

KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE

Juni 1962

KFK 107

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik

Zwei leistungsstarke Neutronengeneratoren
für Impuls- und Dauerbetrieb

Werner Eyrich

KERNREAKTOR
Bau- und Betriebs-Gesellschaft m. b. H.
Verwaltung der Zentraibücherei

27. Aug 1962



KERNREAKTOR

BAU- UND BETRIEBS-GESELLSCHAFT M. B. H.

KARLSRUHE

KERNREAKTOR

Bau- und Betrieb des Kernreaktors
Verwaltung der Zentralliteratur

Zwei leistungsstarke Neutronengeneratoren für Impuls- und Dauerbetrieb

Von WERNER EYRICH

(Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik, Kernforschungszentrum Karlsruhe)

Mit 13 Textabbildungen

(Eingegangen am 27. Dezember 1961)

Zusammenfassung. Es wird über den Aufbau und die Wirkungsweise von zwei leistungsstarken Neutronengeneratoren berichtet. Die Generatoren benutzen die (d, T) -Reaktion mit Deuteronen, die auf 250 bzw. 400 kV beschleunigt werden. Der allgemeine Aufbau, die Konstruktion der Ionenquelle und die Beschleunigungsstrecke werden beschrieben. Die Generatoren verfügen über spezielle Pulseinrichtungen für den Ionenstrom, deren Funktionsweise diskutiert wird. Die Instantanquellstärke der Generatoren beträgt bis zu $5 \cdot 10^{12}$ Neutronen/sec.

1. Einleitung

Während des Jahres 1959 sind zwei Neutronengeneratoren im Kernforschungszentrum Karlsruhe fertiggestellt und in Betrieb genommen worden. Es handelt sich um Kaskadenbeschleuniger mit Spannungen von 250 bzw. 400 kV. Das Prinzip des Kaskadenbeschleunigers ist an sich seit langer Zeit bekannt und es sind bereits viele derartige Geräte in der Literatur beschrieben worden. Da jedoch unsere Anlagen eine Reihe besonderer Konstruktionsmerkmale aufweisen, soll über sie in der vorstehenden Arbeit berichtet werden.

Einer der Generatoren ist ortsfest aufgestellt und kann Deuteronen bis auf eine Spannung von 400 kV beschleunigen (Bezeichnung NG 400). Der andere Beschleuniger ist fahrbar und hat eine Endenergie von 250 kV (NG 250). Beide Beschleuniger benutzen zur Neutronenerzeugung die Reaktion $\text{H}^3(d, n)\text{He}^4$, die bereits bei kleinen Beschleunigungsspannungen eine große Neutronenausbeute zeigt. Das Tritium liegt dabei in der Form von Tritium-Titargets vor, das sind mit Tritium beladene Titanfolien. Die Folien können von AERE, Harwell und aus USA bezogen werden. Eine eigene Apparatur zur Herstellung solcher Targets ist in Vorbereitung. Die Quellstärke eines solchen Targets beträgt $2 \cdot 10^9$ n/sec μA Deuteronenstrom bei einer Deuteronenenergie von 200 keV.

Durch elektronische Schalt- und Steuerungsvorrichtungen ist es möglich, den Deuteronenstrahl und damit die Neutronenproduktion zu pulsen. Die Impuls-

zeiten können von $0,5 \mu\text{sec}$ bis zu einigen msec betragen. Die Impulsfrequenz ist beliebig, jedoch darf in der Regel das Tastverhältnis nicht größer als 1:10 sein. Diese Generatoren werden unter anderem bei folgenden Experimenten eingesetzt:

1. Bestrahlungsexperimente z.B. für radiochemische Zwecke oder zur Herstellung stationärer Neutronenfelder.

2. Erzeugung gepulster Neutronenfelder in Moderatoren zur Messung von deren Diffusions- und Absorptionseigenschaften [1].

3. Herstellung gepulster Neutronenfelder in kritischen und unterkritischen Reaktoren. Dies ist eine Meßmethode zur Bestimmung des Multiplikationsfaktors bzw. der Reaktivität. Sie wurde während der Arbeiten zur Vorbereitung und Inbetriebnahme des FR 2 in weitem Umfang angewandt [2], [3].

