

KERNFORSCHUNGSZENTRUM

KARLSRUHE

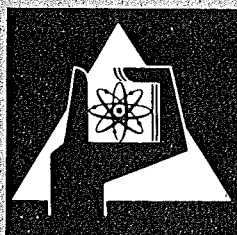
September 1973

KFK 1871

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Bau und Erprobung zweier Elektronenkanonen vom PIERCE-Typ

H.-U. Karow



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1871

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Bau und Erprobung zweier Elektronenkanonen vom PIERCE-Typ

von

H.-U. Karow

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

Kurzfassung

Der Bericht beschreibt den Aufbau von zwei PIERCE-Elektronenkanonen samt elektronischer Versorgung und Regelung. Die Betriebsdaten der Kanonen, die bei Hochtemperaturexperimenten unter UHV-Bedingungen eingesetzt wurden, werden angegeben.

Der Bericht enthält auch in zusammengefaßter Form die numerischen Grundlagen (Beziehungen, Tabellen, Kurven), die für die quantitative Auslegung von PIERCE-Elektronenkanonen gebraucht werden.

Construction and Testing of Two PIERCE-Type Electron Guns

Abstract

This report describes the construction of two PIERCE-type electron guns including the electric power supply and control. The operation parameters are reported of the electron guns operating in high-temperature experiments under UHV-conditions.

The report also contains in a concise form the numeric fundamentals necessary for the quantitative design of PIERCE electron guns.

I n h a l t

1. Einleitung
2. Elektronenbeschleunigung in einem PIERCE-Feld
3. Konstruktions- und Betriebsdaten von zwei Elektronenkanonen
 - 3.1 Elektronenkanone mit schwach fokussiertem Strahl
 - 3.2 Elektronenkanone mit stark fokussiertem Strahl
4. Literatur

1. Einleitung

Die (lokale) Erhitzung eines metallischen oder halbleitenden Objekts im Vakuum gelingt oft am bequemsten mit einem hoch-energetischen Elektronenstrahl.

Im folgenden werden zwei Elektronenkanonen vom PIERCE-Typ beschrieben, die u.a. zur Beheizung des Hochtemperatur-Emitters einer Plasmadiode entwickelt und eingesetzt wurden.

2. Elektronenbeschleunigung in einem PIERCE-Feld

Zur Erzeugung eines Elektronenstrahls geht man i.a. von einer Glühkatode aus, beschleunigt deren Glühelktronen in einem entsprechend starken elektrischen Feld im Vakuum und läßt dieses Elektronenstrahlbündel anschließend in den (feldfreien) Außenraum (auf Erdpotential) auslaufen, wo sich das Target befindet. Eine solche Elektronenkanone besteht folglich im einfachsten Fall aus nur zwei Elektroden (Abb.1): der Glühkatode K und der (dazu positiven) Beschleunigungselektrode mit Austrittsöffnung (Lochanode A). Dabei deformiert die Eigen-Raumladung des Elektronenbündels das angelegte äußere Feld zwischen den Elektroden und bewirkt eine Aufweitung des Strahlbündels.

Nach PIERCE [1] kann man diese Raumladungsverbreiterung des Elektronenbündels durch geeignete Formgebung der beiden Elektroden kompensieren (Abb.2); ein derartiges äußeres Beschleunigungsfeld heißt ein PIERCE-Feld [2]. Allerdings läuft das Elektronenbündel nach Verlassen der Lochanode nach wie vor im feldfreien Raum auseinander. Nach HELM et al. [3] kann man jedoch auch fokussierende PIERCE-Felder erzeugen, welche die Raumladungsverbreiterung des Elektronenstrahls überkompensieren (Abb.3). Die PIERCE-Elektrodenkonfigurationen sind geschlossen berechenbar für ebene, zylinder- und kugelsymmetrische Elektronenströmungen.

Elektronenstrom I und Beschleunigungsspannung U einer PIERCE-Elektronenkanone hängen (unterhalb des Sättigungsstromes) wie bei

jeder Diode über das LANGMUIR-CHILD'sche Raumladungsgesetz zusammen:

$$I = P \cdot U^{3/2} \quad (1)$$

Die Perveanz P ist durch die Elektrodenkonfiguration bestimmt. Im (meist vorliegenden) kugelsymmetrischen Fall gilt für die Perveanz einer PIERCE-Kanone $\sqrt[3]{3}$:

$$P = \frac{2,93 \cdot 10^{-5}}{\xi^2} \cdot \frac{1 - \cos \theta}{2} \cdot \frac{A}{v^{3/2}} \quad (2)$$

