

diesem Fall die Proben mittels Manipulator auf den Transportschlitten gesetzt werden. Der Innenbehälter und das Transportsystem besitzen ein eigenes Pumpsystem, so daß beim Be- und Entladen von Proben ein ständiges Druckgefälle gegenüber dem Kammervolumen und der Handschuhbox gegeben ist. Vorhandene Aerosole können somit durch ein dem Pumpsystem vorgeschaltetes Feinstaubfilter (Klasse P 3) aufgefangen werden.

Da für den Elektronenstrahl eine Eintrittsöffnung im Deckel des Innenbehälters vorhanden sein muß, kann ein Teil des abdampfenden Materials durch diese Öffnung in die Arbeitskammer und grundsätzlich auch in den Strahlerzeugerraum gelangen, was allerdings vermieden werden sollte. Aus diesem Grund wurde ein spezielles Strahlablenkungssystem im Innenbehälter installiert, mit dem der Strahl derart abgelenkt werden kann, daß ein direkter Weg von der belasteten Probe zum Strahlerzeugerraum nicht vorhanden ist (Abb. 4).

3.1.2 Strahlablenkung für den Schutzbehälter

Im unteren Bereich des Strahlerzeugerraumes befinden sich die Ablenkspulen, mit denen der Strahl bei einer Ablenkfrequenz von bis zu 100 kHz um maximal ± 5 cm in xy-Richtung ausgelenkt werden kann. Die Ablenkspannung setzt sich aus einem Wechsel- und einem Gleichspannungsanteil zusammen. Während mit der Amplitude der Wechselspannung die Größe der abzurasternden Fläche (bei Thermoschocktests z.B. $5 \times 5 \text{ mm}^2$), eingestellt werden kann, wird mit dem Gleichspannungsanteil ihre Position innerhalb der maximalen Ablenkung festgelegt.

Somit ist es möglich, den Strahl durch eine dezentral angebrachte Öffnung in den Innenbehälter zu leiten. Durch ein zusätzliches Magnetfeld im Deckelbereich wird der Strahl nochmals derart abgelenkt, daß kein direkter Weg von der belasteten Probe zum Strahlerzeuger vorhanden ist (Abb. 4).

3.1.3 Strommessung während des Thermoschocktests

Für die Beurteilung eines Tests ist es hilfreich, den in die Probe eindringenden Elektronenstrom zu kennen. Pulsdauer sowie tatsächlich eingebrachte elektrische Leistung können auf diese Weise kontrolliert werden. Zu diesem Zweck ist der Probenaufnehmer über einen Ohm'schen Widerstand geerdet, so daß während der Belastung der Spannungsabfall am Widerstand gemessen werden kann. Als Meßgerät wird ein digitales Speicheroszilloskop mit einer Zeitauflösung von 10 nsec eingesetzt, so daß kürzeste Stromänderungen erfaßt werden können (Abb. 5).

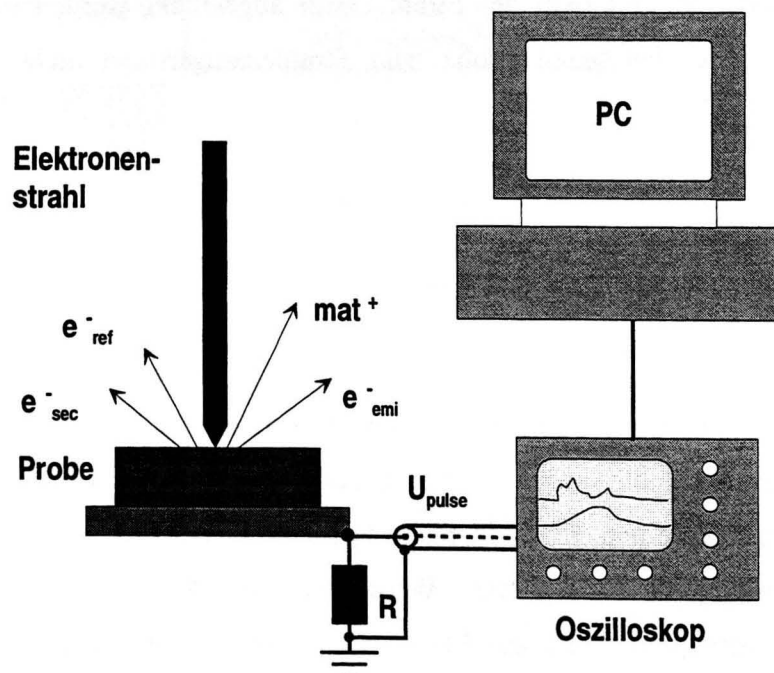


Abb. 5 Strommessung mit Oszilloskop

Von der Oberfläche reflektierte Elektronen, Sekundärelektronen sowie mit zunehmender Temperatur ansteigende Emission und ionisierter Dampf lassen sich somit meßtechnisch erfassen. Abbildung 6 zeigt den typischen Verlauf von Stromkurven während Belastungstests einer Graphitprobe (Feinkorngraphit EK98). Bei einer Belastung der Probe mit einem geringen Strom (z.B. für CFC bei 80 mA) wird der erwartete Rechteckverlauf des Elektronenstroms beobachtet, wobei durch reflektierte Elektronen die Amplitude etwa um 7% verringert ist. Bei höheren Belastungen kommt in zunehmendem Maß ein Anteil

emittierter Elektronen hinzu, was den gemessenen Impuls vornehmlich gegen Pulsenende, also bei maximaler Temperatur, absinken läßt. Verdampfende Materieteilchen verstärken diesen Meßeffect.

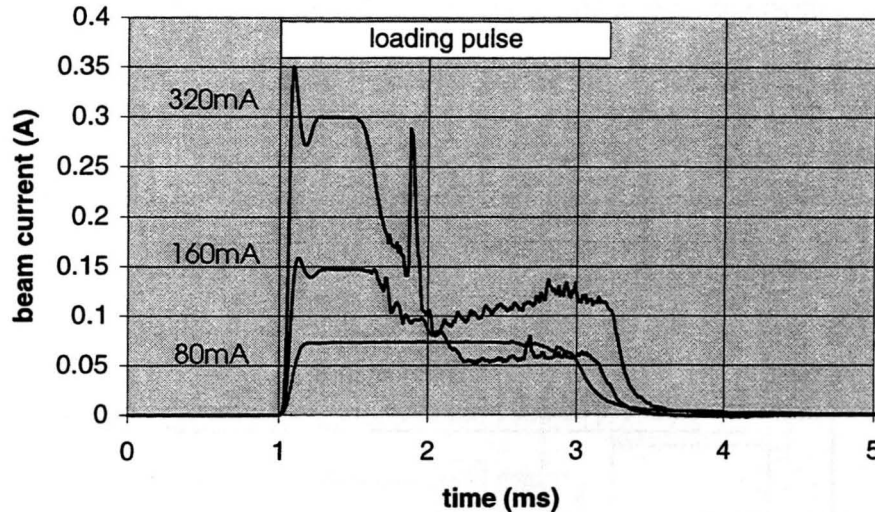


Abb. 6 Verlauf des Strahlstroms bei unterschiedlicher Belastung einer Grafitprobe

3.1.4 Temperaturmessung während des Thermoschocktests

Bei den im Millisekunden-Bereich durchgeführten Belastungen steigt die Oberflächentemperatur der Probe bis über die Verdampfungs- bzw. Sublimationstemperatur an. Als sinnvolle Methode zur Messung des Temperaturverlaufs bietet sich der Einsatz eines Pyrometers an, das die von der Oberfläche ausgesandte Infrarotstrahlung erfaßt. Aufgrund der erforderlichen Zeitauflösung kann nur ein Gerät mit entsprechend schnellem Ansprechvermögen eingesetzt werden.

Leider haben die üblichen Quotientenpyrometer, die unabhängig vom Emissionsgrad einer Oberfläche die korrekte Temperatur ermitteln, ein zu langsames Ansprechverhalten, um für Kurzzeitmessungen eingesetzt werden zu können. Aus diesem Grund wurde ein spezielles Pyrometer entwickelt, welches für die vorgesehenen Versuche schnell genug ist und den Temperaturbereich bis 3500°C abdeckt. Abbildung 7 zeigt den schematischen Aufbau des Pyrometers. Als Infrarotdetektor kommt eine Si-Diode mit integriertem schnellem Vorverstärker zum Einsatz, deren maximale Empfindlichkeit im nahen Infrarotbereich

(950 nm) liegt. Als Optik wird ein 85 mm-Standardobjektiv benutzt. Durch einen Strahlteilerwürfel kann ein Laserstrahl dem Meßstrahl überlagert werden, so daß ein exaktes Einstellen der Meßposition möglich ist. Der Durchmesser des Meßpunktes beträgt 1 mm. Das abgegebene Spannungssignal wird entweder über ein digitales Oszilloskop oder eine schnelle Datenerfassungskarte in einem PC erfaßt. Die Umrechnung in eine entsprechende Temperatur erfolgt in jedem Fall in dem dazugehörigen Computer.

