



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH
GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG
Institut für Technische Physik

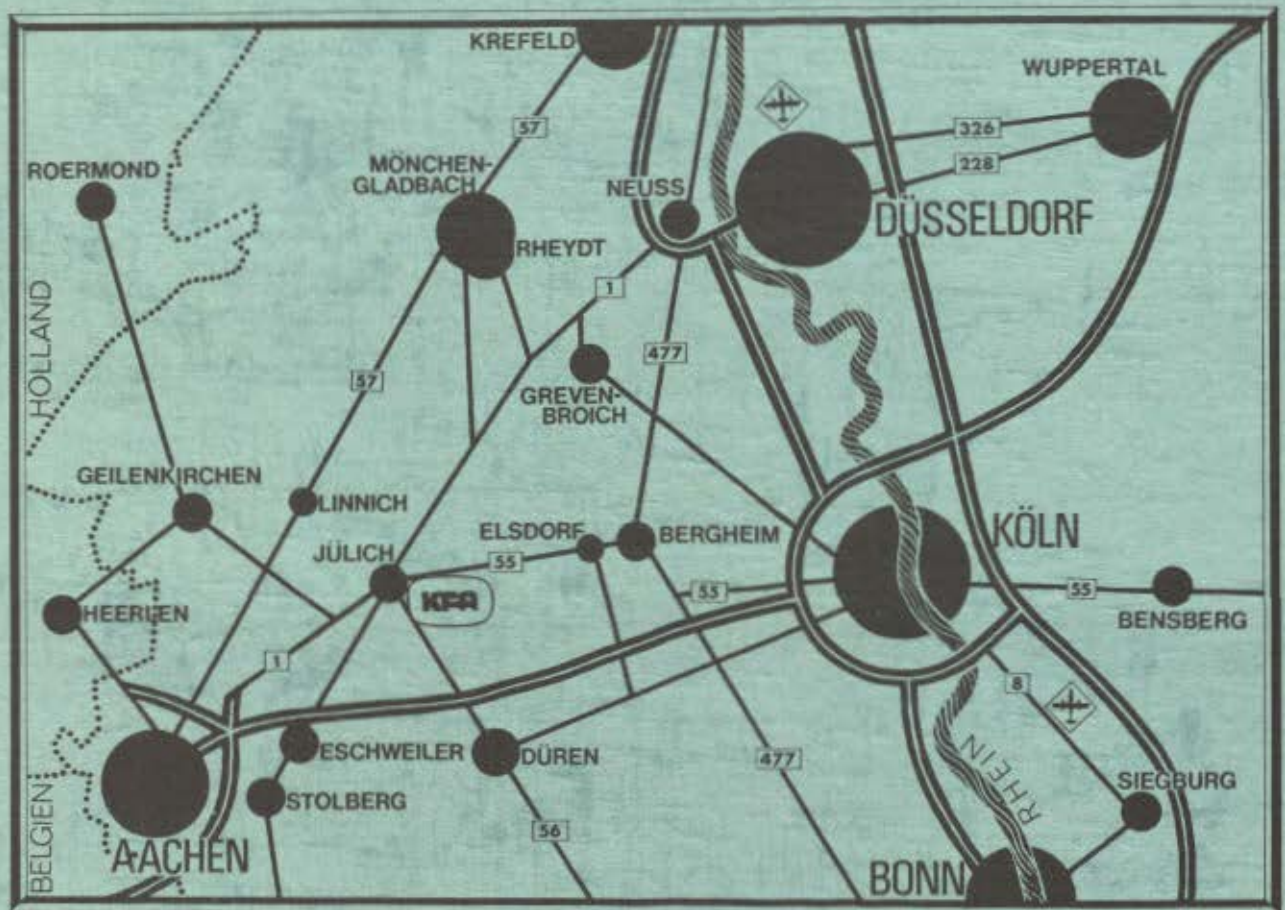
Bau einer thermionischen Diode mit Wärmerohrkollektor

von

W. Erley, S. Lehwald

Jül - 1072 - TP
Mai 1974

Als Manuskript gedruckt



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 1072
 Institut für Technische Physik Jül - 1072 - TP

Dok.: Thermionic Diodes
 Heat Pipe

Im Tausch zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
 Jülich, Bundesrepublik Deutschland



Bau einer thermionischen Diode mit Wärmerohrkollektor

von

W. Erley, S. Lehwald

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
A. Einleitung	1
B. Konstruktion und Bau der Experimentierdiode	3
1. Allgemeine Beschreibung	3
2. Emitterteil	6
3. Kollektorteil	8
4. Diodengehäuse	14
5. Cäsiumreservoir	15
6. Gesamtaufbau der Experimentierdiode	17
7. Elektrischer Meßkreis zur Aufnahme der Strom-Spannungskennlinien	19
C. Test der Komponenten und der Diode	21
1. Test der Kollektor-Wärmerohr-Einheit	21
2. Test der Diode	24
D. Störfall und Nachuntersuchung des Kollektors	25
E. Schluß	31
Literaturverzeichnis	32
Verzeichnis der Abbildungen	33

A. Einleitung

Als ein Beitrag zum Incore-Thermionik-Reaktor (ITR)-Projekt der Bundesrepublik Deutschland wurden im Institut für Technische Physik (ITP) der Kernforschungsanlage Jülich in den Jahren 1968-1972 Grundlagenforschungsarbeiten durchgeführt, die unter anderem die Verbesserung des Wirkungsgrades von thermionischen Dioden zum Ziel hatten /1,2/.

Der Wirkungsgrad einer thermionischen Diode wird von der Emitter- und Kollektoraustrittsarbeit, vom Cäsiumplasma, von den Elektrodentemperaturen und von dem Elektrodenabstand bestimmt. Die einzelnen Einflüsse dieser Parameter auf die Strom-Spannungs-Kennlinie sind jedoch nur schwer interpretierbar.

Als Ergänzung zu den Grundlagenarbeiten ist es daher notwendig, Strom-Spannungskennlinien an Experimentierdioden aufzunehmen, um die Frage zu klären, ob eine bestimmte Änderung eines Diodenparameters den gewünschten Effekt auf die Leistungsabgabe der Diode hat.

In der Literatur ist eine Reihe verschiedenster Dioden beschrieben, z.B. /3,4,5/, die alle für bestimmte Versuchsziele konzipiert und daher für andere Versuchsserien nicht optimal einzusetzen sind. Aus dem Ziel unserer Versuche, den Einfluß der Kollektoraustrittsarbeit auf die Diodenkennlinien zu untersuchen, ergab sich die Forderung nach der Auswechselbarkeit des Kollektors, der exakten Einstellung der Kollektortemperatur und der Änderung des Elektrodenabstandes.

Als im Jahre 1969 Dr. W.A. Ranken von den Los Alamos Scientific Laboratories für ein Jahr als Gastwissenschaftler zum ITP kam, wurde im ITP begonnen, nach seinen Entwürfen eine geeignete Experimentierdiode zu konstruieren und zu bauen. Damit bot sich gleichzeitig die Möglichkeit von W.A. Ranken's technologischem Wissen auf diesem Gebiet zu lernen.

Die Arbeiten an der Experimentierdiode wurden, nachdem das

ITR-Projekt eingestellt worden war, Anfang 1973 abgebrochen. In diesem Abschlußbericht soll über die Konstruktionsmerkmale der Diode, sowie über die Erfahrungen bei ihrem Zusammenbau und dem Test der Einzelkomponenten berichtet werden. Bei Abbruch der Arbeiten war die Testdiode prinzipiell betriebsbereit.

B. Konstruktion und Bau der Experimentierdiode

1. Allgemeine Beschreibung

Abb. 1 zeigt eine Schnittzeichnung der Diode, Abb. 2a zeigt die Einzelkomponenten und Abb. 2b die zusammengesetzte Diode.