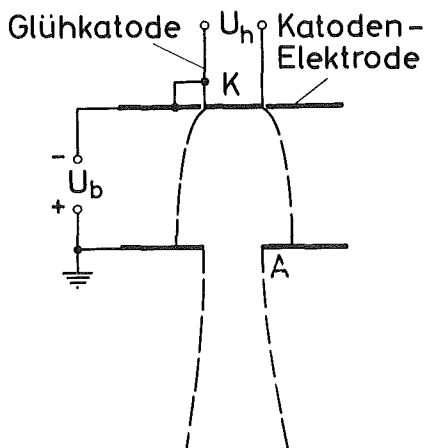


Abb. 1

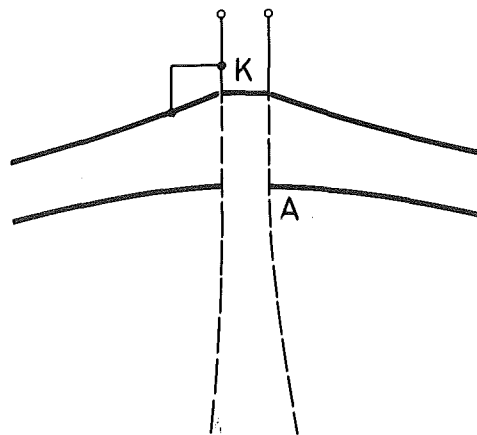


Abb. 2

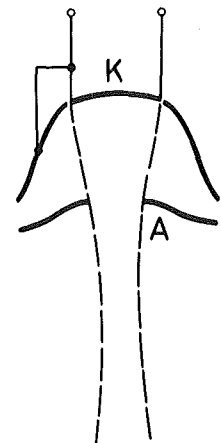


Abb. 3

Abb. 1 Elektronenkanone mit ebener Geometrie

Abb. 2 Elektronenkanone mit ebener oder rotationssymmetrischer Geometrie

Abb. 3 Fokussierende Elektronenkanone (PIERCE-Geometrie) mit rotationssymmetrischen Elektroden und kugelförmiger Glühkatode (vgl. Abb. 4)