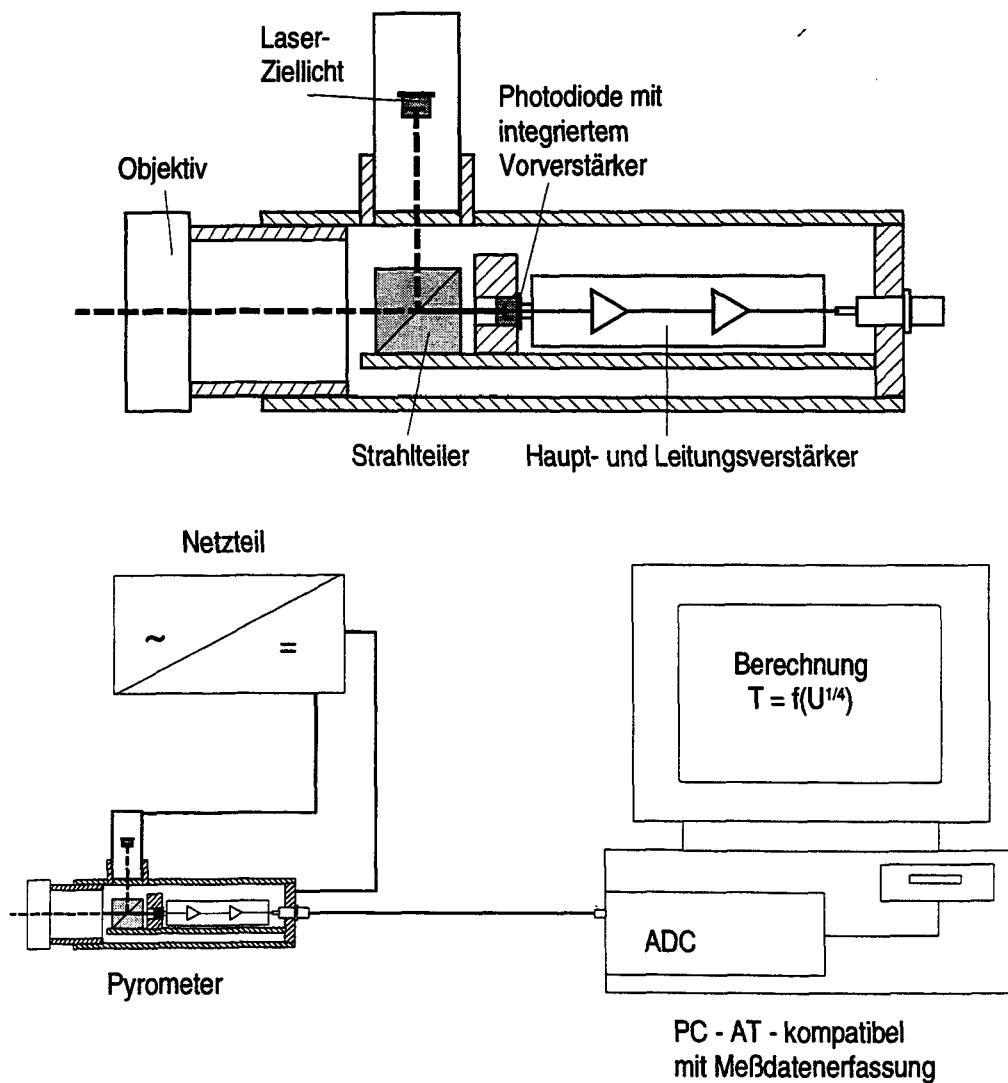


Abb. 7 Schematische Darstellung und Temperaturmessung mit schnellem Pyrometer

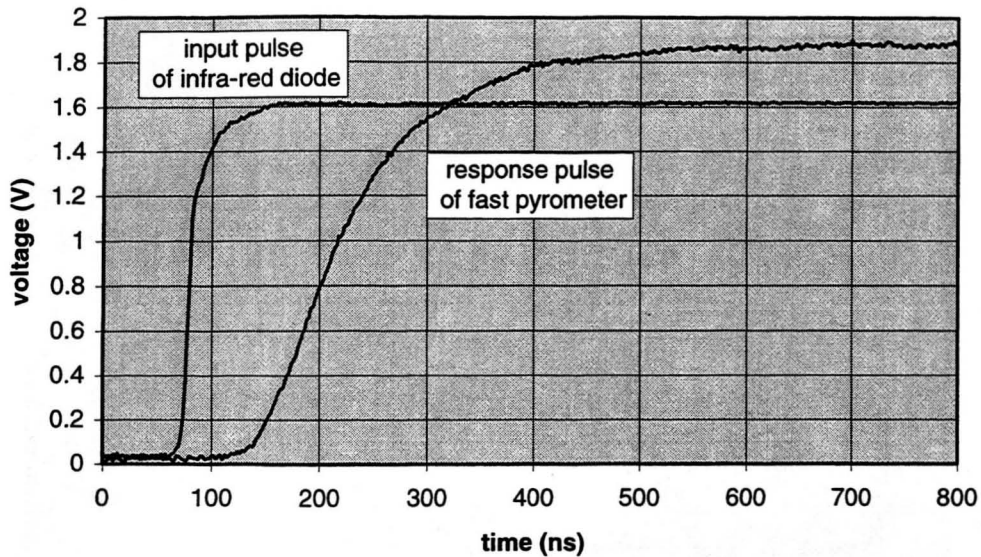


Abb. 8 Zeitauflösung des schnellen Pyrometers

Abbildung 8 zeigt, daß eine mit Rechteckspannung (Anstiegsflanke ca. 50 ns) angesteuerte Infrarot-LED mit einer Zeitauflösung von $< 0,3 \mu\text{s}$ detektiert werden kann.

Die Bestimmung der Absoluttemperatur der Oberfläche ist sehr problematisch, weil der Emissionsgrad von Material, Oberflächenbeschaffenheit und Temperatur abhängt und direkt in das Meßergebnis eingeht. Im vorliegenden Fall wurde vergleichbares Probenmaterial im unteren Temperaturbereich, in dem noch keine Erosion auftritt, homogen bis zum Gleichgewicht aufgeheizt und die Temperatur zusätzlich zu dem schnellen Pyrometer mit einem Quotientenpyrometer bestimmt. Für den gemessenen Bereich konnte somit eine Korrelation zwischen Diodenstrom und Temperatur hergestellt werden. Der für Thermoschocktests interessierende obere Temperaturbereich ($> 2600^\circ\text{C}$) wurde mit Hilfe der Strahlungsgesetze extrapoliert. Abbildung 9 zeigt die für grafitisches Material auf diese Art gewonnene Kalibrierkurve. Die Umrechnung des Diodenstroms in Oberflächentemperatur erfolgt durch ein PC-Datenerfassungsprogramm.

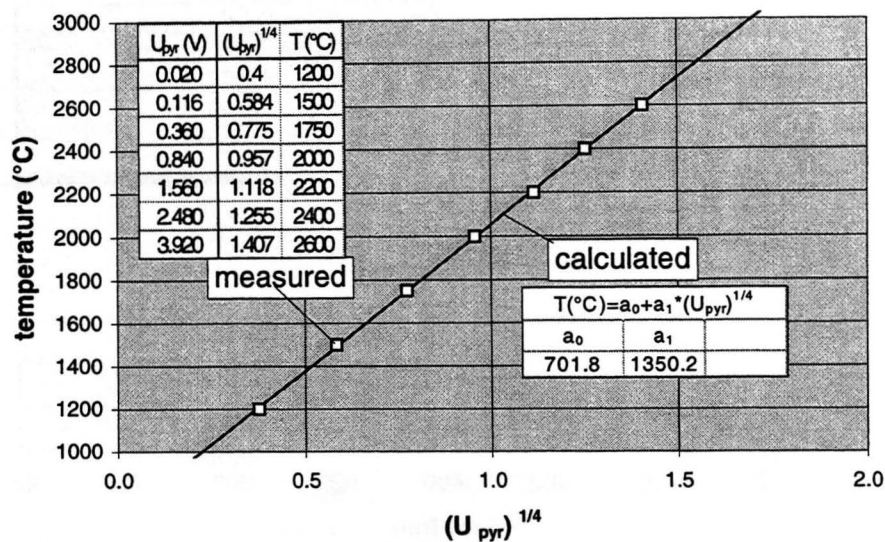


Abb. 9 Kalibrierkurve des schnellen Pyrometers für grafitisches Material

Von besonderem Interesse ist die kombinierte Messung der Oberflächentemperatur und des Elektronenstroms in der Probe, bzw. der verdampfenden, ionisierten Materie. In Abbildung 10 sind für grafitisches Material (Feinkorngraphit EK98) Temperatur- und Stromverlauf während verschiedener Belastungstests dargestellt. Bei der relativ geringen Wärmebelastung von 2,88 MJ/m² tritt noch kein Materialabtrag auf, somit zeigt die Stromkurve erst nach 4 ms Pulsdauer merkliche Elektronenemission aufgrund der über 2000 °C ansteigenden Temperatur. Dieses macht sich durch ein Absinken des Nettostroms in der Probe bemerkbar. Bei höheren Belastungswerten steigt die Temperatur bis auf 3000 °C an, was zu Verdampfung, bzw. Sublimation des Materials führt und somit einen zusätzlichen Kühleffekt bewirkt. Die Temperaturkurve läßt diesen Kühleffekt deutlich erkennen. Der entsprechende Strom zeigt bei allen Belastungsstufen einen zusätzlich auftretenden Effekt, nämlich ein kurzzeitiges Ansteigen des Nettostroms in der Probe kurz vor Erreichen der Sublimationstemperatur. Da die mit mehr als 100 keV in die Oberfläche eingeschossenen Elektronen ihre Energie zum größten Teil in einer Eindringtiefe von 50-100 µm abgeben, erreicht die Wärme front erst nach wenigen Millisekunden die Probenoberfläche. Es kann angenommen werden, daß dann die weniger stark gebundenen Teilchen aufgrund der Schockbelastung von der Oberfläche weggeschleudert werden und dabei kühlere Stellen auf der Oberfläche hinterlassen, was zu der spontanen Verringerung der Elektronenemission führt.