4. Untersuchung thermischer Neutronenspektren nach der Laufzeitmethode [4].

2. Aufbau und Wirkungsweise der Generatoren

Abb. 1 zeigt ein Blockschaltbild, das grundsätzlich für beide Generatoren gilt. Die positive Beschleunigungsspannung wird in einem Hochspannungsgerät (2) erzeugt und über einen Dämpfungswiderstand (3) an den Faraday-Käfig (4) angeschlossen. Innerhalb des Faraday-Käfigs befindet sich die Ionenquelle (6) nebst allen für ihren Betrieb erforderlichen elektrischen Zusatzeinrichtungen. Aus der Ionenquelle treten Deuteronen in das evakuierte Beschleunigungsrohr (5) ein

und werden dabei durch ein elektronenoptisches Linsensystem (8) auf das Target (25) fokussiert. Die Steuerung der Hochspannung und der Ionenquelle erfolgt fernbedient von der Schaltzentrale (1) aus. Bei

kade, die eine Hochspannung bis 400 kV und einen Gleichstrom bis 20 mA abgibt (Siemens-Selengleichrichter). Über einen Dämpfungswiderstand von 150 k Ω erfolgt die Stromzuführung zum Faraday-Käfig, der auf vier Pertinax-Rohren mit einer Länge von 2000 mm angebracht ist. Man erkennt den Riemenantrieb für den Generator im Faraday-Käfig sowie die Antriebswellen für die Regeltransformatoren. Das waagerechte Beschleunigungsrohr ist hochspannungsseitig auf einem U-Rahmen beweglich gelagert. Das andere Ende des Isolators ist mit einem T-Stück verschraubt, das von einem Rohrrahmen getragen wird und an das die Öldiffusionspumpe und das Targetrohr angeflanscht sind.

Abb. 4 und 5 zeigen den Neutronenimpulsgenerator NG 250. Bei dieser Anlage sind sowohl Hochspannungserzeugung als auch Beschleunigungseinrichtung auf einem 4260 mm langen und 1200 mm breiten Rahmen angeordnet. Der Rahmen steht auf Rollen, kann aber auch an Kranhaken bewegt werden. Dadurch wird die Gesamtanlage außerordentlich wendig und kann für viele Neutronenexperimente Verwendung finden. Der Rahmen und damit die gesamte Anlage lassen sich für den Transport unter Umständen auch noch weiter auseinandernehmen, dazu kann an der in der Abb. 5 mit z bezeichneten Stelle der Rahmen in zwei Teile auseinandergeschraubt werden.

Die Erzeugung der Hochspannung (250 kV) erfolgt mit einer Hochfrequenzkaskade Fabrikat Carl Zeiss, Oberkochen (Stromergiebigkeit 1 mA; Spannungsstabilisierung auf 10^{-3}). Sämtliche Kontroll- und Regelorgane für die Ionenquelle laufen hier waagrecht in den Faraday-Käfig. Der Faraday-Käfig ist auf vier 1200 mm langen Pertinax-Säulen gelagert. Das Beschleunigungsrohr ist erdseitig an den Grundrahmen angeflanscht und wird hochspannungsseitig von zwei Pertinax-Stützzrohren (16) getragen. Diese Konstruktion wurde gewählt, um die oben erwähnte Möglichkeit zur Zerlegung der Apparatur

in zwei Teile offenzuhalten und um beim Transport das Auftreten von mechanischen Spannungen am Rohr zu vermeiden.

Die gesamte Apparatur ist von einem an das Fahrgestell montierten Schutzgitter umgeben, das zum Transport abgenommen wird.