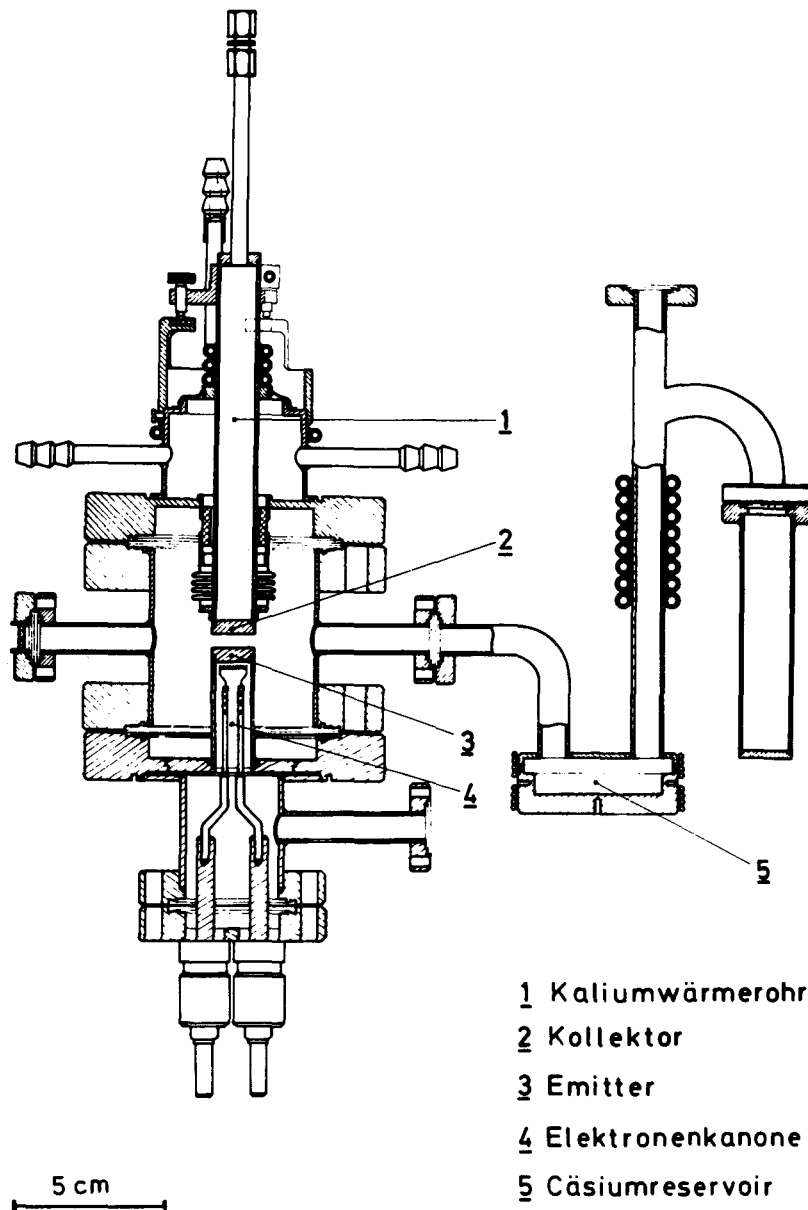


Abb. 1 Schnittzeichnung der Experimentierdiode

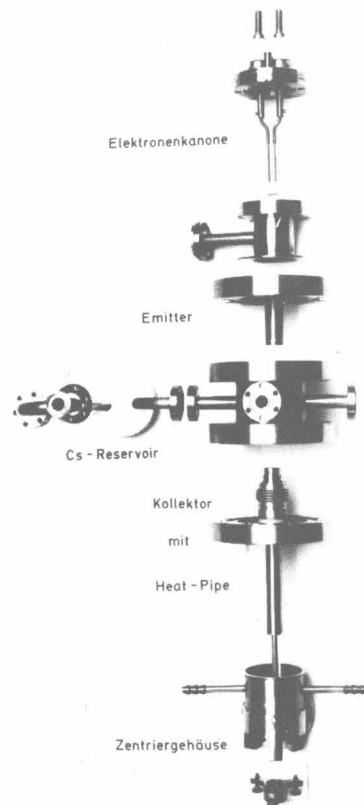


Abb. 2a Experimentierdiode, Einzelkomponenten

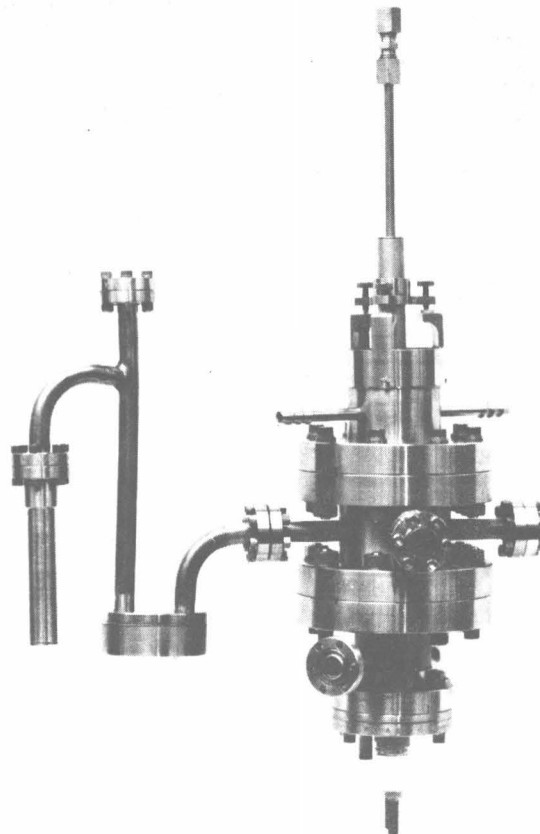


Abb. 2b Experimentierdiode, zusammengesetzt

Es handelt sich um eine thermionische Diode mit planparallelen Elektroden und mit variablem Elektrodenabstand. Durch die gewählte Konstruktion und die Verwendung von UHV-Flanschen sind der Emitter- und Kollektorteil relativ einfach auswechselbar. Der Emitter, der mit dem Diodengehäuse auf gleichem Potential liegt, wird mittels einer Elektronenkanone geheizt. Der Kollektor ist als Kalium-Wärmerohr ausgelegt, um eine ausreichende Kühlung zu gewährleisten und um die Kollektortemperatur einfach und genau einstellen zu können. Der Kollektor ist durch eine Metallkeramikverbindung vom Diodengehäuse elektrisch isoliert und kann in axialer Richtung bewegt werden.

Die Abnahme des Diodenstromes erfolgt an der Kühlschlange des Kalium-Wärmerohres und am Emitterflansch.

Die Diode wird mit Cäsiumdampf im Druckbereich von einigen Torr betrieben. Das bedeutet, daß alle verwendeten Materialien bis zu Temperaturen von etwa 400°C cäsiumbeständig sein müssen. Die Diode arbeitet wegen der besseren Zugänglichkeit nicht in einem Schutzvakuum, sondern bei Atmosphärenaußendruck, weshalb der ständige Anschluß einer Ionengetterpumpe notwendig ist.

Der Emitter besteht aus Molybdän, der erste eingebaute Kollektor aus Nickel. Alle anderen Bauteile der Diode bestehen aus Edelstahl 4541. Schweißungen wurden entweder als Elektronenstrahl- oder als Argon-arc-Schweißungen ausgeführt (Zentralinstitut für Reaktorexperimente der KFA Jülich).

2. Der Emitterteil

Der Emitterteil der Diode ist in Abb. 3 dargestellt.

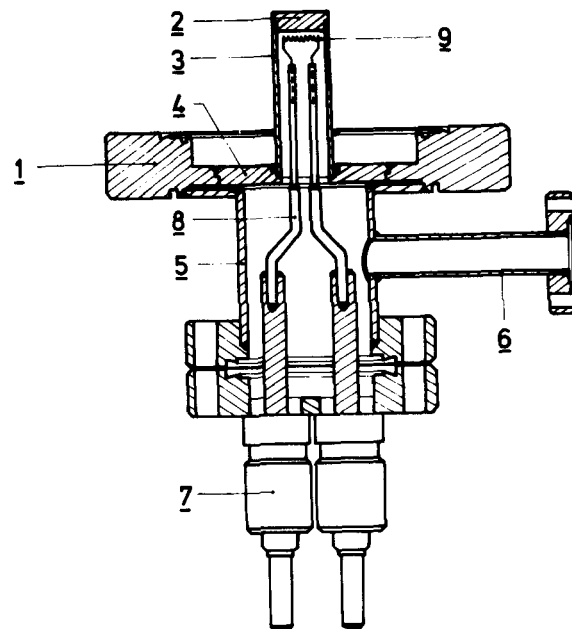


Abb. 3 Schnittzeichnung des Emitterteils

Er ist auf einem 4"-UHV-Flansch 1 aufgebaut. Der eigentliche Emittor besteht aus einer hochreinen Molybdänscheibe 2 (Fa. Climax) von 16,5 mm Durchmesser. Die Oberfläche wurde metallographisch geschliffen und poliert. Diese Molybdänscheibe ist auf ein TZM-Rohr 3 von 1 mm Wandstärke durch Elektronenstrahlschweißung aufgesetzt. Das TZM-Rohr (Molybdän mit 0,5 % Titan und 0,08 % Zirkon, Fa. Radium) ist mit einem Palladium-Nickel-Lot (PN1 der Fa. Degussa, 60 % Pd-40 % Ni) in eine Vacon-10-Scheibe 4 eingelötet. Silberhaltige Lote können bei der hohen Betriebstemperatur der Diode wegen des hohen Silberdampfdruckes nicht verwendet werden. Die Vacon-10-Scheibe ist in den UHV-Stahlflansch eingeschweißt (Elektronenstrahlschweißung). Diese Verbindungstechnik wurde gewählt, weil Elektronenstrahl-Schweißversuche mit Molybdän/Stahl und TZM/Stahl keine vakuumdichten Schweißnähte geliefert hatten. Es wa-

ren stets nahe der Schweißnaht feine Risse im Mo bzw. TZM aufgetreten. Der fertig eingelötete und -geschweißte Emitter ist in Abb. 4 zu sehen.

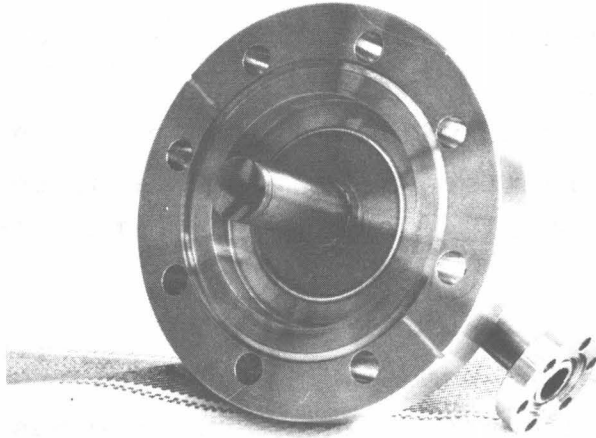


Abb. 4 Emitter, in UHV-Flansch eingeschweißt bzw. gelötet

Zur Abnahme des Diodenstromes wurden an den acht Dichtungsschrauben des Emitterflansches 1 acht Kupferlaschen angebracht.

Der Emitter wird durch eine 2-kW-Elektronenkanone geheizt. Hierzu ist auf der Außenseite des 4"-Flansches ein Stahlrohr mit einem 2 3/4"-UHV-Flansch aufgeschweißt 5 (Abb. 3). Das Rohr besitzt noch ein seitliches Ansatzrohr von 12 mm Durchmesser mit einem Miniconflat-Flansch 6 zum separaten evakuieren des Elektronenkanonenraumes. Die Elektronenkanone selbst ist aus einer UHV-Hochstromdurchführung 7 aufgebaut. In die Kupferstäbe der Durchführung sind Tantalstäbe 8 eingepaßt, in denen vorne die Wolframdrahtwendel 9 steckt. Zur Beobachtung der Wendel ist ein Saphirfenster (1/4"Ø) in den Durchführungsflansch eingeschweißt. Die Elektronenkanone ist über die Hochspannung (0-2 kV) und den Emissionsstrom (0-1A) leistungsgeregelt (Versorgungsgeräte von der Fa. BBC).