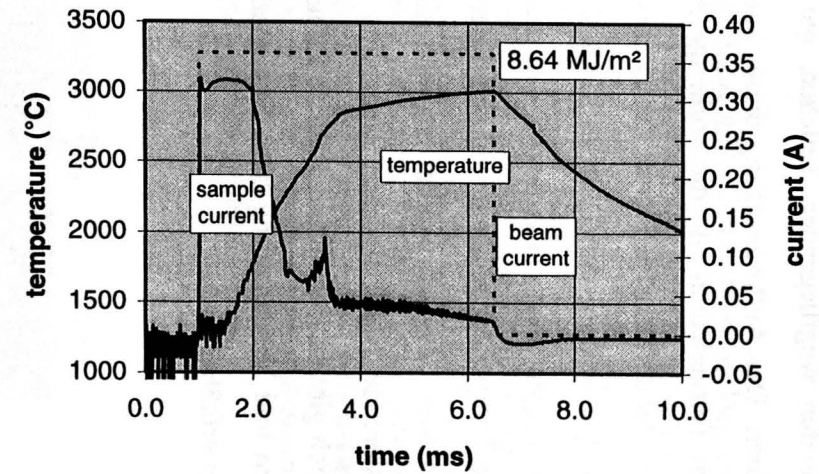
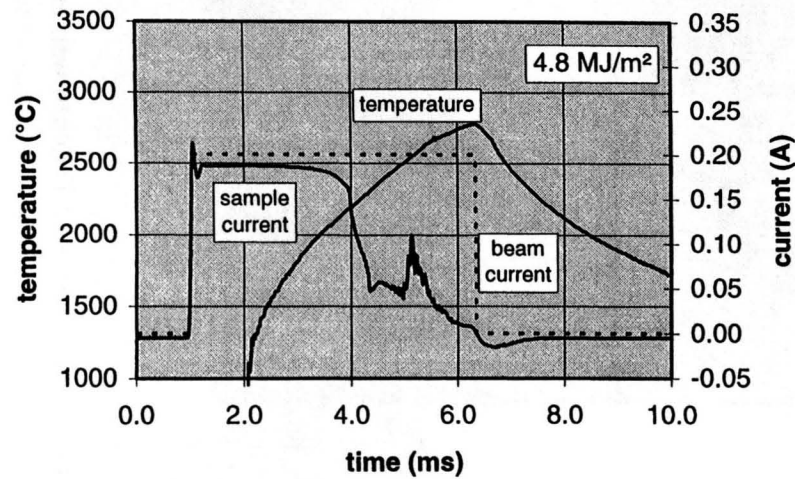
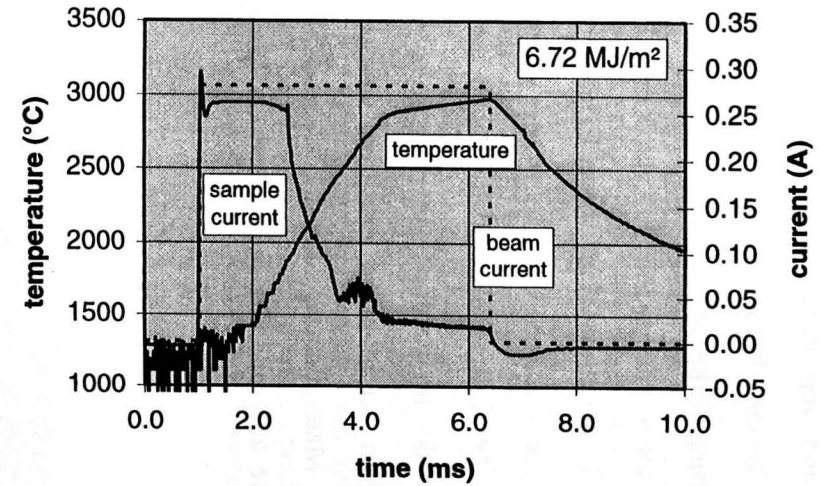
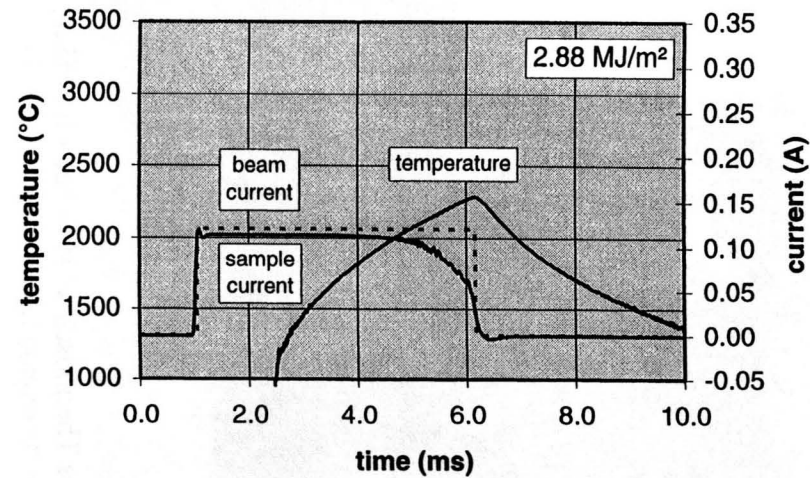


Abb. 10 Temperatur- und Stromverlauf bei verschiedener Belastung (Feinkorngraphit EK98)

In Abbildung 11 ist dieser Vorgang fotografisch festgehalten, und man erkennt die einseitig aufgeheizten wegfliegenden Teilchen, die aufgrund von Rotation als gepunktete Linien erscheinen. Der Aufheizvorgang dieser zurückbleibenden kühleren Stellen erfolgt mit dem gleichen Zeitverhalten wie die vorherige Aufheizung. Erkennbar ist dies an der ähnlichen Steigung der abfallenden Flanke des „Peaks“ verglichen mit der Steilheit der Kurve kurz vor dem Wegschleudern der Teilchen. Daß sich im Temperaturverlauf diese Effekte nicht so deutlich zeigen, mag daran liegen, daß das Emissionsverhalten der Elektronen exponentiell von der Temperatur abhängt und somit der Strom bei Temperaturveränderungen verhältnismäßig stärker reagiert. Geklärt ist noch nicht, ob der im Rahmen von Thermoschocktests interessierende Materialverlust quantitativ aus dem Stromverlauf ermittelt werden kann. Sicherlich gibt es zwei grundsätzliche Effekte von Materialabtrag, nämlich weggeschleuderte Teilchen und Verdampfung bzw. Sublimation, die aufgrund der beschriebenen Messungen getrennt erfaßbar sind.

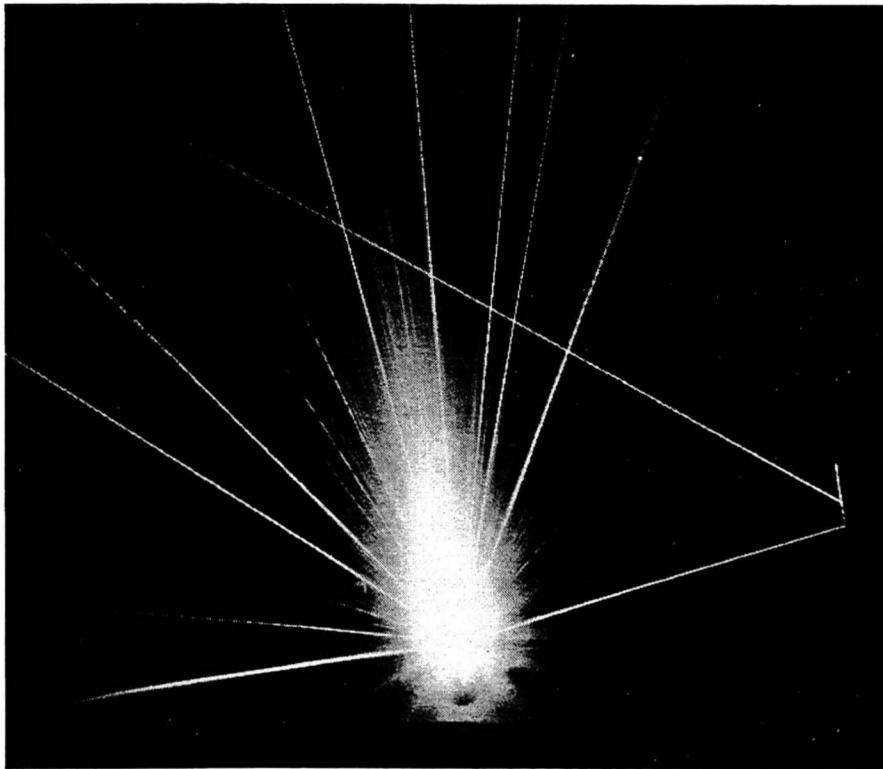


Abb 11 Wegfliegende Teilchen während eines Thermoschocktests bei 8.64 MJ/m^2

3.2 Thermozykliertests an Divertorelementen

Für den Aufbau eines Divertors oder der ersten Wand gibt es verschiedene Design-Vorschläge, die als Gemeinsamkeit haben, daß hochbelastbares Material mit einem Kühlsystem verbunden wird. Als sogenanntes „erste Wand“-Material werden zur Zeit CFC, Beryllium und Wolfram-Legierungen favorisiert. Bisherige Tests wurden mit Divertormodulen durchgeführt, die aus einem Kühlkörper mit Kühlkanal und eingelötetem Rohr, sowie mehreren aufgelöteten Schutzziegeln aus CFC ($25 \times 25 \times 10 \text{ mm}^3$) bestanden (Abb. 12). Mittels Rohrverschraubungen wurde der betreffende Modul mit einem tragenden Rohrbogen verschraubt, der seitlich durch einen Flansch in die Arbeitskammer ragt und den Modul im Strahlbereich positioniert (Abb. 13). Durch Steckkupplungen kann der Rohrbogen an den Druckwasserkreislauf angeschlossen werden.