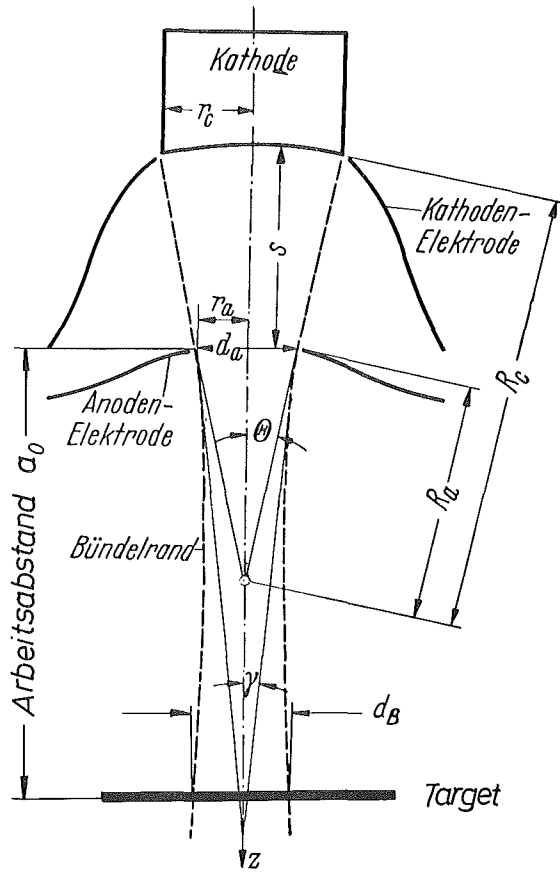


Abb. 4

Koordinaten der fokussierenden PIERCE-Geometrie von Abb. 3

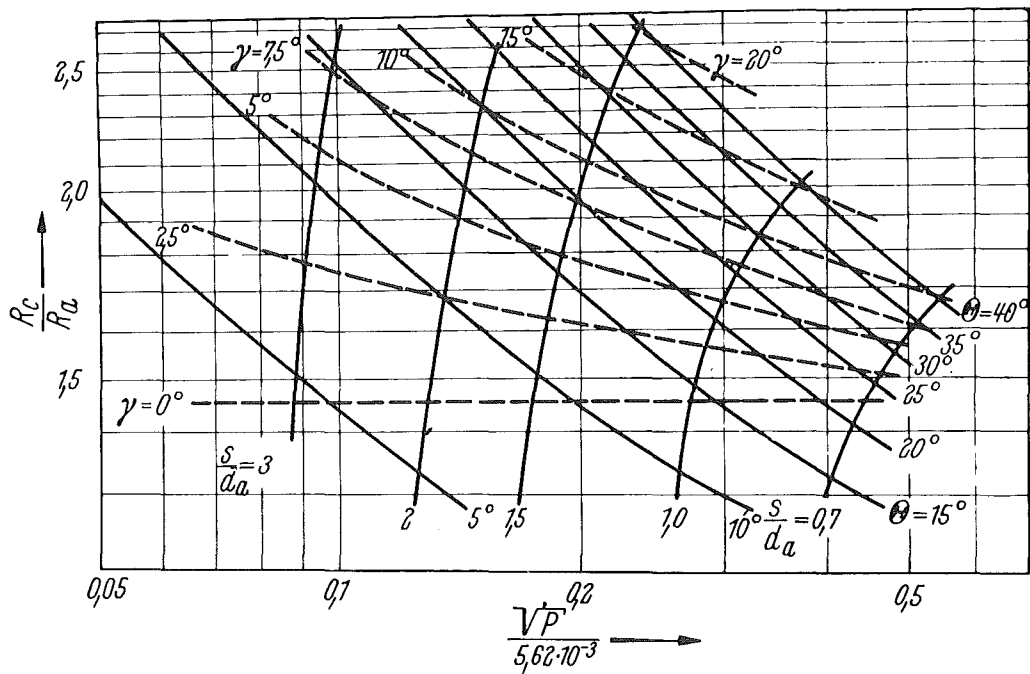


Abb. 5 Parameter-Diagramm für ein fokussierendes PIERCE-System (vgl. Abb. 3, 4)

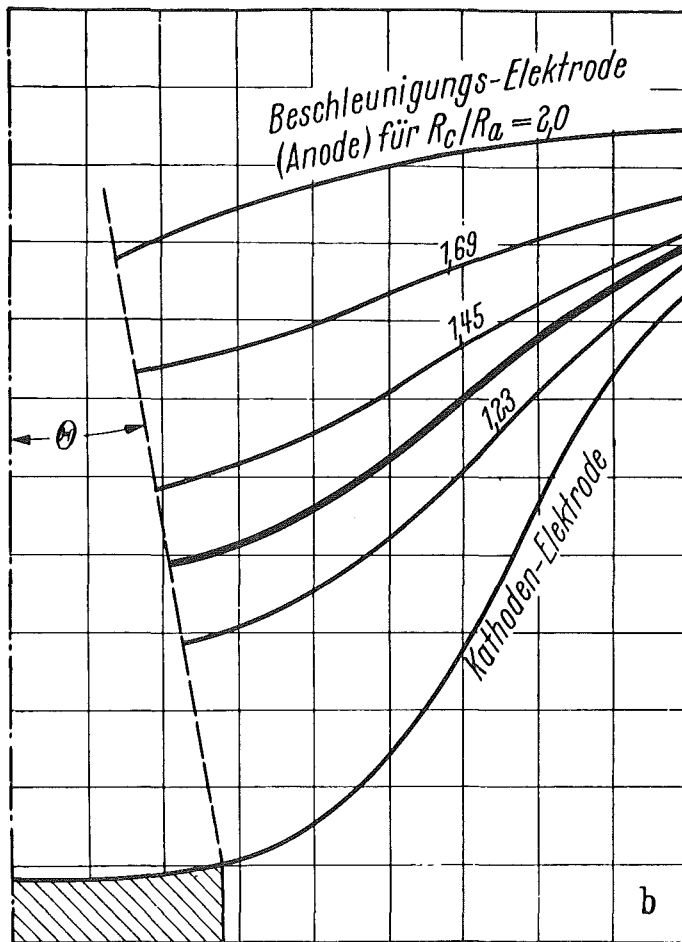
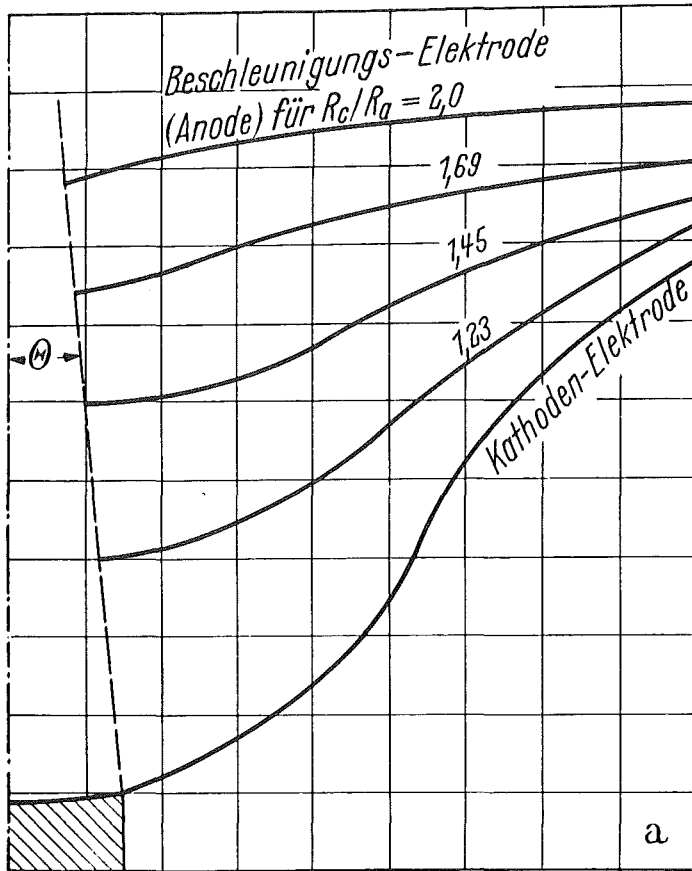