3. Der Kollektorteil

Zwei wesentliche Forderungen, die an die Testdiode und dabei speziell an den Kollektor gestellt wurden und bei der Planung berücksichtigt werden mußten, waren folgende:

1. Die Kollektortemperatur muß unabhängig von den anderen Parametern einstellbar sein und
2. der Kollektor muß gegenüber dem mit dem Diodengehäuse fest verbundenen Emitter verschiebbar sein, so daß der Spaltabstand zwischen Emitter und Kollektor einstellbar ist.

Die Forderung nach einer unabhängigen Einstellung der Kollektortemperatur wurde durch die Verwendung eines Wärmerohres ("heat pipe") erreicht /6/. Eine Schnittzeichnung des Kollektor-Wärmerohres ist in Abb. 5 wiedergegeben.

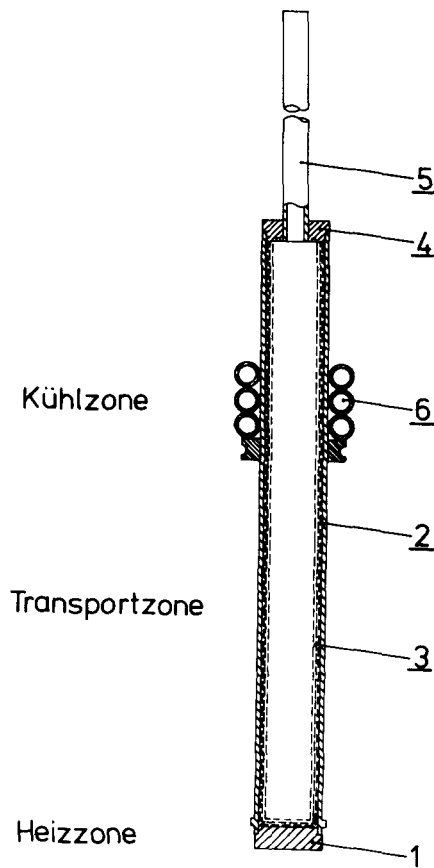


Abb. 5 Kollektor mit Kaliumwärmerohr

Für die zunächst vorgesehenen Versuche wurde der Kollektor 1 aus Reinstnickel gefertigt, da für dieses Material bereits Meßergebnisse vorlagen. Das Wärmerohr 2 besteht im wesentlichen aus einem Stahlrohr (V2A 4541, 142 mm Länge, 16 mm Außendurchmesser, 1 mm Wandstärke), dessen Innenseite von drei Schichten feinem Drahtgewebe bedeckt werden (Chrom-Nickel-Stahldraht, 5 CrNiMo 1810, Dürener Metallfabrik, Drahtstärke 0,1 mm, Maschenweite 0,15 mm, Zusammensetzung: 17,5 % Cr, 11,5 % Ni, 2,3 % Mo).

Das Drahtgewebe wurde zunächst auf einem Kupferkern von solchem Durchmesser gewickelt, daß der Außendurchmesser des Kupferkernes einschließlich der drei Gewebelagen genau dem Innendurchmesser des Stahlrohres entsprach. Die übereinanderliegenden Gewebesichten wurden durch Reihen von Elektropunktschweißungen längs der Achse (Abstand der Schweißpunkte: 7 mm) miteinander verbunden. Die nächste Reihe von Punktschweißungen auf der Manteloberfläche erfolgte in 7 mm Abstand, so daß die Dichte der Schweißpunkte bei etwa 1 pro 50 mm² lag. Der Kupferkern wurde samt Drahtgewebe in das Stahlrohr eingeführt (Preßsitz) und anschließend unter Zurücklassung des Drahtgewebes 3 wieder entfernt. Nachdem auch der Nickel-Kollektor mit 3 Gewebesichten versehen worden war, wurde er so mit dem einen Ende des Stahlrohres verschweißt (Elektronenstrahlschweißung), daß das Drahtgewebe des Rohres und dasjenige des Kollektors guten Kontakt hatten. Das andere Ende des Rohres wurde mit einem Stahldeckel 4 verschlossen, in welchen noch ein Zuführungsrohr 5 von 6 mm Durchmesser eingeschweißt war. An diesem Ende des Wärmerohres wurden auch die Wasserkühlschlangen aus Kupfer 6 durch Hartlöten angebracht.

Um das Wärmerohr funktionstüchtig zu machen, müssen dessen mit Drahtgewebe ausgekleideten Innenwandungen mit einem flüssigen Wärmeträger gesättigt werden. Hier wurde wegen des gewünschten Kollektortemperaturbereiches Kalium als

Wärmeträgermaterial gewählt.

Wird nun der Kollektor erhitzt (Heizzone), so verdampft ein Teil des Wärmeträgers aus dem Drahtgewebe, strömt axial durch das Rohr (Transportzone) bis zur Kühlzone, wo er an den Wänden kondensiert und die Verdampfungswärme an den Kühlkreislauf abgibt. Die Kapillarkräfte im Drahtgewebe sorgen nun dafür, daß das Kondensat wieder zum Kollektor transportiert wird, wo der Zyklus erneut beginnt. Die Wärmemengen, die auf diese Weise transportiert werden, übersteigen diejenigen, die durch einen massiven Kupferstab von gleichen Dimensionen transportiert werden, um das 10.000fache, wobei der Temperaturgradient entlang der Transportzone äußerst gering ist. Tabelle 1 zeigt typische Daten verschiedener Wärmeträger /7/.

Tabelle 1:

Wärmeträger	axiale Wärmestromdichte [W/cm ²]	radiale Wärmestromdichte [W/cm ²]	Temperatur [°C]
NH ₃	200 bis 400	5 bis 15	20 bis 40
H ₂ O	1000 bis 1500	25 bis 50(100)	140 bis 180
K	3000 bis 5000	150 bis 250	700 bis 750
Na	5000 bis 7000	200 bis 400	850 bis 950
Li	12000 bis 15000		1400 bis 1600

Typische Leistungsdaten von Wärmerohren und zugehörige Betriebstemperaturen (nach /7/)

Die Temperatur des Kollektors und der Dampfdruck des Wärmeträgers in der Transportzone sind gemäß der Dampfdruckkurve des Wärmeträgers gekoppelt. Wird nun das Wärmerohr über das Zuführungsrohr 5 mit dem Reservoir eines gegenüber dem Wärmeträger neutralen Gases (z.B. Argon) verbun-

den, so findet keine Durchmischung des Wärmeträgers mit dem Gas statt, da einerseits der Dampf des Wärmeträgers nicht in den Gasraum eindringt, da er vorher kondensiert und da andererseits das Gas nicht in den Dampf des Wärmeträgers eindringt, da dieser ihm entgegenströmt. Gas und Dampf stehen somit im Druckgleichgewicht. Die Trennschicht befindet sich im Bereich der Kühlzone. Vergrößert man nun den Argondruck, so wird die Trennschicht etwas aus der Kühlzone herausgeschoben. Dadurch wird vom Dampf weniger Wärme an den Kühlkreislauf abgegeben und die Kollektortemperatur steigt solange an, bis sich wieder das Druckgleichgewicht zwischen Dampf und Gas eingestellt hat. Wird andererseits bei vorgegebenem Argondruck -und damit Dampfdruck- die Wärmezufuhr an den Kollektor (etwa durch Erhöhung der Emittertemperatur) erhöht, so verdampft eine größere Menge des Wärmeträgers. Dessen Dampfvolumen vergrößert sich ohne Druckzunahme weiter in die Kühlzone hinein, da diese Volumenzunahme klein gegenüber dem Volumen des Argonreservoirs ist. Dadurch wird die größere Wärmemenge an den Kühlkreislauf wieder abgegeben und die Temperatur des Kollektors bleibt konstant. D.h., man kann über den Argondruck - in einem gewissen Bereich - die Temperatur am Kollektor einstellen und konstant halten.

Um den Spaltabstand zwischen Emitter und Kollektor variabel zu gestalten, muß das Kollektorwärmerohr in axialer Richtung gegenüber dem Diodengehäuse um einige Millimeter verschiebbar sein. Eine Schnittzeichnung des Kollektorteils der Diode ist in Abb. 6 wiedergegeben. Der Kollektor mit Wärmerohr ist über einen Anschlußring 1 in einen UHV-dichten, nahtlosen Federbalg 2 (Firma: Arbogast/Colorstat, Paris; Material: Inconel) eingeschweißt und dieser über einen Metall-Keramikübergang 3 (Keramik: hochreines Al_2O_3 , F99 der Fa. Deutsche Steinzeug; Metallflansche: Vacodil (Fe-Ni); Lot: Cu-Ni Eutecticum) mit dem Gehäuseflansch 4 verschweißt. Durch den Metall-Keramikübergang wird der Kollektor gegenüber dem Diodengehäuse elektrisch isoliert.