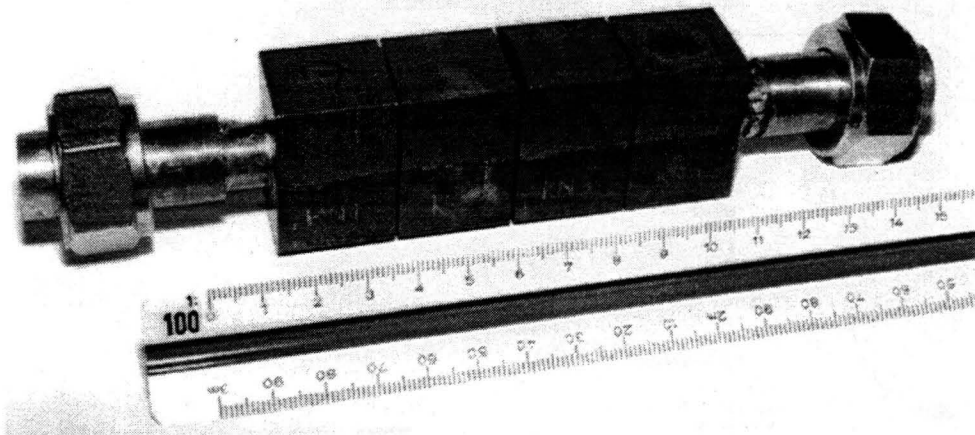


Abb. 12 In JUDITH getestetes Divertormodul

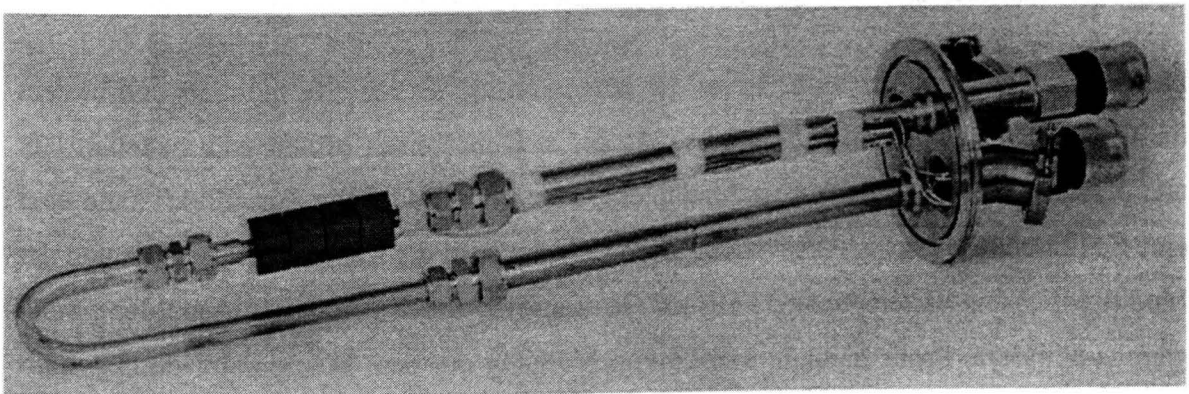


Abb. 13 Divertormodul eingesetzt in die Halterung mit Kühllanschlüssen

Im Weiteren ist vorgesehen, Module im HFR Petten zu bestrahlen, um möglichst relevante Materialschädigung durch Neutronen zu erreichen. Im anschließenden Wärmebelastungstest sollen dann die veränderten Eigenschaften der Divertormodule ermittelt werden. Aus ökonomischen Gründen eignen sich für diese Testreihe nicht die bereits beschriebenen Module. Es ist nicht sinnvoll, die kompletten Rohranschlüsse der Module mitzubestrahlen und damit kostbaren Raum in der Bestrahlungskapsel zu verschenken. Aus diesem Grund wurde eine spezielle Modulgeometrie entwickelt, die es gestattet, den Kühlkörper ohne Rohransätze zwischen zwei Kühlkreislaufadaptern zu klemmen und somit eine dichte Verbindung zum Kühlkreislauf herzustellen. Abbildung 14 zeigt den schematischen Aufbau der Klemmvorrichtung. Die Adapter werden federnd gehalten, um Wärmeausdehnungen auszugleichen und ein gleichmäßiges Anliegen der Dichtungen zu gewährleisten.

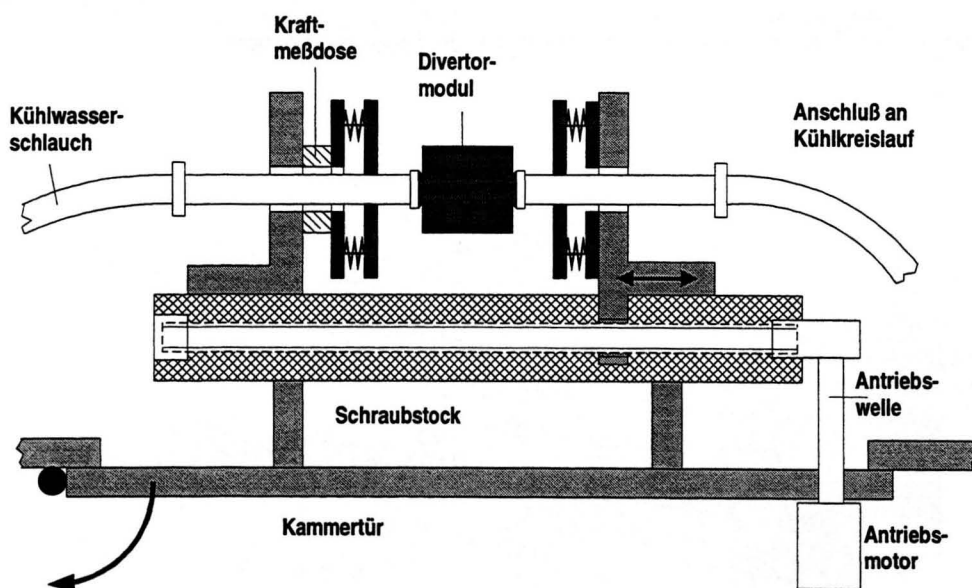


Abb. 14 Schematischer Aufbau der Klemmvorrichtung für aktiv gekühlte, bestrahlte Module

Die gesamte Klemmvorrichtung ist an der Innenseite der Kammertür montiert und besteht im Wesentlichen aus einem Schraubstock, der sich motorisch öffnen und zustellen läßt und dessen Backen mit den Kreislaufadaptern versehen wurden. Die Zustellkraft kann über eine Kraftmeßdose kontrolliert werden. Zum Beladen wird die Kammertür geöffnet und der Modul auf einen Halter gesetzt. Falls es sich um eine durch Neutronenbestrahlung stark gamma-aktivierte Probe handelt, kann dieser Vorgang mit dem Manipulator durchgeführt werden. In dieser Position wird der Schraubstock zugefahren und der Modul geklemmt, wodurch die Adapter in den Kühlkanal gepreßt werden. Durch Schließen der Tür wird die

Klemmvorrichtung in die Bestrahlungsposition geschwenkt. Nach dem durchgeführten Test werden die zwei Ventile des Kühlkreislafs geschlossen und mit Preßluft das Kühlwasser aus der Klemmvorrichtung entfernt. Der Divertormodul kann anschließend entnommen werden.

Die typische Belastungsfläche der bisher getesteten Divertormodule beträgt $25 \times 25 \text{ mm}^2$. Da in künftigen Fusionsanlagen im Normalbetrieb bis zu 20 MW/m^2 Wärmeeintrag impulsmäßig von den hochbelasteten Bauteilen aufgenommen werden müssen, entspricht dies im Test einer Belastung von $12,5 \text{ kW}$ pro Modul. Dabei betrug die Zeit bis zum Erreichen des thermischen Gleichgewichts etwa 20 sec. , für die Abkühlphase 15 sec. Für Zyklertests wird der Modul 1000 bis 10000 einzelnen Belastungsphasen ausgesetzt.

3.2.1 Temperaturmessung

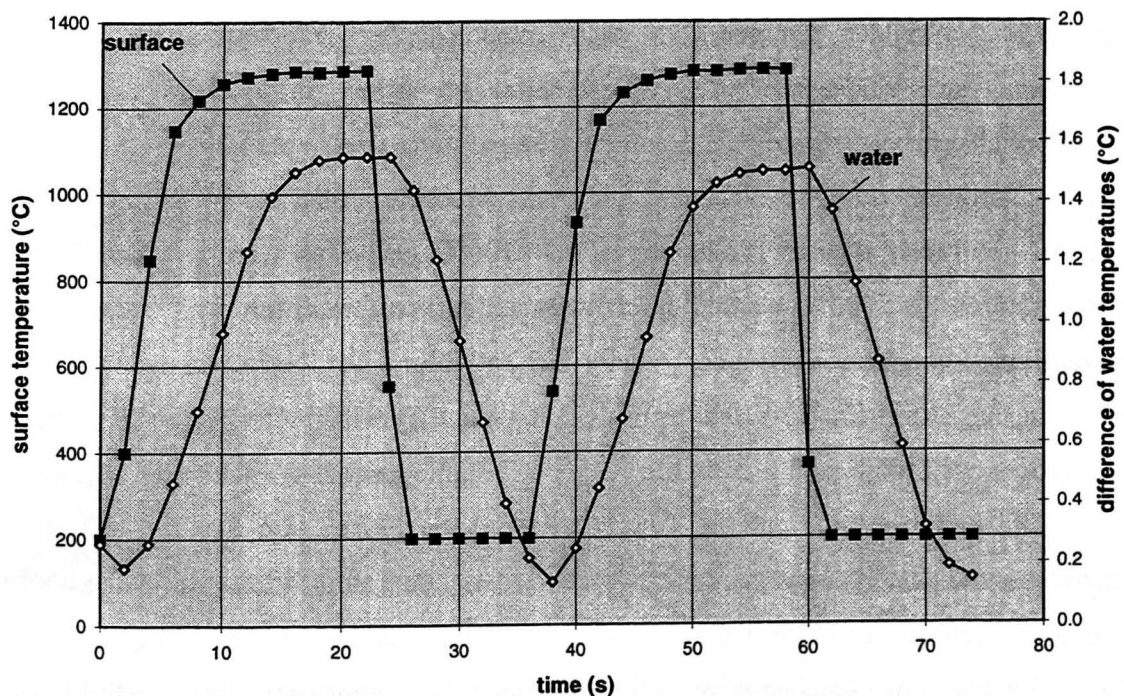


Abb. 15 Oberflächentemperatur und Kühlwassertemperatur eines aktiv gekühlten Divertormodul während eines Zyklertests

Abbildung 15 zeigt den typischen Verlauf der Belastungsphase im Rahmen eines Zyklertests. Die Oberflächentemperatur der Kachel wird mit einem Quotientenpyrometer (Meßfleckdurchmesser 5 mm) gemessen, welches an ein Datenerfassungssystem angeschlossen ist. Im Zu- und Ableitungsanschluß des Kühlwassers sind Thermoelemente installiert, mit denen die Aufheizung des Kühlwassers gemessen wird. Da zusätzlich die Durchflußrate des Kühlwassers erfaßt wird, läßt sich aufgrund der Wasserkalorimetrie der thermische Wärmeeintrag mit der elektrisch aufgebrachten Leistung vergleichen. Das Datenerfassungssystem ermittelt die während einer Belastungsphase erreichte Maximaltemperatur der Oberfläche und vergleicht diese mit der im vorherigen Zyklus erreichten Temperatur. Treten durch das Thermozyklieren Ermüdungsschäden z.B. an der Lötverbindung zwischen Kachel und Kühlkörper auf, wird die Wärmeableitung und damit die Oberflächentemperatur verändert und das Datenerfassungssystem kann einen Hinweis auf beginnende Beschädigung des Modul geben.