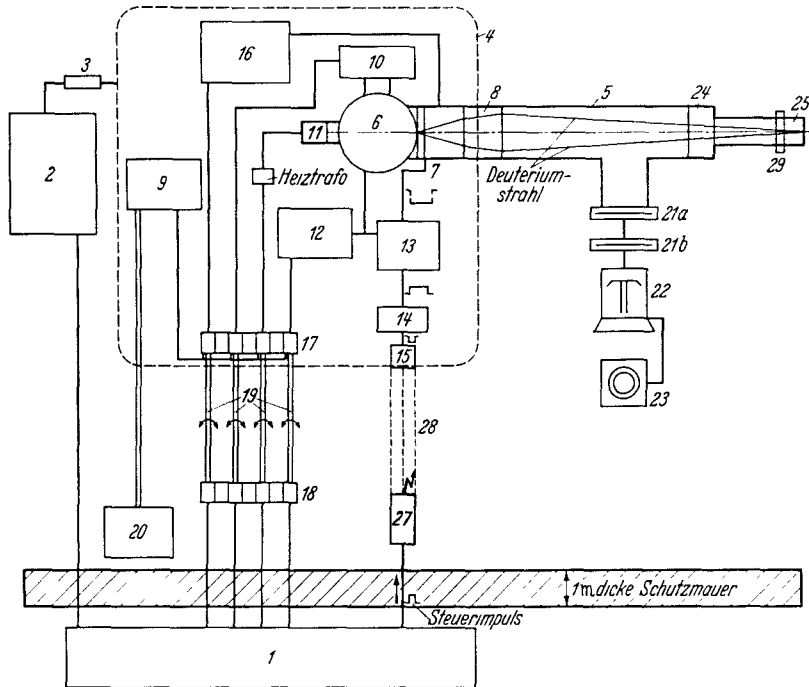


Abb. 1. Blockschaltbild der Neutronenimpulsgeneratoren. 1 Schaltzentrale; 2 Hochspannung, 3 Widerstand; 4 Faraday-Käfig; 5 Beschleunigungsrohr; 6 HF-Ionenquelle; 7 Absaugelektrode mit Kanal; 8 elektronenoptisches Linsensystem; 9 220 V-50 Hz-5,5 kW-Generator; 10 HF-Sender, 11 Palladiumventil; 12 13 kV-Hochspannungsgesetz; 13 Impulsgerät; 14 Univibrator; 15 Multiplier; 16 40 kV-Hochspannungsgesetz; 17 Regeltransformatoren; 18 Regelmotoren mit Fernanzeige; 19 Regelstäbe; 20 Motor; 21a Frigenkühlfalle; 21b Wasserkühlfalle; 22 Diffusionspumpe; 23 Vorpumpe; 24 Schleusenventil; 25 Auffänger, in dem die Neutronen erzeugt werden; 27 Oszillographenröhren; 28 Lichtleiter, 29 Fokussierungsanzeiger

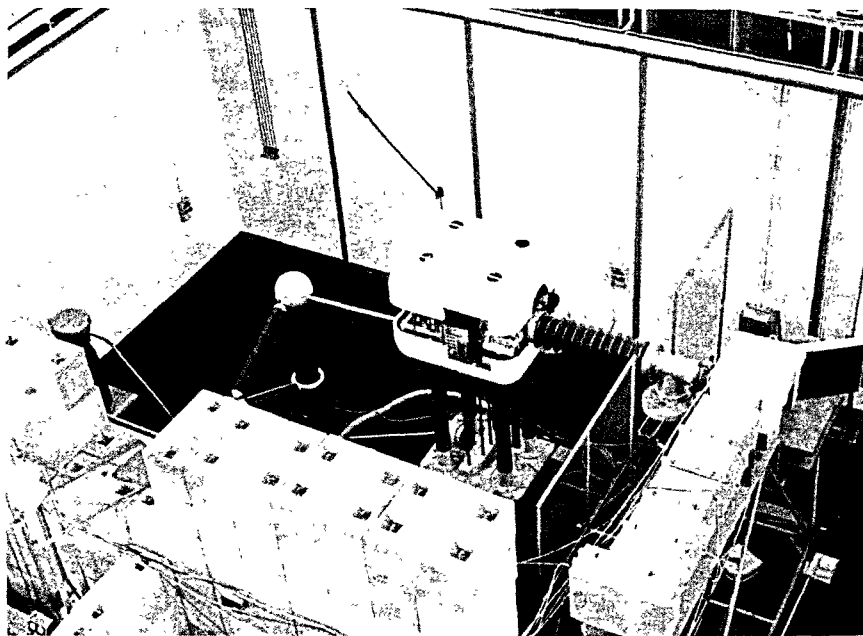


Abb. 2. Vogelschau des Neutronenimpulsgenerators NG 400

Impulsbetrieb erfolgt der Anstoß der Ionenquelle über ein optisches System [Oszillographenröhre (27), Lichtleiter (28), Multiplier (15)].