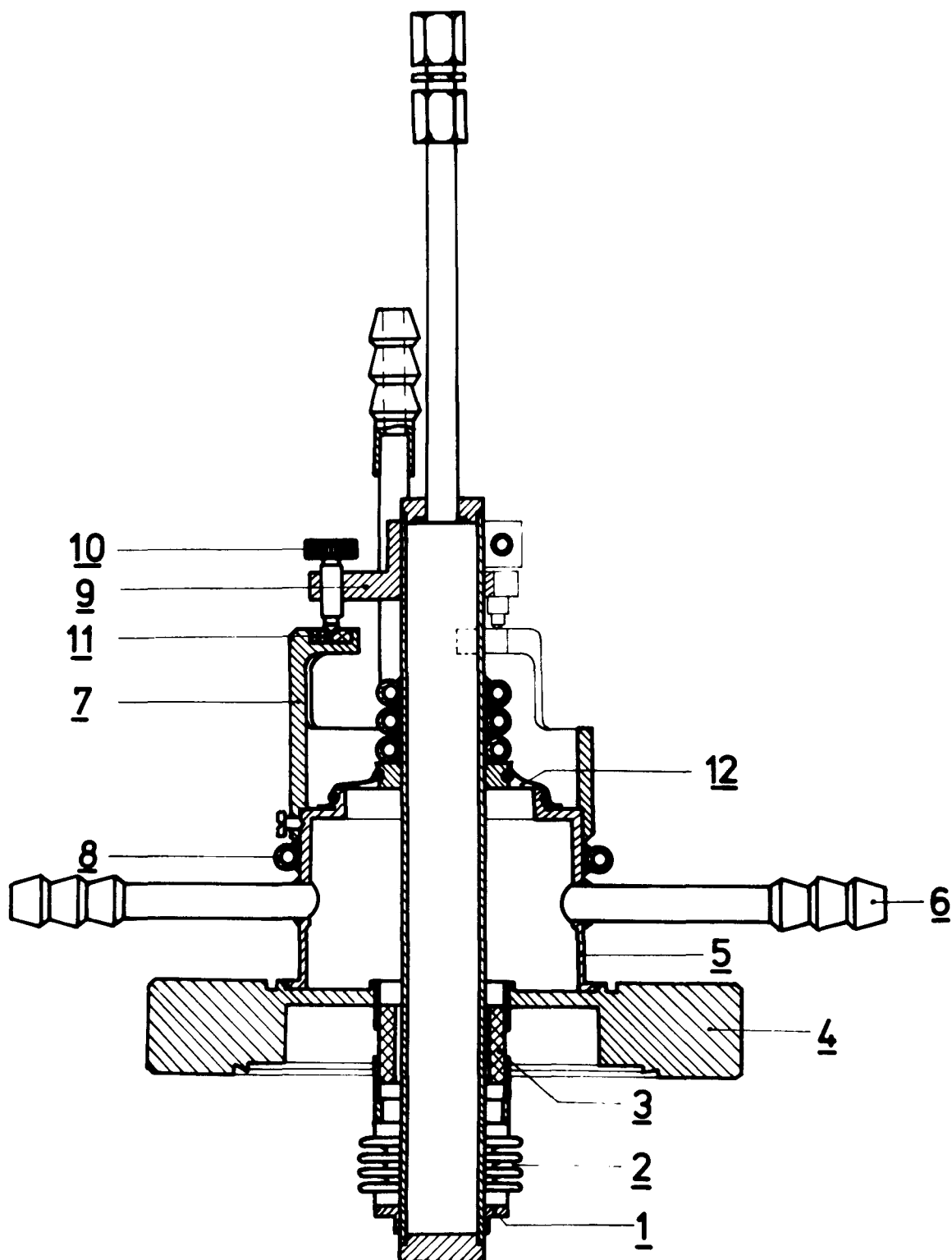


Abb. 6 Schnittzeichnung des Kollektorteils

Auf den Gehäuseflansch 4 ist ein Schutzgehäuse 5 geschweißt, welches über zwei Stutzen 6 von Argon durchspült werden kann, um eine Oxidation sowohl der Metallkeramikverbindung als auch des Wärmerohres in seiner Transportzone zu verhindern. Auf das Schutzgehäuse 5 ist ein Justiergehäuse 7 geschraubt, welches durch eine einzelne Kühlschlange 8 vor zu starker Erwärmung geschützt wird. Über einen am oberen Ende des Wärmerohres angeschraubten Justierring 9 kann mit Hilfe von drei Schrauben 10 der Kollektor gegenüber dem Gehäuseflansch 4 axial verschoben werden. Die in das Justiergehäuse eingelegten Aluminium-Oxid-Scheibchen 11 dienen als reproduzierbare Auflage für die Justierschrauben 10 (Dreipunktaufstellung) und sind zur elektrischen Isolation des Kollektors gegenüber dem Gehäuse aus Al_2O_3 gefertigt. Das mit Argon durchspülte Schutzgehäuse 5 wird gegen die Außenluft durch eine wärmebeständige Gummimembran 12, die mit Spannringen am Gehäuse und an einem Adapterring am Wärmerohr befestigt wurde, abgedichtet, um die freie Verschiebung des Kollektors gegenüber dem Gehäuse nicht zu behindern. An den Kühlschlangenenenden des Wärmerohres wurden noch zwei Kupferlaschen angelötet, die zur Abnahme des Diodenstromes dienten. Abb. 7 zeigt den fertig montierten Kollektorteil.

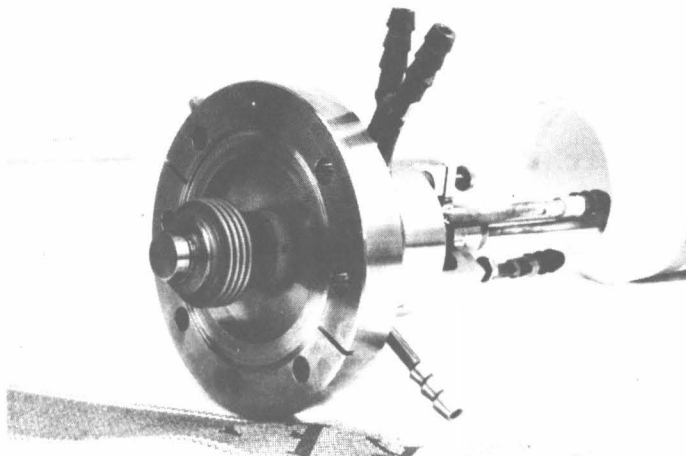


Abb. 7 Kollektorflansch

4. Diodengehäuse

Das Diodengehäuse (Abb. 8) besteht aus einem Stahlrohr von 2 1/2" Durchmesser, 1,5 mm Wandstärke und 69 mm Höhe, auf dessen Enden zwei 4"-UHV-Flansche elektronenstrahlgeschweißt sind. Das Gehäuse hat in der Mitte vier Ansatzrohre von 12 mm Durchmesser mit Mini-Flanschen. An einem von ihnen wird das Cäsiumreservoir angeschlossen, die anderen drei sind mit UHV-Saphirfenstern versehen. Durch diese Fenster ist die pyrometrische Messung der Emittertemperatur und die Einstufung und Messung des Elektrodenabstandes möglich.

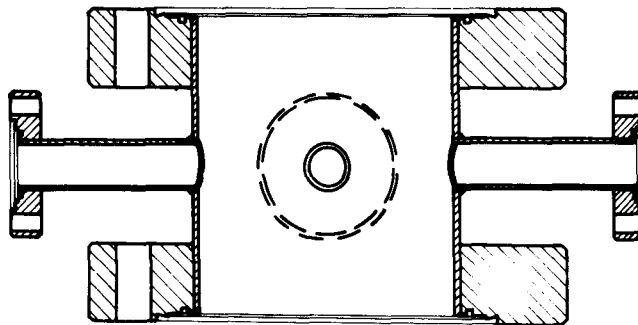


Abb. 8 Schnittzeichnung des Diodengehäuses

5. Cäsiumreservoir

Das Cäsiumreservoir dient zur Erzeugung des Cäsiumdampfes in der Diode. Der gewünschte Dampfdruck wird dadurch erreicht, daß der Dampf mit dem Cäsiumbad des Reservoirs im Temperaturgleichgewicht steht.

Das Cäsiumreservoir (Abb. 9) besteht aus einem kleinen Gefäß 1 von 60 mm Durchmesser und 23 mm Höhe, in dessen Deckel zwei Stahlrohre von 12 mm Durchmesser mit Mini-flansch eingeschweißt sind (2 und 3). Das kürzere 2 von ihnen führt zum Diodengehäuse, das längere 3 zur Ionengetterpumpe. Das Gefäßunterteil besteht wegen der besseren Wärmeleitfähigkeit aus Nickel und hat 8 mm Wandstärke. Der

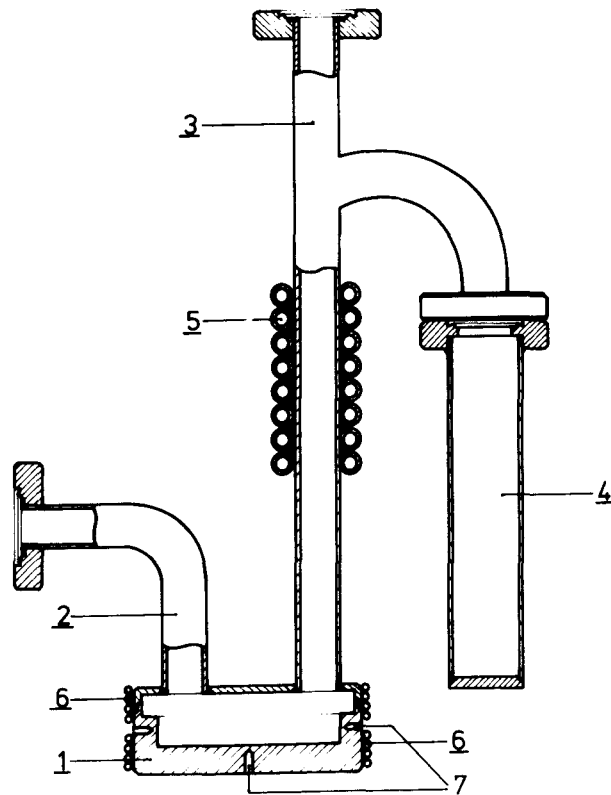


Abb. 9 Schnittzeichnung des Cäsiumreservoirs

Nickelunterteil ist mit dem Stahldeckel elektronenstrahlverschweißt.