Als zusätzliche Oberflächendiagnose wird eine Infrarotkamera eingesetzt, mit der während des gesamten Zyklervorganges die Oberfläche des Moduls überwacht wird. Die Kamera liefert 50 Halbbilder pro sec, die nach entsprechender Bildbearbeitung auf einem Videoband aufgezeichnet werden. Sie arbeitet im nahen Infrarotbereich (maximale Empfindlichkeit bei 950 nm) und kann im Temperaturbereich oberhalb 750°C eingesetzt werden. Aufgrund der CCD-Videotechnik ist der Meßbereich auf etwa 300°C begrenzt, so daß bei geöffneter Blende Temperaturen bis 1100°C gemessen werden können. Höhere Temperaturen bis 3000°C werden durch Vorschalten von Graufiltern und Verstellung der Objektivblende erfaßt. Abbildung 16 zeigt Infrarotbilder eines Zyklerversuches mit CFC-Kacheln, die auf einen Cu-Kühlkörper gelötet waren. Die Infrarotbilder zeigen, daß eine inhomogene Lötverbindung zu entsprechend inhomogenem Wärmeableitungsverhalten führt. Die hellen Punkte auf der Oberfläche sind die Enden von Kohlenstoffasern, die vorstehen und entsprechend stärker erwärmt werden. Die Temperaturkalibrierung der Infrarotkamera erfolgt mit Hilfe des Quotientenpyrometers, indem ein gleichartiger Werkstoff in Stufen bis zum Gleichgewicht aufgeheizt wird. Das gemessene Grauwertbild wird in einem Bildverarbeitungsprozessor mit einer von 256 Farben sowie der entsprechenden Temperatur belegt (Falschfarbendarstellung).

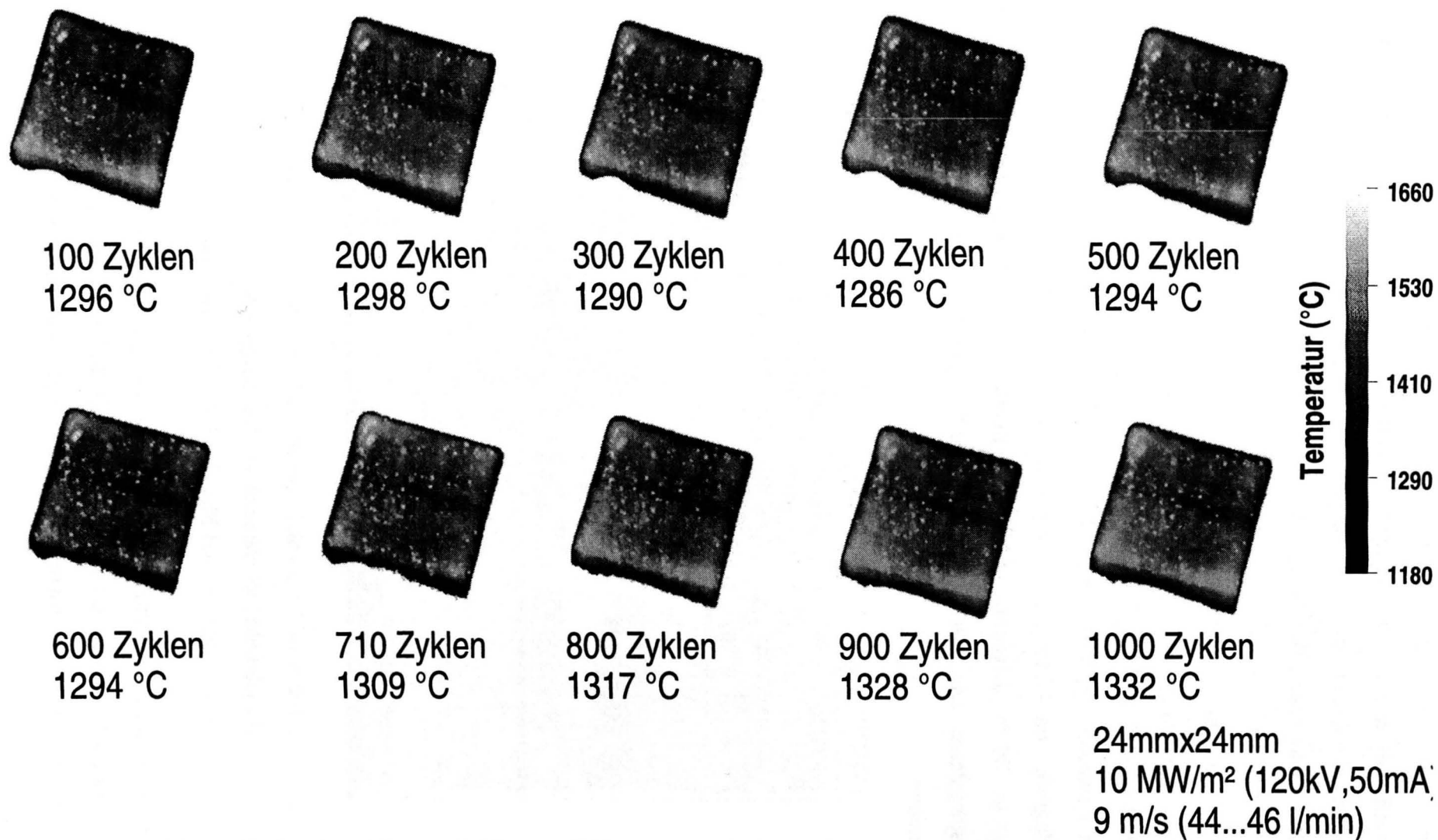


Abb. 16 Infrarot-Bilder eines Thermo-Zykliertest (Videosystem mit CCD-Bildsensor und Teleoptik)

Ergänzend zum Infrarotmeßsystem mit CCD-Videotechnik wurde ein weiteres Meßsystem beschafft, mit welchem der Temperaturbereich bis auf Raumtemperatur erfaßt werden kann. Der Temperaturbereich unterhalb 800°C ist insbesondere für Untersuchungen an Beryllium interessant. Die Anlage (AGEMA 900 SW/TE) arbeitet mit gekühltem Sensor und einer Bildauflösung von 140x128 Bildpunkten bei einer Abtastrate von 20 Hz. Da der empfindliche Infrarotbereich des Sensors zwischen 2 und 5,4 µm liegt, müssen Spezialoptiken eingesetzt werden, sowie Kammerfenster, die für diesen Spektralbereich durchlässig sind, z.B. aus Calciumfluorid. Zur Zeit stehen zwei Optiken mit 3° und 20° Öffnungswinkel zur Verfügung, die bei dem gegebenen Meßabstand von 80 cm eine Objektgröße von 4,2 cm bzw. 27 cm formatfüllend abbilden. Abbildung 17 zeigt einen aktiv gekühlten Divertormodul mit aufgelöteter Berylliumkachel während des Belastungstests. Die Kachel ist „kastelliert“, d.h. geschlitzt, um Spannungen zu minimieren.

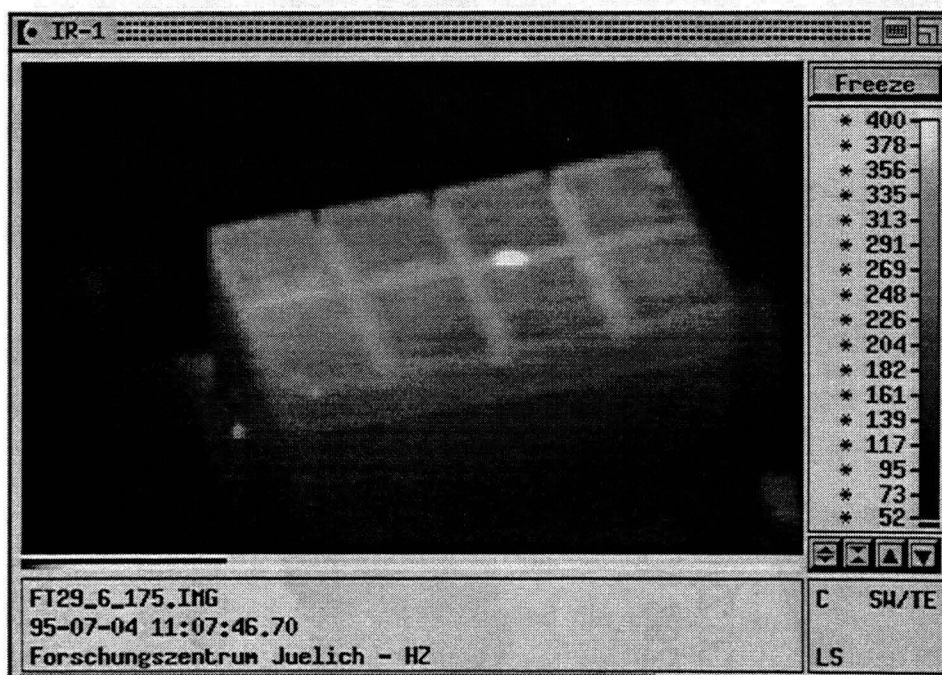


Abb. 17 Infrarot-Bild eines aktiv gekühlten Divertormoduls mit aufgelöteter Berylliumkachel während des Belastungstests
(Kamerasystem AGEMA 900 SW/TE mit Teleoptik)

Da das Meßsystem an einem schwarzen Körper geeicht wurde, muß bei der Messung von Berylliumoberflächen die entsprechende Emissivität berücksichtigt werden, um korrekte Temperaturmeßwerte zu erhalten. Die Emissivität von Komponentenoberflächen wird

außerhalb der Elektronenstrahlanlage in einem gesonderten Arbeitsschritt ermittelt. Die Komponente wird dazu in einem Ofenraum zusammen mit einem schwarzen Körper gleichmäßig erwärmt. Nach Temperatúrausgleich wird mit der Infrarotkamera ein Wärmebild aufgenommen und die Emissivität der Komponente soweit verändert, daß vom System die gleiche Temperatur wie für den schwarzen Körper ermittelt wird.

Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung der Emissivität insbesondere im höheren Temperaturbereich ($>500^{\circ}\text{C}$) besteht darin., in eine Bohrung einer Komponente ein Thermoelement einzusetzen und diese dann in der Elektronenstrahlanlage aufzuheizen. Die Komponente wird dazu Wärme-isoliert in die Vakuumkammer eingesetzt und mit der Messung nach Abschalten des Strahls begonnen. Der durch das Aufheizen bzw. Abkühlen bedingte Temperaturgradient in der Probe wird während der einsetzenden Abkühlphase vernachlässigbar klein, so daß das Thermoelement die Temperatur der Probenoberfläche angibt und eine Korrektur der Emissivität ermöglicht wird. Die in Abb. 17 gezeigte kastellierte Berylliumoberfläche zeigt in den Schlitzen eine vermeintlich höhere Temperatur, was aber ausschließlich ein Effekt höherer Emissivität analog zu einem strahlenden Hohlkörper ist.