Abb. 6

Elektrodenformen
von fokussierenden
PIERCE-Systemen
mit der inneren
Konvergenz

a) $\theta = 5^\circ$

b) $\theta = 10^\circ$

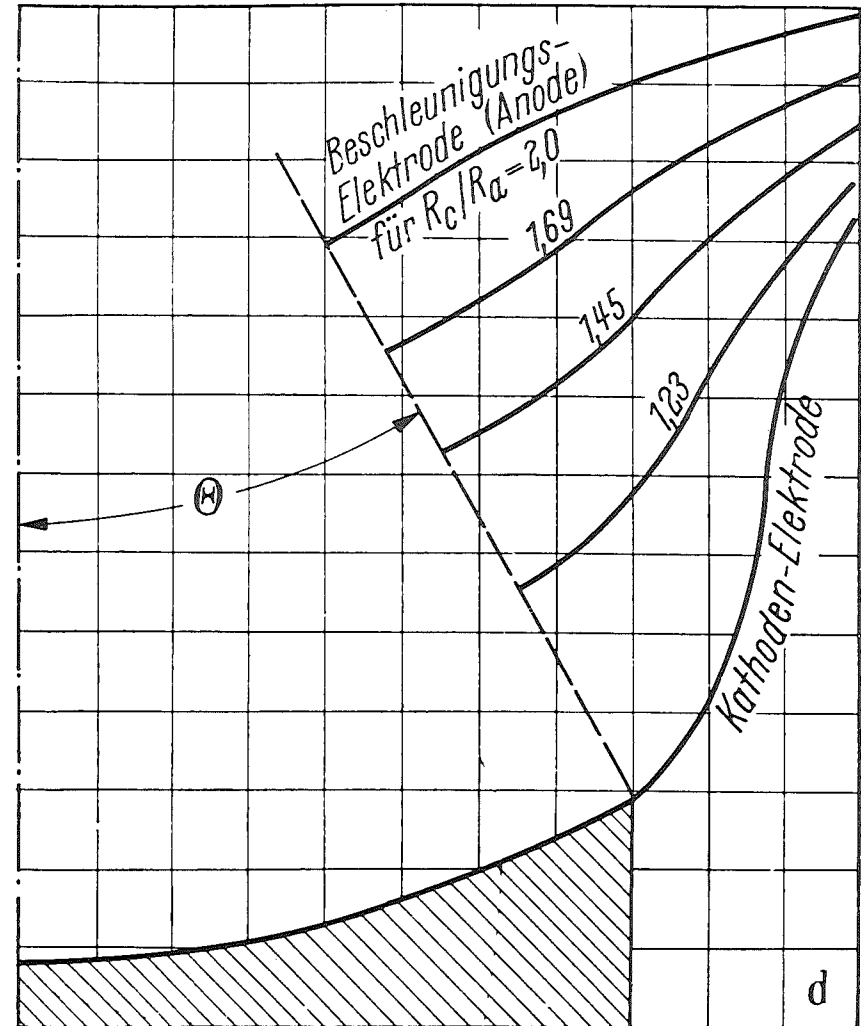
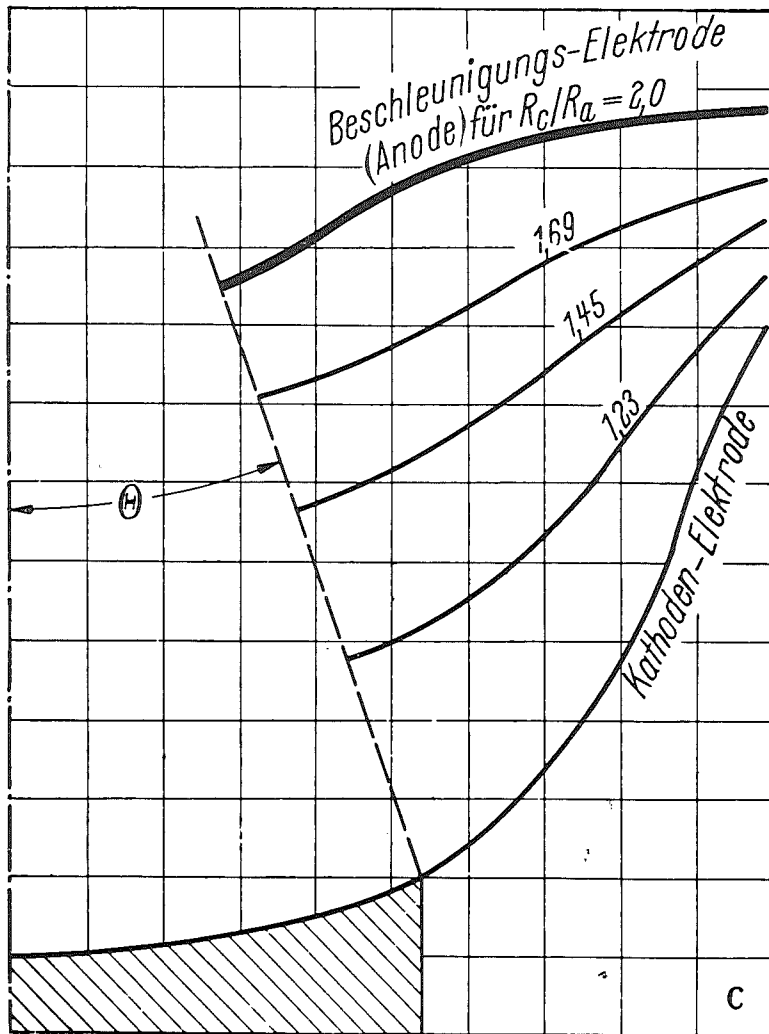