An dem längeren Rohr 3 ist eine dünnwandige, über einen Miniflansch zu öffnende Stahlkapsel 4 angebracht, die zur Aufnahme der Cs-Ampulle dient. Zum Einfüllen des Cs in das Reservoir wird die Ampulle durch Quetschen der Stahlkapsel zerbrochen und das Cs in das Nickelgefäß überdestilliert. Während des Betriebes der Diode wird das lange Rohr durch die angelöteten Kühlschlangen 5 auf einer Temperatur von 28°C gehalten, so daß der Cs-Dampf, der in das Rohr gelangt, kondensiert und ins Reservoir zurücktropft. Durch Heizen des Cs-Reservoirs auf eine entsprechende Temperatur läßt sich über die Dampfdruckkurve der gewünschte Cs-Dampfdruck einstellen. Hierzu ist auf der Außenseite des Gefäßes ein Mantelheizleiter 6 hart aufgelötet. Vier NiCr-Ni - Thermoelemente 7 in den Seitenwänden und eines im Boden des Gefäßes dienen der Kontrolle der gleichmäßigen Reservoirtemperatur. Mit dem im Boden des Gefäßes angebrachten Thermoelement wird über einen elektronischen, kontinuierlichen Temperatur-Regler mit PID-Rückführung und Thyristorstellglied die Heizung des Cs-Reservoirs gesteuert und geregelt.

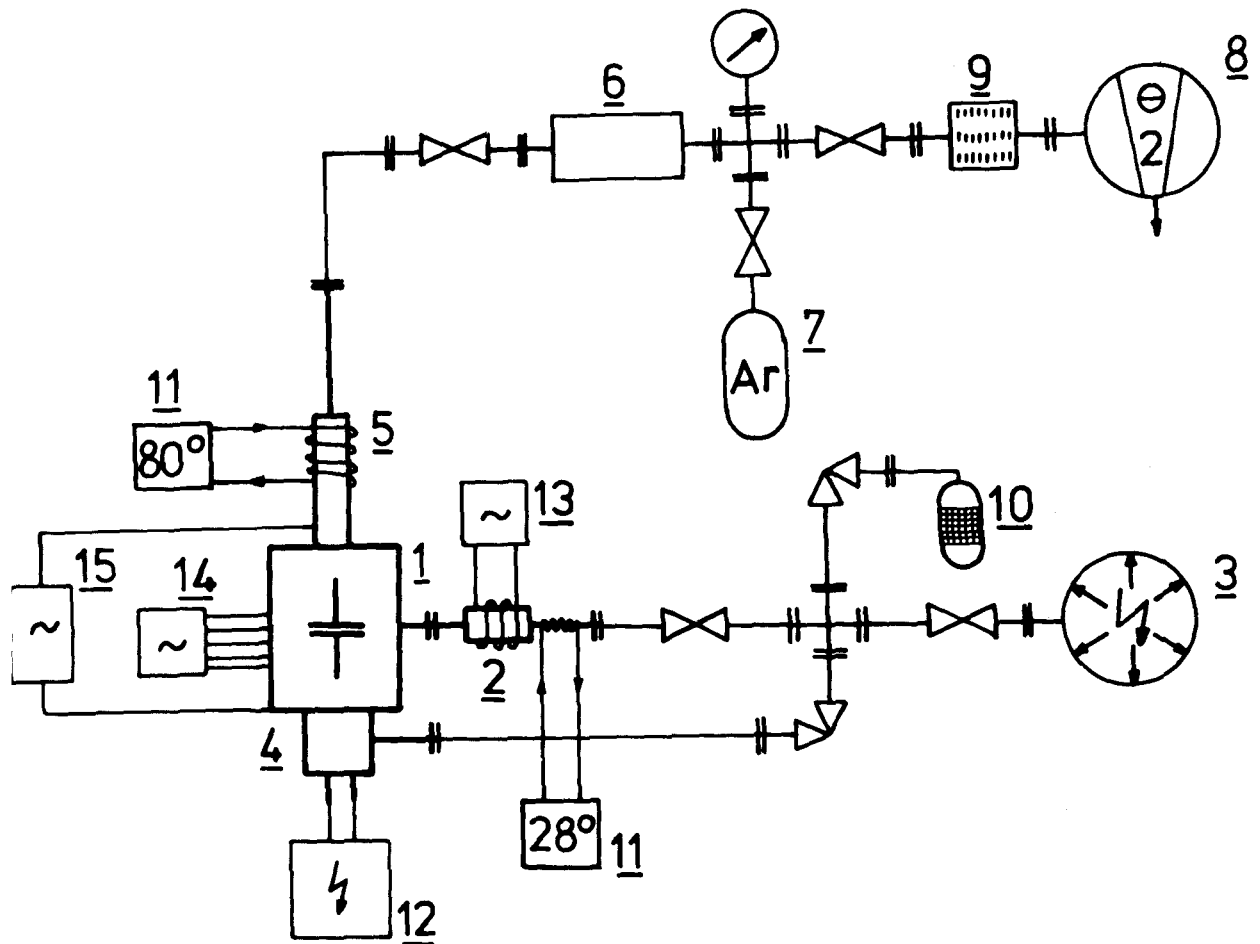
6. Gesamtaufbau der Experimentierdiode

Der Gesamtaufbau der Diode ist in Abb. 10 schematisch dargestellt. Das Diodengehäuse 1 wird über das Cs-Reservoir 2 von einer Ionengetterpumpe 3 evakuiert. Dabei verhindert ein Kühlwasserkreislauf von 28°C Temperatur das Entweichen des Cs-Dampfes aus dem Reservoir und sein Eindringen in den Vakuumteil. Die Elektronenkanone 4 wird über eine eigene Leitung evakuiert.

An das Kaliumwärmerohr 5 sind das Argonreservoir 6 sowie eine Argondruckflasche 7 (zur Erhöhung des Argondruckes) und eine Rotationspumpe 8 (zur Verminderung des Argondruckes) angeschlossen. Weiterhin ist ein Kühlwasserkreislauf mit einer Temperatur von 80°C für die Kühlzone des Wärmerohres nötig.

Zur elektrischen Versorgung der Diode benötigt man:
die Netzgeräte 12 der leistungsgeregelten 2-kW-Elektronenkanone,
die Cs-Bad-Heizung mit Temperaturregelung 13 und
fünf temperaturgeregelte Heizbandagenkreise 14, mit denen das gesamte Diodengehäuse auf einer Temperatur oberhalb derjenigen des Cs-Bades gehalten wird.

Der Elektrische Meßkreis zur Aufnahme der Stromspannungskennlinien 15 wird im folgenden Kapitel beschrieben.



- | | |
|----------------------------|--|
| 1 Diodengehäuse | 11 Kühlwasserkreisläufe |
| 2 Cs-Reservoir | 12 Elektrische Versorgung
der Elektronenkanone |
| 3 Ionengetterpumpe | 13 Cs-Bad Temperatur-
regelung |
| 4 Elektronenkanone | 14 temperaturgeregelte
Heizbandagenkreise |
| 5 K-Wärmerohr | 15 elektrischer Meßkreis
zur Kennlinienaufnahme |
| 6 Ar-Druckausgleichskammer | |
| 7 Ar-Druckflasche | |
| 8 Drehschieberpumpe | |
| 9 Adsorptionsfalle | |
| 10 Adsorptionspumpe | |

Abb. 10 Schematische Darstellung des Gesamtaufbaus der Experimentierdiode

7. Elektrischer Meßkreis zur Aufnahme der Strom-Spannungskennlinien

Zur Aufnahme von Strom-Spannungskennlinien an der Experimentierdiode wurde der dynamischen Meßmethode ("Sampling"-Methode) der Vorrang gegeben, da eine statische Methode einen von der Diodenspannung abhängigen Einfluß sowohl auf die Emitter- als auch auf die Kollektortemperatur hätte.

Abb. 11 zeigt das Blockdiagramm des Meßkreises. Über einen Stelltransformator und einen Festtransformator (Übersetzung 44:1) wird eine Wechselspannung (50 Hz; 1.5 V) an die Diode gelegt. Mit der Diode in Reihe liegt ein Meßwiderstand von einem Milliohm, über dessen Spannungsabfall der Diodenstrom (bis zu 60 A) gemessen wird. Die dazugehörige Diodenspannung wird direkt an den Elektroden der Diode abgegriffen.

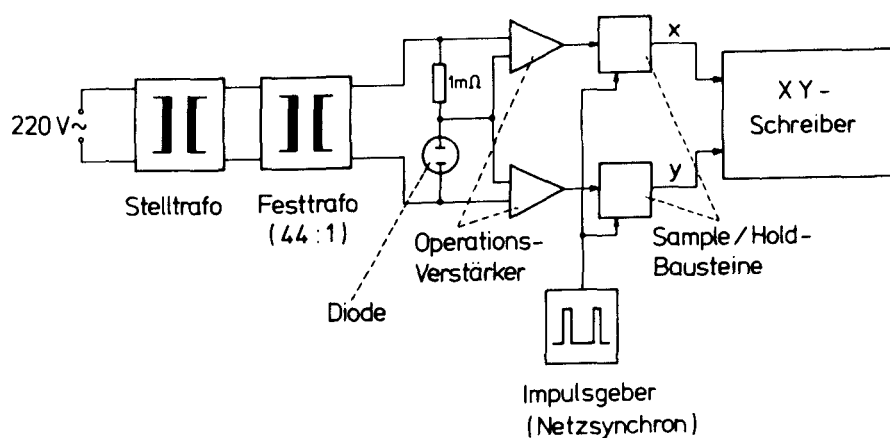


Abb. 11 Blockdiagramm des Meßkreises zur Kennlinienaufnahme

Mittels zweier Operationsverstärker werden das Strom- bzw. Spannungssignal auf einen geeigneten Wert angehoben und zur Weiterverarbeitung an den Eingang zweier Sample/Hold-Bausteine (Burr & Brown) geführt. Letztere haben die Eigenschaft, daß der Eingang durch Impulsansteuerung eine gewisse Zeit (Impulszeit) geöffnet werden kann, um das Meßsignal zu erfassen (Sample-Mode). Die Höhe dieses Signals wird im anschließenden geschlossenen Zustand des Eingangs nahezu konstant gehalten (Hold-Mode). Die Öffnungszeit darf jedoch eine gewisse Dauer nicht unterschreiten, da sonst das Signal nicht auf seinen vollen Wert ansteigen kann (Anstiegszeit). Bei konstanter Impulshöhe kann die Impulsbreite zwischen 1 ms und 1000 ms gewählt werden. Die Phasenlage des Impulses kann über einen vollen Zyklus von 2π eingestellt werden. Das kontinuierliche Durchlaufen der Phasenlage wird durch die Verwendung eines Motorpotentiometers erreicht. Da die Impulse netzsynchron laufen, werden immer Meßwerte bei einer bestimmten Phasenlage der aufgeprägten Wechselspannung erfaßt. Die Gleichspannungsausgänge der beiden Sample/Hold-Bausteine werden auf einen XY-Schreiber gegeben, der somit direkt die Strom-Spannungskennlinien der Diode aufzeichnet.