3.2.2 Restgasanalyse (RGA)

Um mit dem Elektronenstrahl Belastungstests durchführen zu können, muß die Arbeitskammer bis zu einem Druck von $< 10^{-3}$ mbar ausgepumpt werden. Der Hauptanteil des Restgases besteht dabei aus Feuchte. Während der Wärmebelastungstests werden zusätzlich verschiedene gasförmige Stoffe aus den erhitzten Materialien freigesetzt, wobei von besonderem Interesse die Reaktion der Restfeuchte zum Beispiel mit dem CFC-Material der Kacheln ist. Bei Einsatz der Klemmvorrichtung muß zudem vermieden werden, daß zwischen Adapter und Kühlkanal ein Leck auftritt, durch das Wasser in die Kammer gelangt und den Ablauf des Versuchs stört. Für die Messung dieser Restgasanteile oder der Prüfung, daß kein zusätzliches Wasser durch Leckage hinzu kommt, eignet sich in besonderer Weise ein Quadrupol-Massenspektrometer, welches an die Arbeitskammer angeflanscht wurde. Das Spektrometer (Transpector-Leybold) ist geeignet, die Massen von 1 bis 100 zu separieren und den zeitlichen Verlauf der verschiedenen Gaskonzentrationen an das Datenerfassungssystem weiterzugeben.

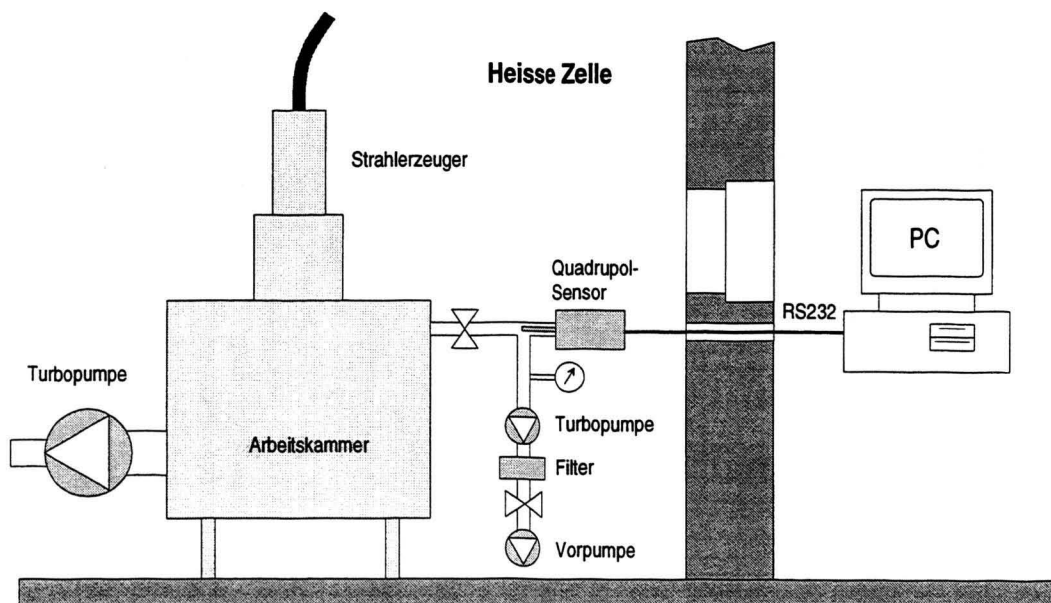


Abb. 18 Anschluß des Quadrupol-Massenspektrometers zur Restgasanalyse

Abbildung 18 zeigt den Anschluß des Quadrupol-Massenspektrometers zur RGA und Abbildung 19 ein typisches Ergebnis eines mit CFC-Kachel bestückten Moduls während eines Zyklertests. Es ist zu erkennen, daß durch die Wärmeausdehnung des Divertormoduls während der Belastungsphase kein zusätzliches Leck zwischen Adapter und Kühlkanal entsteht, wohl aber der in der Arbeitskammer vorhandene Restfeuchtegehalt in Verbindung mit Kohlenstoff mehr Wasserstoff, Kohlenwasserstoffe und Kohlendioxid entstehen läßt. Außer der Kenntnis der freigesetzten Gase ist dabei von besonderem Wert, daß ein Versagen des Dichtungssystems frühzeitig durch den Anstieg des H_2O -Partialdrucks erkannt werden kann.

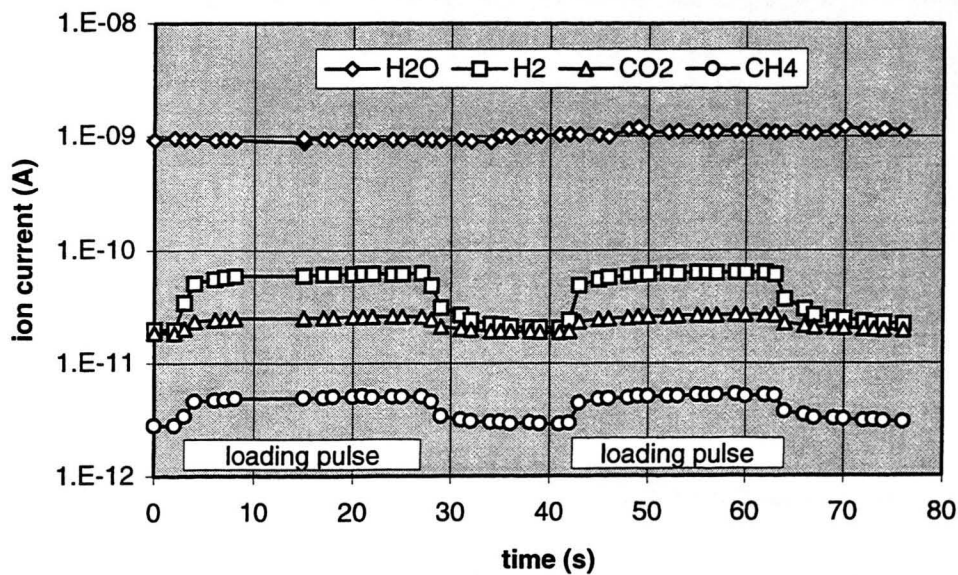


Abb. 19 Restgasanalyse eines mit CFC-Kachel bestückten Moduls während eines Zyklertests

3.2.3 Keramografie und Metallografie

Die Nachuntersuchung belasteter Proben soll Aufschluß über Art und Umfang der Materialschädigung ergeben. Bei Zyklertests an aktiv gekühlten Bauelementen ist davon auszugehen, daß die wesentliche Beschädigung des Bauteils in den Materialübergängen d.h. in den Lötsschichten liegt. Um diese Schäden beurteilen zu können, muß das

Divertorelement zertrennt, die entsprechende Stelle geschliffen, poliert und mit dem optischen oder dem Rasterelektronen-Mikroskop betrachtet werden. Diese Arbeiten können an radioaktiven Materialien auch fernbedient in einer abgeschirmten Metallografie-Zelle durchgeführt werden. Abbildung 20 zeigt ein typisches Bild eines belasteten Moduls und zwar die Lötverbindung zwischen einer CFC-Kachel und einem TZM-Kühlkörper. Deutlich erkennbar ist die durch den Zyklertest entstandene Verformung innerhalb des Lotes sowie beginnende Rißbildung.

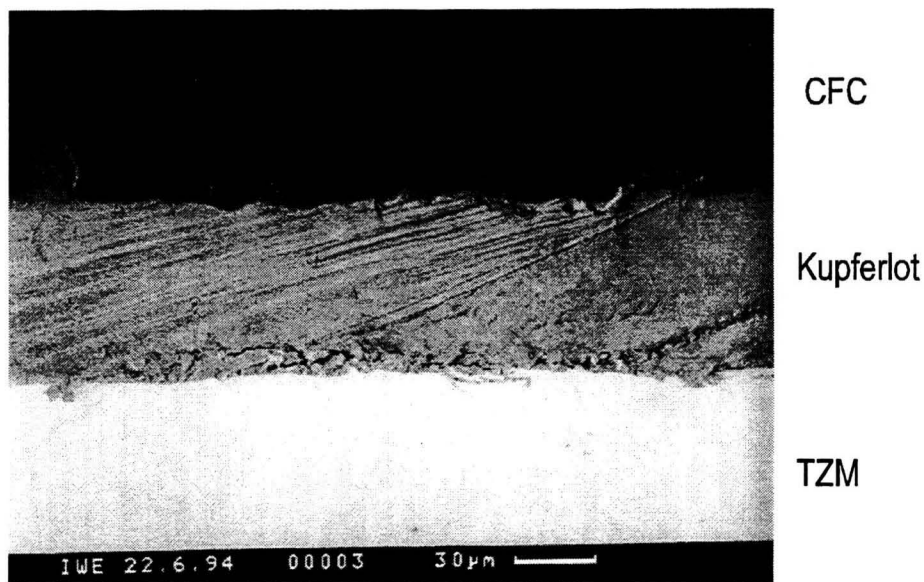


Abb. 20 Metallografisches Schliffbild eines thermisch belasteten Moduls

Bei Thermoschocktests wird die Oberfläche der Probe durch Erosion, Aufschmelzen oder Rißbildung verändert, dabei liegt das hauptsächliche Interesse der Nachuntersuchung in der Quantifizierung des Materialverlusts und in der Charakterisierung der Oberflächenschädigung. Wesentliche Untersuchungsmethoden sind daher die Bestimmung der Gewichtsabnahme und die Oberflächenanalyse mittels Mikroskop und Profilometer. Abbildung 21 zeigt ein typisches Bild eines Thermoschocktests auf einer Berylliumoberfläche. Die Belastungszone von $5 \times 5 \text{ mm}^2$ zeigt nach mehrfacher Belastung mit $2,4 \text{ MJ/m}^2$ (in 5 ms) Materialaufschmelzung und Rißbildung, wobei die rechteckige Belastungszone durch die Strahlrasterung erzeugt wird.