Abb.6 Elektrodenformen von fokussierenden PIERCE-Systemen mit der inneren Konvergenz

c) $\theta = 20^\circ$

d) $\theta = 30^\circ$

Den Zusammenhang zwischen der "inneren" Strahlkonvergenz θ , dem Geometriefaktor ξ^2 , der Rand-Strahlkonvergenz γ , den Radien r_c und r_a von Kathode und Lochanode, dem Elektrodenabstand s entnimmt man nach HELM et al. [3, 2] den Abbildungen 4, 5, 6 sowie Tab.1, wobei noch die Beziehungen gelten:

$$\frac{R_c}{R_a} = \frac{r_c}{r_a} ; \quad d_a = 2 r_a \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \theta \approx \frac{r_c - r_a}{s} ; \quad \sin \theta = \frac{r_c}{R_c}$$

Tabelle 1: Geometriefaktor ξ^2 einer PIERCE-Kanone mit konzentrischen Kugelelektroden

| R_c/R_a | $(-\xi)^2$ | R_c/R_a | $(-\xi)^2$ | R_c/R_a | $(-\xi)^2$ | R_c/R_a | $(-\xi)^2$ |
|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| 1,00 | 0,0000 | 2,5 | 1,531 | 6,5 | 13,35 | 100 | 1144 |
| 1,05 | 0,0024 | 2,6 | 1,712 | 7,0 | 15,35 | 120 | 1509 |
| 1,10 | 0,0096 | 2,7 | 1,901 | 7,5 | 17,44 | 140 | 1907 |
| 1,15 | 0,0213 | 2,8 | 2,098 | 8,0 | 19,62 | 160 | 2333 |
| 1,20 | 0,0372 | 2,9 | 2,302 | 8,5 | 21,89 | 180 | 2790 |
| 1,25 | 0,0571 | 3,0 | 2,512 | 9,0 | 24,25 | 200 | 3270 |
| 1,30 | 0,0809 | 3,2 | 2,954 | 9,5 | 26,68 | 250 | 4582 |
| 1,35 | 0,1084 | 3,4 | 3,421 | 10 | 29,19 | 300 | 6031 |
| 1,40 | 0,1369 | 3,6 | 3,913 | 12 | 39,98 | 350 | 7610 |
| 1,45 | 0,1740 | 3,8 | 4,429 | 14 | 51,86 | 400 | 9303 |
| 1,5 | 0,2118 | 4,0 | 4,968 | 16 | 64,74 | 500 | 13015 |
| 1,6 | 0,2968 | 4,2 | 5,528 | 18 | 78,56 | | |
| 1,7 | 0,394 | 4,4 | 6,109 | 20 | 93,24 | | |
| 1,8 | 0,502 | 4,6 | 6,712 | 30 | 178,2 | | |
| 1,9 | 0,621 | 4,8 | 7,334 | 40 | 279,6 | | |
| 2,0 | 0,750 | 5,0 | 7,976 | 50 | 395,3 | | |
| 2,1 | 0,888 | 5,2 | 8,636 | 60 | 523,6 | | |
| 2,2 | 1,036 | 5,4 | 9,315 | 70 | 663,3 | | |
| 2,3 | 1,193 | 5,6 | 10,01 | 80 | 813,7 | | |
| 2,4 | 1,358 | 5,8 | 10,73 | 90 | 974,1 | | |
| | | 6,0 | 11,46 | | | | |

Bei der Konzipierung einer PIERCE-Kanone sind meist (wie im vorliegenden Fall) folgende Daten vorgegeben: Brennfleck-Durchmesser d_B , erforderliche Heizleistung N_B im Brennfleck, verfügbare Glühkathode (mit Durchmesser $d_c = 2 r_c$) samt deren Heizleistung $U_h \cdot I_h$ aus Trenntrafo (!), erforderlicher Arbeitsabstand a_o zwischen Target und Elektronenkanone (gemessen von der Lochanode-innen!).