C. Test der Komponenten und der Diode

1. Test der Kollektor-Wärmerohr-Einheit

Um die Kollektor-Wärmerohr-Einheit, im folgenden kurz mit "Kollektorrohr" bezeichnet, betriebsbereit zu machen, muß die Kapillarstruktur des Wärmerohres mit einem geeigneten Arbeitsmedium gefüllt werden. Da die Arbeitstemperatur des Kollektors zwischen 500° und 800° C liegen soll, ergibt sich aus Tabelle 1 und /6/, daß Kalium einen für diesen Zweck geeigneten Wärmeträger darstellt.

Das Kollektorrohr, das bereits mit dem Anschlußring 1 (Abb. 6) und dem Deckel 4 mit Anschlußrohr 5 (Abb. 5) versehen ist, wird vor dem Einfüllen des Kaliums im Hochvakuum (10^{-6} - 10^{-7} Torr) bei Temperaturen von ca. 500° C 10 Stunden lang ausgeheizt, um eventuell vorhandene Fremdstoffe von den Oberflächen zu entfernen. Mit Hilfe eines HV-dichten Schraubverschlusses (Ermeto) wurde nun das Anschlußrohr 5 über ein Cu-Rohr an einen Heliumlecksucher angeschlossen, das Kollektorrohr leckgetestet und auf einen Druck von etwa 10^{-6} Torr evakuiert. Danach wurde das Cu-Rohr mit einer Spezialzange vakuumdicht abgeklemmt (abgepincht). Zum Füllen mit Kalium wurde das Kollektorrohr in einen Handschuhkasten (glove box) gebracht, der nach dem Evakuieren mit Reinstargon von Atmosphärendruck gefüllt wurde. In einer abgeschmolzenen Glasampulle befand sich eine genau bemessene Kaliummenge (unter Argon), die zum Füllen des Wärmerohres benötigt wird. Die Kaliummenge (Potassium 6 3 N5, Serva) wurde aus dem Volumen der Kapillarstruktur zuzüglich einer Toleranzmenge von 10 % bestimmt und betrug $1,4 \text{ cm}^3$.

Nach dem Aufbrechen der Glasampulle wurde das Kalium so lange mittels Heizbandagen erwärmt, bis es flüssig wurde. Nach dem Lösen der Ermeto-Verschraubung konnte nun das flüssige Kalium in das ebenfalls vorgewärmte Kollektorrohr gegossen werden. Nachdem mittels einer Ermeto-Verschraubung ein neues Cu-Rohr aufgesetzt worden war, dessen Ende

mit einem HV-Ventil (Leybold-Heraeus, NW 10 KF) verschlossen war, konnte das Kollektorrohr wieder aus dem mit Argon gefüllten Handschuhkasten entfernt werden. Das Kollektorrohr wurde nun entsprechend Abb. 10 mit dem Argonreservoir 6, einer Rotationspumpe 8 und mit einer Argondruckflasche 7 (Reinstargon N 56, Air Liquide) verbunden. Am oberen Ende des Kollektorrohres wurde eine vorläufige Wasserkühlung angebracht. Nach dem mehrmaligen Evakuieren und belüften mit Reinstargon wurde das Kollektorrohr in eine lange Spule geschoben und mittels eines HF-Senders auf eine Temperatur von ca. $400 - 500^{\circ}\text{C}$ gebracht. Die Kapillarstruktur des Wärmerohres wurde dadurch völlig vom Kalium benetzt. Die Wasserkühlung (76°C) am oberen Ende verhinderte ein Eindringen des Kaliums in die Zuleitung. Während des Heizvorganges war das Kollektorrohr von einem mit Argon durchspülten Quarzglaszylinder umgeben, der eine Oxidation verhinderte.

Nach dieser Prozedur wurde die Funktion des Wärmerohres getestet. Hierzu wurde die lange HF-Spule gegen eine kürzere ausgetauscht, die lediglich den Kollektor erhitze. Mit Hilfe der Rotationspumpe und der Argondruckflasche konnte der gewünschte Argondruck von 50 bis 1200 Torr im Kollektorrohr eingestellt werden. Die jeweilige Temperatur am Ni-Kollektor wurde mit einem NiCr-Ni-Thermoelement gemessen. Abb. 12 zeigt die Abhängigkeit der gemessenen Kollektortemperatur vom vorgegebenen Argondruck. Wie man sieht, entspricht sie recht gut der Dampfdruckkurve des Kaliums (durchgezogene Linie; Werte nach /8/).

Nach diesem erfolgreichen Test wurde das Kollektorrohr evakuiert und am Cu-Rohr hinter der Ermeto-Verschraubung abgepincht. Nach Entfernen der provisorischen Wasserkühlung wurden Federbalg, Keramikisolation und Flansch angeschweißt (Elektronenstrahlschweißung).

Der gesamte Kollektorflansch wurde nun wieder in den Handschuhkasten gebracht, die Ermeto-Verschraubung gelöst,

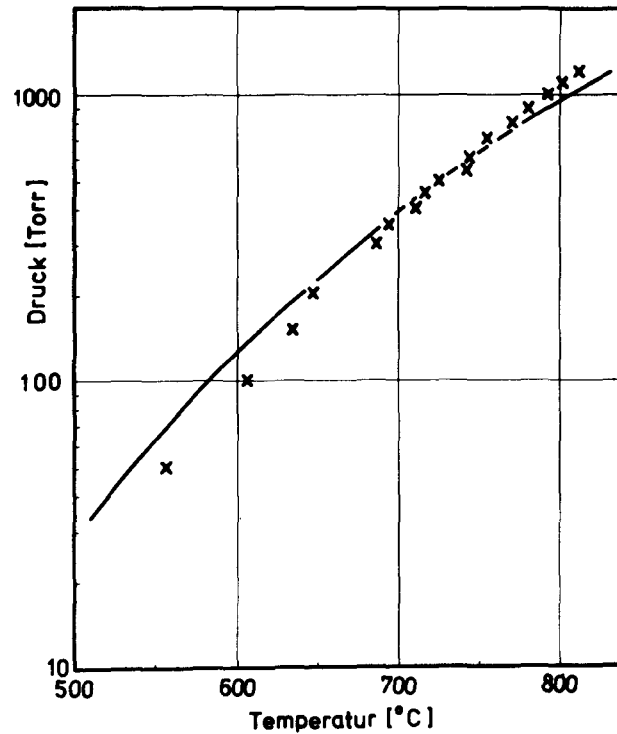


Abb. 12 Kollektortemperatur in Abhängigkeit vom Argondruck

und wie schon einmal zuvor, wieder mit einem Cu-Rohr mit HV-Ventil versehen.

Nach Anbringen der Wasserkühlung, der Gummimembran und des Justiergehäuses und -ringes war der Kollektorteil zum Einbau in die Diode fertig.

2. Test der Diode

Die Diode wurde unter Verwendung von UHV-Kupferdichtungen aus den einzelnen Bauteilen zusammengesetzt, und mit einem Helium-Lecksucher leckgetestet. Die Gesamtleckrate der Diode ergab sich zu $5 \cdot 10^{-9}$ Torr l/sec.

Danach wurden das Kollektorwärmerohr an sein Argonsystem angeschlossen, alle Kühlkreisläufe installiert, die Cs-Badheizung angeschlossen sowie alle Heizbandagenkreise angebracht. Zur Wärmedämmung und gleichmäßigeren Temperaturverteilung wurde die Diode mit Asbestwolle und dünnen Asbestplatten verkleidet. Dann wurde die Diode mit ihrer Ionengetterpumpe bis zu einem Enddruck von 10^{-7} Torr evakuiert. Durch schrittweise Temperatursteigerung wurde die gesamte Diode mehr als 100 Stunden lang (bei 450 - 500° C) ausgeheizt, wobei die Temperatur am Diodengehäuse für einige Stunden bis auf 550° C gesteigert wurde.

Während der Ausheizzeit wurde das Funktionieren der einzelnen Diodenkomponenten getestet. Die Cäsiumbadheizung und -regelung wurde bis zu Temperaturen von 500° C getestet. Die Elektronenkanone wurde erst durch ihren Wendelheizstrom selbst ausgeheizt, anschließend der Emitter etwa 20 Stunden auf 1500° C geheizt. Emittertemperaturen bis zu 2000° C ließen sich mühelos erreichen. Das Kollektorwärmerohr war selbstverständlich während der gesamten Ausheizzeit in Betrieb. Durch verändern des Argondruckes wurde seine Temperatur entsprechend der Ausheiztemperatur eingestellt. Während der Emitterheizzeit wurde die Kollektortemperatur bis herauf zu 800° C getestet.