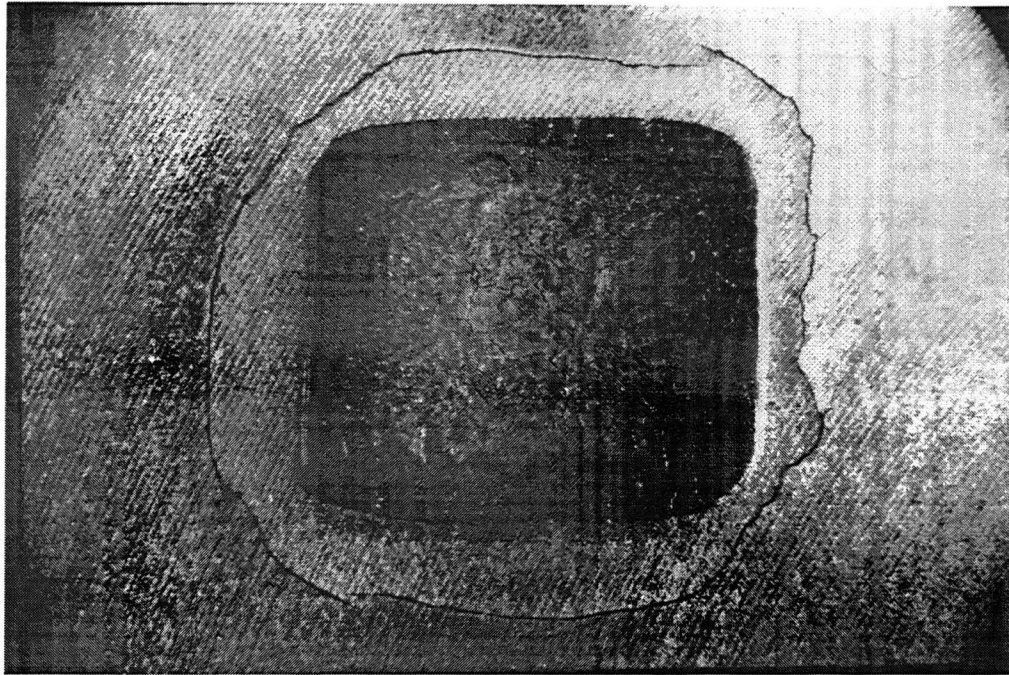


Abb. 21 Oberfläche einer Berylliumprobe nach einem Thermoschocktest (mehrfache Belastung bei 2.4 MJ/m^2)

3.2.4. Profilometrie

Die Profilometrie erlaubt die Erfassung der Oberflächentopografie einer Materialprobe. Mittels eines Scanning-Laserprofilometers können sowohl Linienprofile als auch Flächenprofile berührungslos erstellt werden. Dabei wird die Oberfläche der Probe mit einer Auflösung von typischerweise 10 bis 100 Meßpunkten pro mm abgerastert. Das berührungslose Meßverfahren erlaubt auch den problemlosen Umgang mit Proben der Gefahrstoffklasse. Damit können Volumenzu- und Abnahme, Kraterbildung sowie bei Metallproben die Ausbildung von Schmelzrändern an der Probenoberfläche quantifiziert werden.

Abbildung 22 zeigt eine 3-D-Darstellung eines typischen Thermoschocktests auf einer Berylliumprobe mit der Ausbildung von Schmelzrändern. In den Abbildungen 23 und 24 sind typische Linienprofile gezeigt.

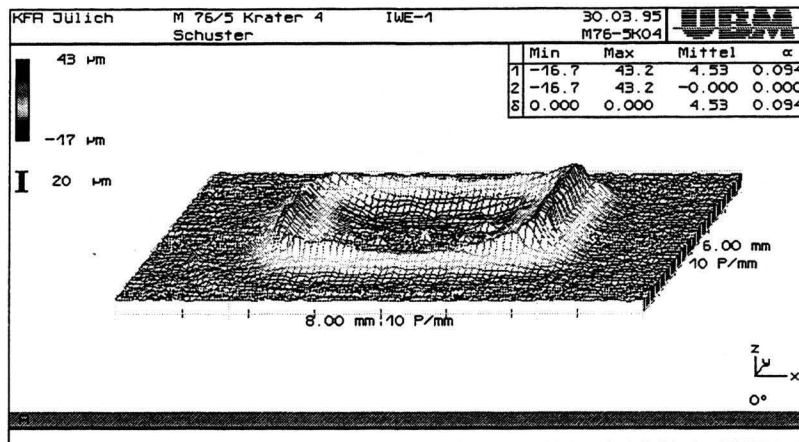


Abb. 22 3-D-Darstellung des Oberflächenprofils einer Berylliumprobe nach einem Thermoschocktest

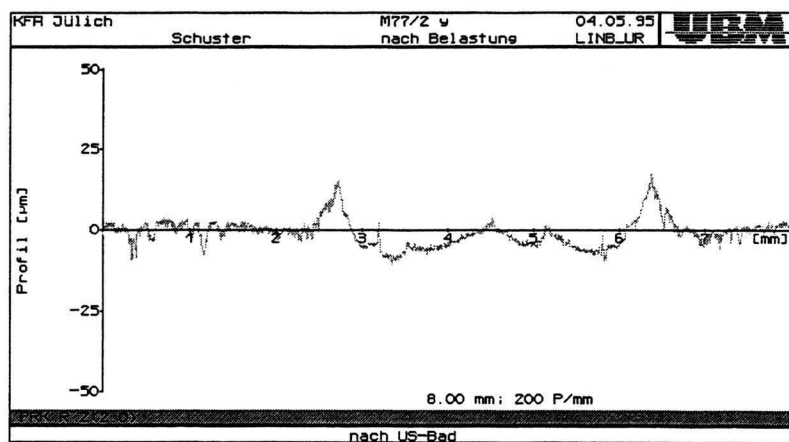


Abb. 23 Typisches Linienprofil in x-Richtung von der Oberfläche einer Berylliumprobe nach einem Thermoschocktest

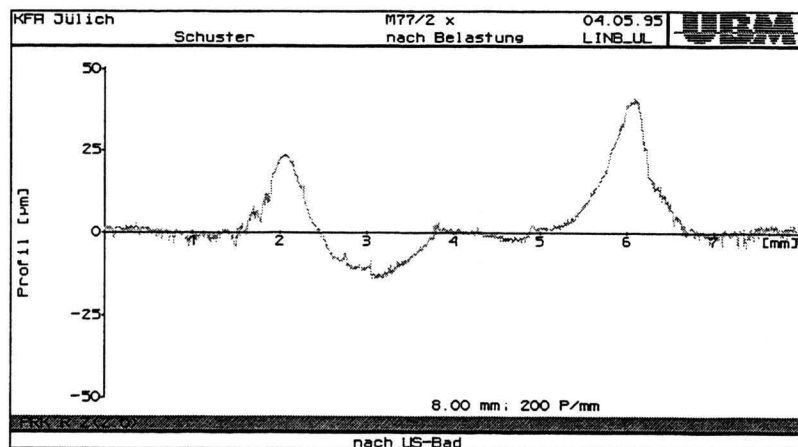


Abb. 24 Typisches Linienprofil in y-Richtung von der Oberfläche einer Berylliumprobe nach einem Thermoschocktest

3.2.5 Rechnerische Simulation von Wärmebelastungstests

Die an verschiedenen Divertorkonstruktionen durchgeführten Belastungstests können durch Modellrechnungen simuliert werden. Ziel der Berechnungen ist es, für die unterschiedlichen Divertormaterialien und Bauformen einen Datensatz zu erhalten, mit dem Temperaturverteilung und mechanische Zug- und Druckverteilung während der Belastungsphase beschreibbar sind. Die Berechnungen werden mit dem Finite-Elemente-Programm „ABAQUS“ durchgeführt, das auf dem zentralen CRAY-Rechner der KFA installiert ist. Abbildung 25 zeigt ein typisches Beispiel der berechneten Temperaturverteilung über den Querschnitt eines Divertormodules, wobei insbesondere der starke Temperaturgradient zwischen Ziegeloberfläche und Kühlkanal und die daraus resultierende mechanische Verformung (vergrößert dargestellt) von Interesse sind. In Ergänzung dazu stellt Abbildung 26 den zeitlichen Verlauf der Belastungsphase an der Ziegeloberfläche während eines Zyklertests dar, wobei der berechnete und der gemessene Verlauf, sowie die aufgebrauchte elektrische Leistung dargestellt sind.

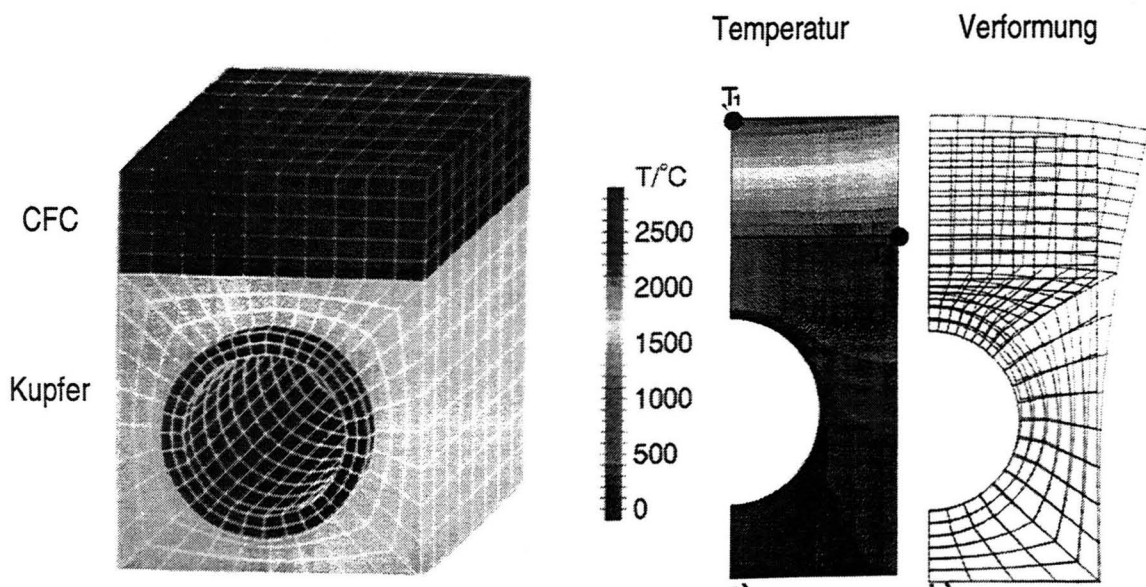


Abb. 25 Berechnete Temperaturverteilung und Verformung eines thermisch belasteten Moduls