Die erforderliche Strahlleistung im Brennfleck N_B läßt sich mit verschiedenen Werten der Beschleunigungsspannung U und des Strahlstroms I realisieren; maßgeblich ist dabei die verfügbare Hochspannung bei entsprechender Stromstärke (durchgeführt ins Hochvakuum der Elektronenkanone!) sowie die gewünschten Strahleigenschaften. Je nach Aufspaltung des $N_B = U \times I$ - Produkts ergeben sich entsprechende Perveanzwerte $P = I/U^{3/2}$, wobei für die Strahleigenschaften kleinere Stromwerte I förderlich sind. Die so gefundenen theoretisch ausreichenden Perveanzwerte sollte man mindestens mit einem Sicherheitsfaktor 2 versehen.

Zu den nun vorliegenden Daten für a_0, d_B, r_c, P wählt man passende Werte für θ, ξ, r_a, γ und s , wobei der Elektrodenabstand s wegen der Gefahr von Hochspannungsüberschlägen an den Elektrodenrändern genügend groß sein muß!

3. Konstruktions- und Betriebsdaten von zwei Elektronenkanonen

Im folgenden wird die Konstruktion zweier Elektronenkanonen vom PIERCE-Typ beschrieben. Sie unterscheiden sich - durch die Formgebung ihrer Elektroden bedingt - vor allem in Durchmesser und Fokussierung des Strahls und mithin auch in der Perveanz. Im technischen Aufbau sind sie gleichartig.

Abb.7 zeigt eine der beiden Kanonen. Man sieht oben die Katodenelektrode, unten - in einem Edelstahl-Tragring hängend - die Lochanode, gegeneinander isoliert durch ein 100° -Segment eines zylindrischen Keramikrings aus dichtgesintertem Aluminiumoxid. Beide Elektroden bestehen (zwecks besserer Wärmeableitung) aus Kupfer und haben polierte Oberflächen. Die Lochanode ist mittels Feingewinde in den Tragring eingeschraubt; ihr Abstand von der Katode kann somit verändert und exakt eingestellt werden. In der Mitte der Katodenelektrode sitzt - genau justiert - die leicht auswechselbare Glühkatode. Sie besteht aus einer Schnecke von Wolframdraht, die durch einen Heizstrom von 16A auf ca. 2500°C geheizt wird. Die Wolframschnecke ist wegen des starken Heizstroms bifilar gewickelt, um das magnetische Störfeld der Glühkatode zu unterdrücken.