Die Kühlung des Nickelkollektors durch das Kaliumwärmerohr funktionierte einwandfrei. Auch bei 2000° C Emittertemperatur und einem Spaltabstand kleiner als 0,5 mm ließ sich die Kollektortemperatur bis herab zu 500° C einstellen.

D. Störfall und Nachuntersuchung des Kollektors

Nach einer Gesamtbetriebsdauer von ca. 126 Std. stieg der Druck in der Diode rasch an und zeigte - bei laufender Ionengetterpumpe - periodische Oszillationen.

Abb. 13 zeigt diese Druckschwankungen, die typisch für sog. Argoninstabilitäten beim Betrieb von Ionengetterpumpen sind.

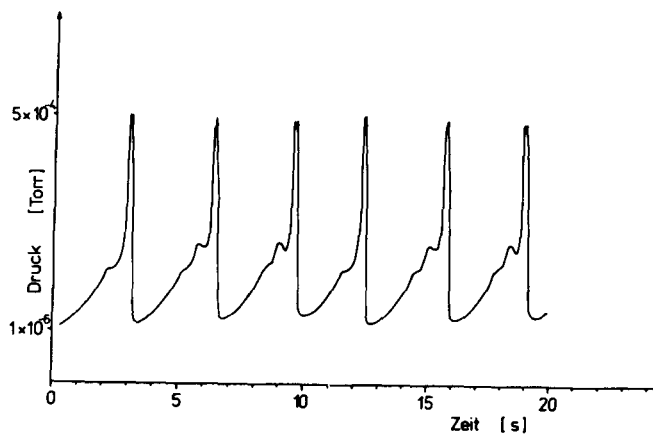


Abb. 13 Druckschwankungen in der Ionengetterpumpe auf Grund einer Undichtigkeit am Kollektor

Die einzig mögliche Erklärung war die, daß Argon aus dem Wärmerohr in die Diode gelangte, wobei die Undichtigkeit mit großer Wahrscheinlichkeit in der Schweißnaht Nickelkollektor-Wärmerohr zu vermuten war.

Um dieses zu überprüfen, wurde das Wärmerohr, das zunächst mit Argon von einem Druck von ca. 120 Torr gefüllt war, evakuiert. Die Druckschwankungen verschwanden sofort (s. Abb. 14, Mitte). Anschließend wurde das Wärmerohr wieder mit Argon bis zu einem Druck von ca. 200 Torr gefüllt. Die Oszillationen traten sofort wieder auf, diesmal jedoch mit höherer Frequenz (s. Abb. 14, links). Der Zusammenhang zwischen dem

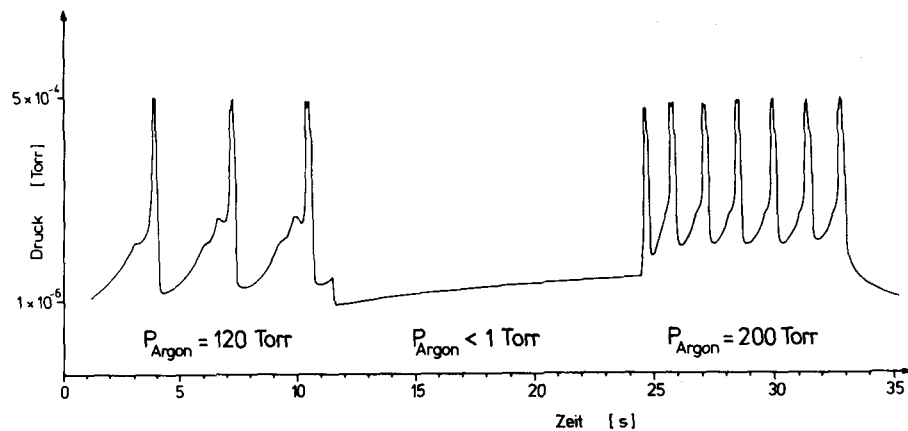


Abb. 14 Einfluß des Argondruckes im Wärmerohr auf die Druckschwankungen in der Ionengetterpumpe

Argondruck im Wärmerohr und den Druckschwankungen in der Diode bzw. in der Ionengetterpumpe war somit erwiesen. Zusätzliche Lecksuche mit einem He-Lecksucher außen am Diodengehäuse verliefen, in Übereinstimmung mit dem vorhergehenden Befund, negativ.

Um Ursache und Art der aufgetretenen Undichtigkeit zu untersuchen, wurde das Kollektorrohr oberhalb des Anschlußringes abgedreht und in Richtung der Längsachse halbiert.

Von beiden Hälften wurden metallographische Schliffe angefertigt, an denen die Schweißnaht Nickelkollektor/Stahlrohr nach einer Ni-Korngrenzätzung lichtmikroskopisch untersucht wurde. Die Abbildungen 15 a-d zeigen Aufnahmen einer undichten Schweißnahtstelle in verschiedenen Vergrößerungen. Man erkennt in dem etwa 1,5 mm breiten, aber nur etwa 0,1 mm

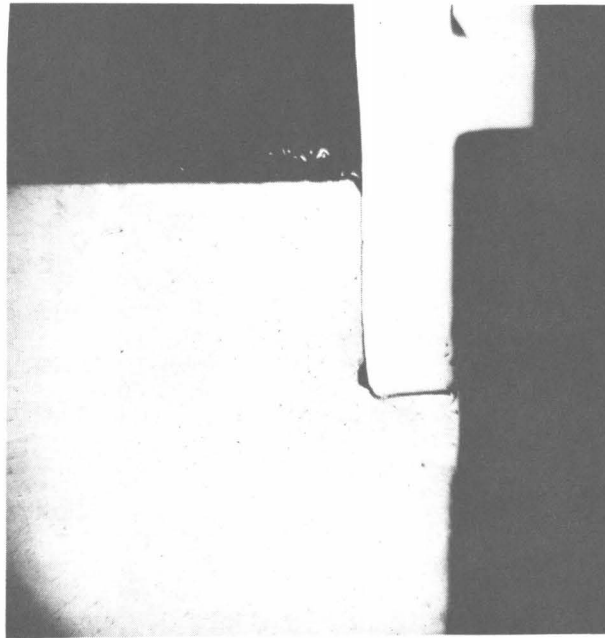


Abb. 15 a 12-fache Vergrößerung

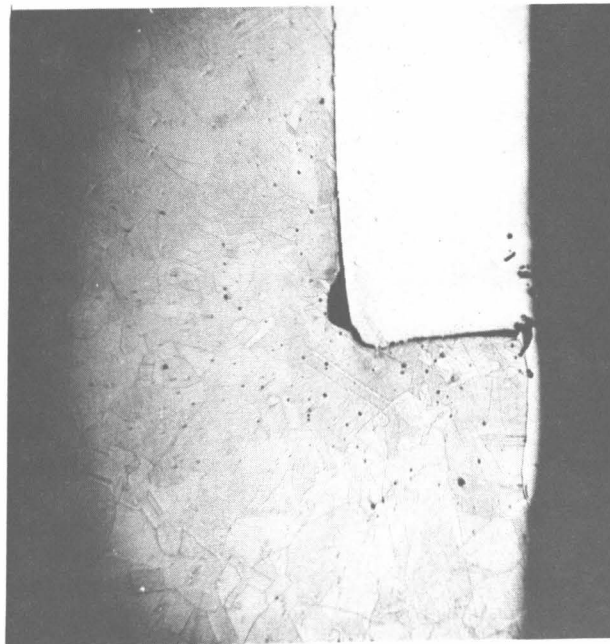


Abb. 15 b 26-fache Vergrößerung

Abb. 15 a-b Lichtmikroskopische Aufnahmen der
Schweißnaht Ni-Kollektor - Stahlrohr

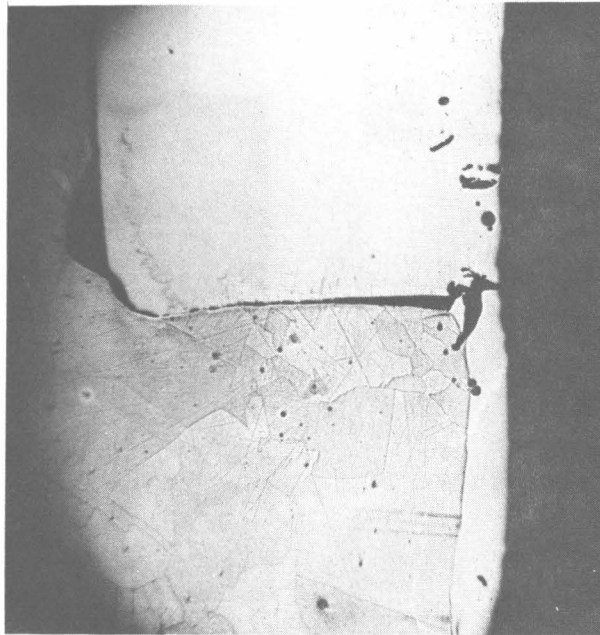


Abb. 15 c 55-fache Vergrößerung



Abb. 15 d 160-fache Vergrößerung

Abb. 15 c-d Lichtmikroskopische Aufnahmen der
Schweißnaht Ni-Kollektor - Stahlrohr

tieften Bereich, der beim Elektronenstrahlschweißen aufgeschmolzen wurde, mehrere Poren, die genau an der Nahtstelle einen bis zur Oberfläche reichenden Kanal bilden. Weiterhin sieht man aufgrund der Ni-Ätzung, daß der aufgeschmolzene Bereich unterhalb der Nahtstelle offenbar nicht aus Reinnickel besteht.

Ergänzend wurde die Nahtstelle mit der Elektronenstrahlmikrosonde untersucht. Schon im "backscattered electron" Bild (Abb. 16) erkennt man, daß auch im Bereich des Stahlrohres die aufgeschmolzene Zone eine vom Stahl verschiedene Zusammensetzung hat und dort etwa doppelt so tief ist wie im Bereich des Nickelkollektors.