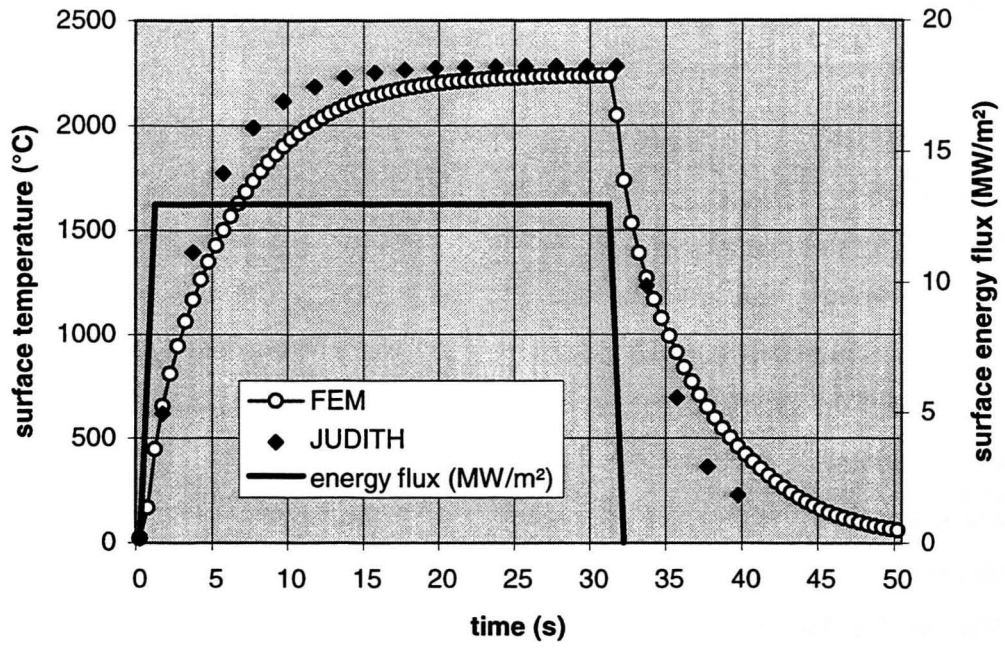


Abb. 26 Berechneter und gemessener Temperaturverlauf an der Oberfläche eines thermisch belasteten Moduls

4. Sicherheitsvorkehrungen und Verriegelungen

Für die Sicherheitsvorkehrungen gibt es drei Unterteilungen, und zwar:

- Schutz des Personals
- Schutz der Anlage bei technischem Versagen oder Fehlbedienung
- Vermeiden von Probenüberbelastung

4.1. Schutz des Personals

Bei Betrieb und Wartung der Anlage muß gemäß der Röntgenverordnung, der Strahlenschutzverordnung und der Gefahrenstoffverordnung vorgegangen werden. Da die Anlage in einer Heissen Zelle aufgestellt ist, ist die Abschirmung der während des Betriebes erzeugten Röntgenstrahlung bereits vorhanden. Eine elektrische Verriegelung der Zellentür gewährleistet zudem, daß der Strahl nur bei geschlossener Tür eingeschaltet werden kann. Die Strahlenschutzverordnung ist insbesondere dann zu beachten, wenn Wartungsarbeiten an der Anlage durchgeführt werden oder radioaktive Proben gehandhabt werden. Hier wird nach Messung der Probenaktivität und der Kontamination entschieden, welche Schutzmaßnahmen zu treffen sind. Das gleiche Verfahren wird beim Umgang mit Materialien angewandt, die der Gefahrenstoffklasse unterliegen wie z.B. Beryllium. Als Schutzmaßnahmen kommen Schutzkleidung, Atemmaske sowie Fernbedienung in Betracht.

4.2 Anlagenschutz

Die wesentlichen Schutzvorrichtungen der Elektronenstrahlanlage bestehen aus der Notabschaltung der Hochspannung während des Betriebes und aus der Einschaltsperrung für Hochspannung und Strahlstrom bei nicht erfüllten Arbeitsbedingungen. Die Vorbedingung für das Einschalten von Strom und Hochspannung ist, daß die Türen der Zelle und der

Arbeitskammer geschlossen sind, daß im Strahlerzeugerraum und in der Arbeitskammer das vorgegebene Mindestvakuum herrscht und daß die Kühlwasserversorgung für die Pumpen vorhanden ist.

Die Hochspannungsversorgung der Elektronenstrahlanlage entspricht den Sicherheitsstandards nach VDE 0100,0113. Die elektrische Sicherheit wird über die beschriebenen Maßnahmen hinaus sowohl durch zusätzliche elektronische Einrichtungen wie auch im Störfall durch elektrische Schaltgeräte gewährleistet. Im Einzelnen sind das:

1. *Elektronische sekundäre Überstrom-Überwachung*

Beim Auftreten eines sekundären Überstroms von mehr als 10% des vorgewählten Strahlstroms erfolgt die Abschaltung der Hochspannung innerhalb von 100 ms über das Hochspannungsschutz

2. *Primäre elektronische Strombegrenzung*

Beim Auftreten eines primären Überstroms von 10% wird die Hochspannung auf Null geregelt.

3. *Halbleitersicherung für den primärseitigen Thyristorsteller*

Beim Auftreten eines primären Überstroms, der nicht elektronisch erkannt wurde, sprechen die Sicherungen an und schalten die Hochspannung primärseitig ab.

4. *Übertemperatur der Thyristorsteller*

Über einen Temperaturkontakt wird die Hochspannung bei Übertemperatur der Thyristorsteller abgeschaltet.

5. *Motorschutzschalter*

Bei Überstrom und Kurzschluß der Hochspannungsversorgung erfolgt die Abschaltung in der Drehstrom-Zuleitung. Diese Überwachung ist redundant und spricht erst an, wenn die elektronischen Überwachungen gestört wären.

6. *Temperaturüberwachung im Hochspannungstank*

Die Temperaturüberwachung reagiert bei einer Öltemperatur von 70°C mit einer Alarmmeldung am Bedienpult der Anlage und bei 85°C mit Abschaltung der Hochspannung bei gleichzeitiger Erdung. Die Funktion des Temperaturschalters wird ständig überwacht und bei Störung gemeldet. Über einen zweiten Temperaturfühler wird die Temperatur des Hochspannungstanks ständig am Bedienpult angezeigt.

Die Hochspannung wird automatisch abgeschaltet, wenn während des Betriebes der Druck in der Arbeitskammer über 10^{-3} mbar ansteigt, der Strahl zu stark abgelenkt wird und dabei die Anodenplatte oder ein Schutzblech trifft oder das Vakuumsystem der Kammer ausfällt. Da die Belastungstests mittels Videokamera grundsätzlich nur unter Sichtkontrolle gefahren werden, kann bei außergewöhnlichen Vorkommnissen die Hochspannung manuell durch einen Not-Aus-Schalter abgeschaltet werden. Die Not-Aus-Schaltung bewirkt, daß im Hochspannungstank die Versorgungsspannung abgeschaltet und der Hochspannung führende Teil ohne Verzögerung durch einen Schalter geerdet wird.

4.3 Probenüberbelastung

Während eines Belastungstests, sei es ein Zyklertest oder ein Thermoschocktest, wird stets visuell begutachtet, ob die Belastungsgrenze der Probe erreicht ist. Im Falle von Zyklertests an Divertorelementen wird angestrebt, wenigstens 1000 Belastungswechsel durchzuführen, d.h. es muß nach jeder Belastungsphase beurteilt werden, ob das Wärmeableitungsverhalten des Bauteils konstant geblieben ist. Aus diesem Grund wird mit dem Pyrometer die Oberflächentemperatur im Zentrum der Kachel gemessen und mit Hilfe eines Datenerfassungssystems die maximal erreichte Temperatur gespeichert. Während eines Zyklertests läßt sich aus den jeweils gemessenen Maximaltemperaturen eine Kurve erstellen, deren Verlauf sehr zuverlässig das Verhalten des Bauelementes beurteilen läßt. Bei einem beginnenden Schaden verändert sich die Maximaltemperatur und das Datenerfassungssystem kann eine Alarmfunktion ansprechen.

5. Weitere Arbeiten

Die Anpassung der Anlage an neue Testaufgaben ist relativ leicht durchzuführen mit der Einschränkung, daß der Belastungsbereich nicht wesentlich über 10x10 cm² erweitert werden kann. Für unterschiedliche Probengeometrien stehen entweder der xy-Tisch, ein seitlich angeordneter Kammerflansch mit einem Durchmesser von 150 mm oder eine Spezialhalterung an der Kammertür zur Verfügung.

Im Weiteren ist geplant, die im Rahmen von Thermoschocktests freigesetzten ionisierten Teilchen von reflektierten und emittierten Elektronen durch Magnetfeldeinfluß zu trennen, das elektrische Signal der auf eine Elektrode treffenden ionisierten Teilchen zu messen, um daraus Informationen über erosiv bedingten Masseverlust zu erhalten.

Literaturverzeichnis

- /1/ R. Duwe, W. Kühnlein, H. Münstermann
The new electron beam facility for materials testing in hot cells -JUDITH-
18th Symp. on Fusion Technology,
SOFT, Karlsruhe 1994

- /2/ S. Tanaka, M. Akiba et al.
Design and experimental results of a new electron gun using a magnetic multipole
plasma generator,
JEBIS, Rev.Sci.Instr. 62(3), March 91

- /3/ M. Febvre et al.
Disruption like heat load tests with EB200 test facility,
SOFT, Karlsruhe 1994

- /4/ V. Engelko et al.
Test of divertor materials under simulated ITER plasma disruption conditions at the
SOM electron beam facility,
SOFT, Karlsruhe 1994

- /5/ „Magnetic fusion energy program“
Annual Report 1989, Sandia National Lab.

- /6/ P. Valentine et al.
Boron carbide based coatings on graphite for plasma facing components,
ICFRM-6, Stresa 1993

- /7/ J. van der Laan et al.
Plasma sprayed boron carbide coatings for first wall protection in ITER,
ECN-Report ECN-RX-93-120, 1993

- /8/ J. Linke et al.
Evaluation of cooling concepts and specimen geometries for high heat flux tests on
neutron irradiated divertor elements,
3rd International Symp. on Fusion Nucl. Techn., Los Angeles 1994

- /9/ S. Barabash et al.
Thermocyclic tests of RG-Ti/Mo monoblock divertor modules
J. Nucl. Mater. 212-215 (1994)
- /10/ G. Breitbach, U. Wolf, S. Deschka, H. Nickel
Thermomechanical analysis of an actively cooled divertor mock up
Jahrestagung Kerntechnik 1992, Karlsruhe

Jül-3183
Januar 1996
ISSN 0944-2952