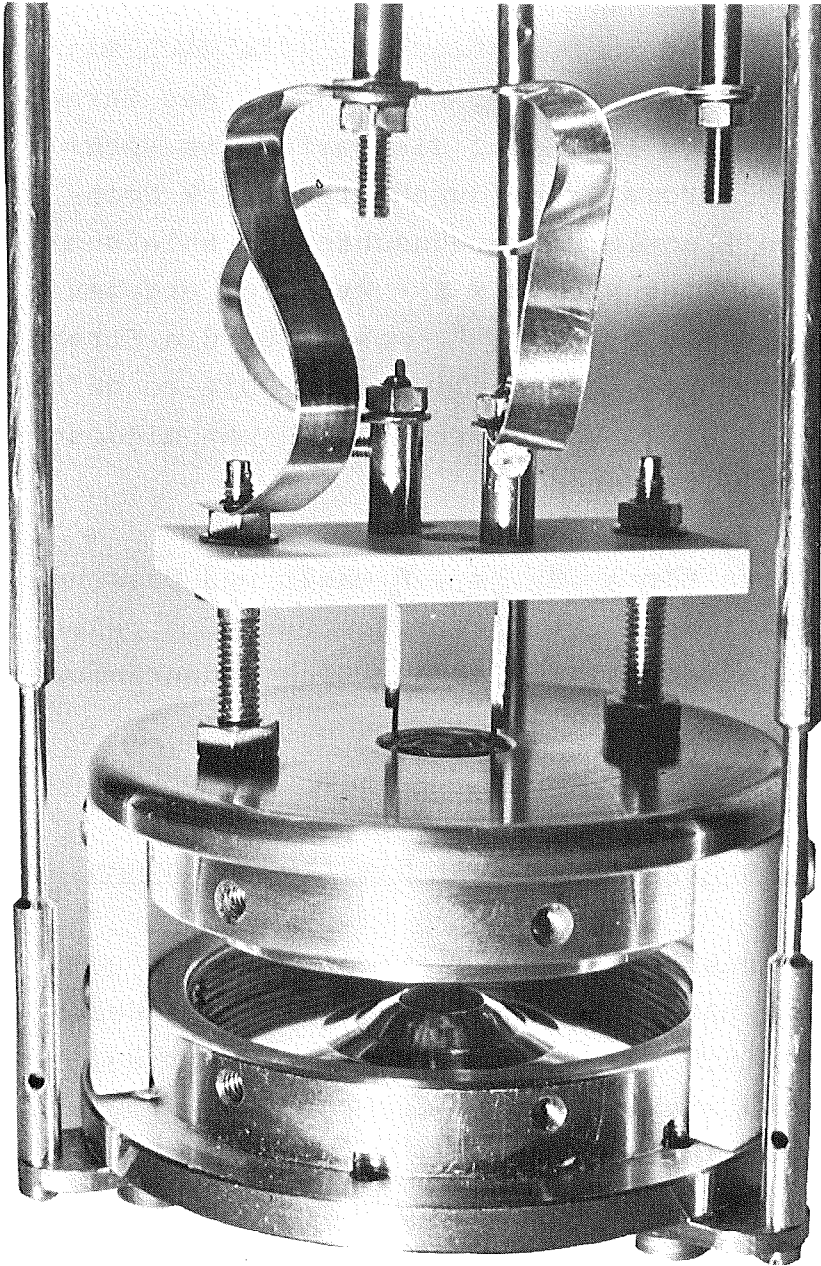
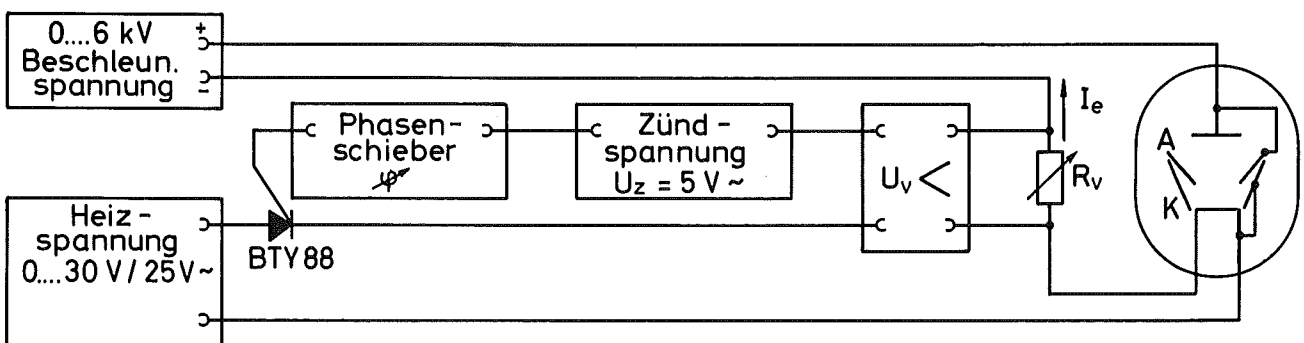


Abb. 7

Elektronenkanone vom PIERCE-Typ



Prinzip-Schaltbild für Steuerung und Stabilisierung des Strahlstroms

Zwischen den beiden Elektroden liegt die Beschleunigungsspannung, wobei die Lochanode auf Erdpotential liegt. Die Hochspannung für die Katode und der auf gleicher Hochspannung liegende Heizstrom für die Glühkatode werden durch 2 kleine (NW 11 mm \emptyset !) Keramik-Metall-gelötete Isolatoren ins Vakuum durchgeführt. Durch die Wahl der Materialien (Kupfer; reines, dichtes Aluminiumoxid; Wolfram; Edelstahl; Kovar) und entsprechende Konstruktion (z.B. Vermeidung von Schein-Leckkraten aus Toträumen in Gewinden! ect.) können beide Elektronenkanonen samt Durchführungen bei ca. 500°C im Vakuum ausgeheizt und auch im Ultrahochvakuum ($\geq 10^{-10}$ Torr!) betrieben werden.

Die Stromversorgung besteht im wesentlichen aus einem Hochspannungsnetzgerät, das einen möglichst glatten Gleichstrom (= Strahlstrom der Kanone) liefert - und einer Niederspannungsversorgung für die Glühkatode, die ebenfalls auf Hochspannung liegt. Um die Strahlleistung konstant halten zu können, wurde folgende Phasenanschnitts-Regelung angewandt (Abb.8): Die (ungeregelte) Beschleunigungsspannung (max. 7 kV) wird einem Hochspannungstransformator über einen Zweiweg-Gleichrichter mit Siebglied entnommen; die zugehörige Primärspannung ist stabilisiert. Der Heizstrom der Glühkatode wird durch Phasenanschnitt mit einem Thyristor (BTY 88) geregelt bzw. gesteuert. Die Wechselfspannung U zündet den Thyristor; ihr ist die Gleichspannung U_V unterlegt, die den Zündpunkt verschiebt. Die Spannung U_V entsteht durch den (verstärkten) Spannungsabfall des Emissionsstroms I im Potentiometer R_V . Schwankungen des Strahlstroms I werden also durch Änderung des Heizstromflußwinkels ausgeregelt. Der Soll-Zündpunkt wird am Phasenschieber (d.i. im wesentlichen eine variable Gleichspannung) eingestellt.