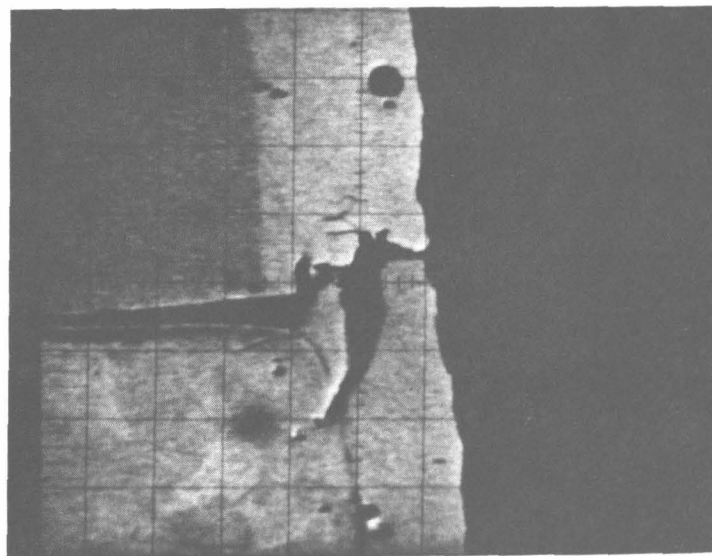


Abb. 16 BSE-Aufnahme der rückgestreuten Elektronen der Schweißnaht (166-fache Vergrößerung)

Die X-ray Bilder (Abb. 17 a-c) zeigen ganz deutlich, daß der beim Schweißen aufgeschmolzene Nahtbereich aus einer homogenen Fe-Ni-Cr-Legierung besteht, die wesentlich mehr Nickel enthält als der Stahl.

Da an allen untersuchten Nahtstellen in den aufgeschmolzenen Bereichen Poren beobachtet wurden, hätte die Schweißnaht wesentlich tiefer aufgeschmolzen werden müssen, um eine bis zur Oberfläche reichende Kanalbildung auszuschließen.

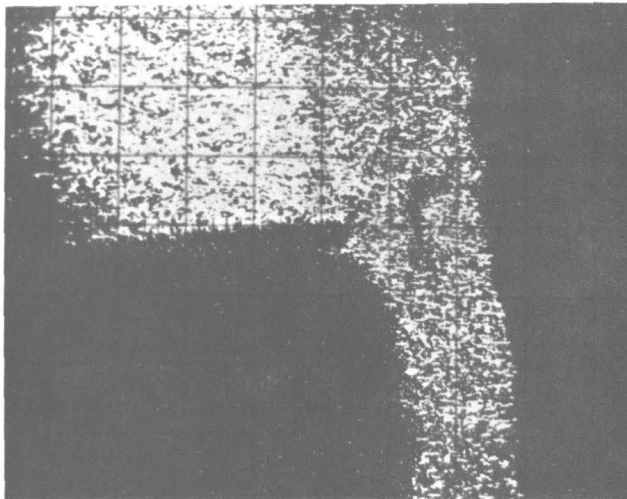
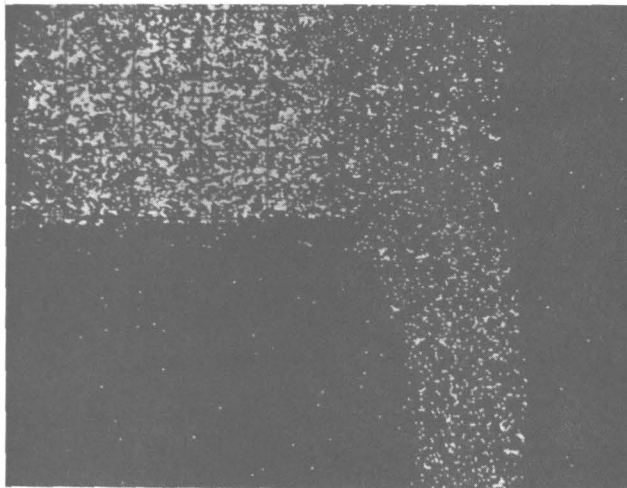
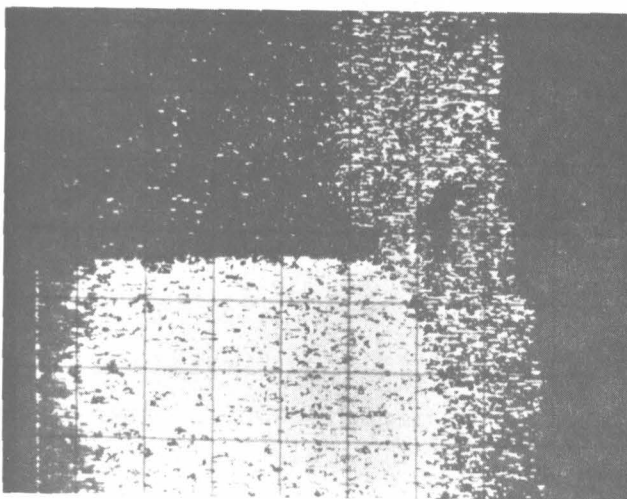
a) Fe-K_{α_1} b) Cr-K_{α_1} c) Ni-K_{α_1}

Abb. 17 a-c Röntgenstrahlbilder der Schweißnaht, für verschiedene Linien aufgenommen (166-fache Vergrößerung)

E. Schluß

Nach dem Auftreten des Schadens am Kollektor wurde ein neues Kaliumwärmerohr gebaut, betriebsfertig gemacht und in einen neuen Kollektorflansch eingeschweißt.

Beim Lecktesten der Diode mit dem neuen Kollektorteil wurden Undichtigkeiten mit Leckraten von $5 \cdot 10^{-5}$ Torr l/sec festgestellt. Die mikroskopische Untersuchung der Kollektorteilschweißnähte ergab, daß in der Schweißnaht Federbalg/Metall-Keramik-Verbindung feine Risse vorhanden waren. Außerdem war an zwei Stellen direkt neben der Schweißnaht die 0,5 mm starke Federbalgwand beim Elektronenstrahlschweißen durchgebrannt. Somit mußten Federbalg und Metall-Keramik-Verbindung herausgedreht und durch neue Teile ersetzt werden.

Diese Arbeiten wurden nicht mehr zu Ende geführt, da wegen der Einstellung des ITR-Projektes beschlossen wurde, die für später geplanten Arbeiten an dieser Testdiode nicht mehr vorzunehmen.

Zum Schluß sei bemerkt, daß, abgesehen von den beschriebenen und behebbaren Schweißfehlern, die Experimentierdiode prinzipiell betriebsbereit war, da alle ihre Komponenten einwandfrei funktionierten.

Literaturverzeichnis

- /1/ E.A. Niekisch, "Stand der nationalen und internationalen Entwicklung auf dem Gebiet der thermionischen Energiewandlung", Interner Bericht der Kernforschungsanlage Jülich (1971)
- /2/ Ergebnisbericht 1968 - 1972, Institut für Technische Physik, Interner Bericht der Kernforschungsanlage Jülich (1973)
- /3/ T.O. Speichel, R.M. Williams, IEEE Conference Record of 1968 Thermionic Conversion Specialist Conf., Framingham, Mass., p. 113
- /4/ J. Lawrence, V.C. Wilson, IEEE Conference Record of 1966 Thermionic Conversion Specialist Conf., Houston, Tex., p. 6
- /5/ D. Lieb, A. Donaker, F. Rufeh, IEEE Conference Record of 1969 Thermionic Conversion Specialist Conf., Carmel, Calif., p. 66
- /6/ W.A. Ranken, J.E. Kemme, IEEE Conference Record of 1965 Thermionic Conversion Specialist Conf., San Diego, Calif., p. 325
- /7/ M. Groll, Brennstoff-Wärme-Kraft 25, 11 (1973)
- /8/ E. Fiock, W. Rodebusch, J. Am. Chem. Soc. 48, 2522 (1926)

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1	Schnittzeichnung der Experimentierdiode
Abb. 2a	Experimentierdiode, Einzelkomponenten
Abb. 2b	Experimentierdiode, zusammengesetzt
Abb. 3	Schnittzeichnung des Emitterteils
Abb. 4	Emitter, in UHV-Flansch eingeschweißt bzw. gelötet
Abb. 5	Kollektor mit Kaliumwärmerohr
Abb. 6	Schnittzeichnung des Kollektorteils
Abb. 7	Kollektorflansch
Abb. 8	Schnittzeichnung des Diodengehäuses
Abb. 9	Schnittzeichnung des Cäsiumreservoirs
Abb. 10	Schematische Darstellung des Gesamtaufbaus der Experimentierdiode
Abb. 11	Blockdiagramm des Meßkreises zur Kennlinienaufnahme
Abb. 12	Kollektortemperatur in Abhängigkeit vom Argondruck
Abb. 13	Druckschwankungen in der Ionengetterpumpe auf Grund einer Undichtigkeit am Kollektor
Abb. 14	Einfluß des Argondruckes im Wärmerohr auf die Druckschwankungen in der Ionengetterpumpe
Abb. 15 a-d	Lichtmikroskopische Aufnahmen der Schweißnaht Ni-Kollektor - Stahlrohr
Abb. 16	BSE-Aufnahme der rückgestreuten Elektronen der Schweißnaht (166-fache Vergrößerung)
Abb. 17 a-c	Röntgenstrahlbilder der Schweißnaht, aufgenommen für verschiedene Linien (166-fache Vergrößerung)

Unser besonderer Dank gilt Herrn Dr. W.A. Ranken, der am Entwurf der Experimentierdiode federführend beteiligt war.

Herrn Prof. Dr. E.A. Niekisch danken wir für sein großes Interesse, das er dieser Arbeit entgegenbrachte und für deren stete Förderung.

Weiterhin danken wir Frl. C. Damerow und Frau G. Ehser für ihre Assistenz bei der Durchführung der experimentellen Arbeiten.