3.1 Elektronenkanone mit schwach fokussiertem Strahl

Es werden im folgenden die Daten der Elektronenkanone angegeben, die zur Aufheizung des Emitters in einer Plasmadiode auf über 2000 °C entwickelt und eingesetzt wurde. Da in diesem Fall der Targetdurchmesser relativ groß war und außerdem noch variierte (10...14 mm \emptyset), empfahl sich die Wahl einer PIERCE-Geometrie, die außerhalb der Lochanode ($d_a = 8$ mm \emptyset) einen leicht divergenten

Strahl liefert. Die so gebaute Kanone weist deshalb folgende Konstruktionsdaten auf:

| | | | |
|--------------------|-----------|-----------|-------------------------------------|
| Lochanode | d_a | = | 8 mm \varnothing |
| Öffnungsverhältnis | r_c/r_a | = | 1,35 |
| innere Konvergenz | θ | = | 10° |
| Randdivergenz (!) | γ | \approx | -1° |
| "Apertur" | s/d_a | = | 1 |
| Elektrodenabstand | s | = | 8 mm |
| Perveanz | P | \approx | $2 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}^{3/2}$ |

Die fett ausgezogenen Linien in Abb.6b zeigen die zugehörigen Elektrodenformen. Die Maximalleistung dieser Kanone in Verbindung mit dem oben beschriebenen Versorgungsteil liegt bei etwa 1,5 kW Strahlleistung. Die Leistungsgrenze der Kanone selbst liegt erheblich höher.

Beim Einsatz in der Plasmadiode wurde die Kanone abweichend von den obigen Solldaten wie folgt betrieben:

| | | | |
|--------------------|-------|--------|-------------------------------------|
| Elektrodenabstand | s | = | 16 mm |
| Arbeitsabstand | a_o | = | 80 mm |
| Brennfleckgröße | d_B | = | 14 mm \varnothing |
| gemessene Perveanz | P | = | $4 \cdot 10^{-7} \text{ A/V}^{3/2}$ |
| Strahlleistung | N | \leq | 0,5 kW |

3.2 Elektronenkanone mit stark fokussiertem Strahl

Die zweite entwickelte PIERCE-Kanone liefert einen relativ stark fokussierten Strahl aus einer großflächigen Glühkatode. Ihre Konstruktionsdaten sind:

| | | | |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------------------------|
| Lochanode | d_a | = | 8 mm \emptyset |
| Öffnungsverhältnis | r_c/r_a | = | 2 |
| innere Strahlkonvergenz | θ | = | 22° |
| Rand-Strahlkonvergenz | γ | \approx | 8° |
| "Apertur" | s/d_a | = | 1 |
| Elektrodenabstand | s | = | 8 mm |
| Arbeitsabstand | a_o | \approx | 80 mm |
| Brennfleckgröße | d_B | \approx | 6 mm \emptyset |
| Perveanz | P | \approx | $10^{-6} \text{ A/V}^{3/2}$ |

Die fett ausgezogenen Linien in Abb.6c zeigen die Elektrodenformen der Kanone. Für die maximale Strahlleistung gilt ebenfalls das in 3.1 Gesagte.

Beim Betrieb dieser relativ stark fokussierenden Elektronenkanone zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit des Strahldurchmessers vom Restgasdruck in der Vakuumkammer! Startet man die Kanone bei einem Druck von ca. $1 \cdot 10^{-4}$ Torr - darüber ist ein Betrieb wegen Hochspannungsüberschlägen nicht möglich - und senkt dann den Druck allmählich auf z.B. $1 \cdot 10^{-5}$ Torr, so verbreitert (!) sich der Strahl dabei von 6 mm \emptyset bis auf 8 mm \emptyset (bei einem Arbeitsabstand $a_o = 100$ mm von der Lochanode). Der Grund hierfür ist eine teilweise Kompensation der negativen Raumladung in dem frei laufenden Elektronenstrahl durch positive Restgasionen [47]. Diese Ionen entstehen durch Stoßionisationsprozesse zwischen den Strahlelektronen und dem Restgas.

4. Literatur

- [1] J.R. PIERCE: J. Appl. Phys. 11, 548 (1940)
- [2] D. KAMKE: Hadb. Phys. 33, 1 (1956), Berlin-Göttingen-Heidelberg
- [3] R. HELM et al.: Electr. Commun. 24, 101 (1947)
- [4] L.M. FIELD et al.: Electr. Commun. 24, 108 (1947)

Untersuchungen zu PIERCE-Anordnungen findet man auch bei

A. SCHMIDT: Diplomarbeit, Göttingen/Karlsruhe (1960)
(Kopien hierzu: Kernforschungszentrum Karlsruhe)