Abb. 2 und 3 lassen den Aufbau des Neutronenimpulsgenerators NG 400 erkennen. Die Erzeugung der Hochspannung erfolgt in einer zweistufigen Kas-

3. Die Ionenquelle

Von der Größe des Ionenstroms, der auf das Target trifft, ist die Anzahl der erzeugten Neutronen abhängig. Es war daher unser Ziel, eine Ionenquelle zu entwickeln, die einen möglichst hohen nutzbaren Ionenstrom liefert und darüber hinaus sehr betriebssicher

Die Anregung der Entladung erfolgt über die Sendespule (25). Es wird ein Gegentaktsender mit zwei Röhren TB 2,5/400 verwandt; die maximale Sendeleistung beträgt etwa 700 W, Frequenz = 27 MH. Die Elektrode (11) und der Flansch (5) befinden sich auf gleichem Potential; eine Absaugspannung bis zu

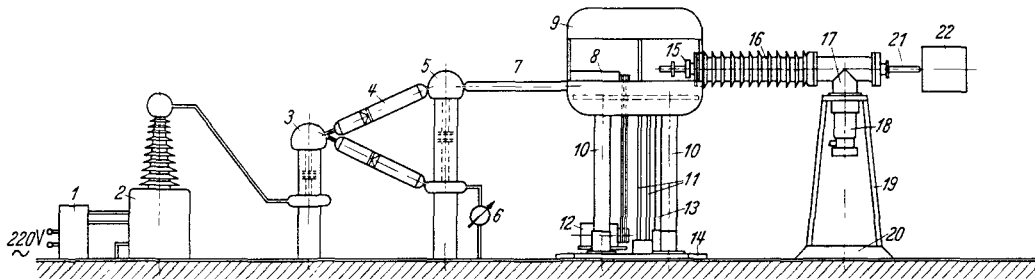


Abb. 3. Seitenansicht des Neutronenimpulsgenerators NG 400. 1 Regeltrafo; 2 200 kV-Trafo; 3 Schubkondensator; 4 Gleichrichter; 5 Ladekondensator; 6 Gleichstromanzeiger; 7 Dämpfungswiderstand; 8 220 V-5,5 kW-50 Hz-Generator; 9 Faraday-Käfig; 10 vier Tragsäulen aus Pertinax-Rohr; 11 Regelstäbe aus Pertinax; 12 Motor mit Riemenantrieb; 13 Lichtleiter mit Kathodenstrahlröhre und Multiplier; 14 Grundplatte aus Stahl; 15 Ionenquelle; 16 Beschleunigungsrohr aus Porzellan; 17 T-Stück NW 250; 18 Diffusionspumpe; 19 Rohrtragrahmen; 20 Tragrahmen für das Ionenrohr; 21 Target-Rohr; 22 bestrahlte Materie

ist. A. SCHMIDT [5] hat gezeigt, daß es durch konsequente Verfolgung ionenoptischer Gesichtspunkte möglich ist, Hochfrequenzionenquellen außerordentlich hoher Stromgiebigkeit zu bauen. Unter Verwendung dieser Konstruktionsprinzipien, die vor allem das Extraktionssystem betreffen, ist es uns gelungen, eine leistungsfähige Ionenquelle zu erstellen.

Abb. 6 zeigt den Aufbau einer der von uns verwendeten Hochfrequenzionenquellen.

Der Gaseinlaß erfolgt durch ein am oberen Ende direkt aufgeflansches Palladiumventil, das durch direkten Stromdurchgang erhitzt wird¹. Die Gaszufuhr zum Ventil erfolgt durch den seitlich angebrachten Flansch (22). Als Gasquelle dient eine Deuterium-Elektrolysezelle, die normalerweise auf Erdpotential steht. Durch eine Bohrung im Abschlußflansch (5) tritt das Gas in das aus Pyrex gefertigte Entladungsgefäß (14) ein. Das Entladungsgefäß ist mit Hilfe von Aluminiumstäben (20) zwischen die beiden Abschlußflansche (5) und (4) derart eingespannt, daß beim Ausbauen die gesamte Ionenquelleneinheit montiert bleibt. Das Extraktionssystem besteht aus den drei Elektroden: Plasmaelektrode (11), Absaugelektrode (10) und Gegenspannungselektrode (9). Jede dieser Elektroden ist mit einem Flansch direkt verbunden; dies geschieht aus Gründen der besseren Wärmeableitung. Zur Isolation befindet sich zwischen den Flanschen 3 und 4 ein Porzellanring, zwischen den Flanschen 2 und 3 ein Teflontragring mit Silikonringabdichtung. Die Flansche 2 und 4 sind mit PVC-Stützen zusammengeschräubt. Flansch 2 sitzt über dem Glaszylinder (12) unmittelbar auf der ersten Linsenelektrode (1).

¹ Ein verstopftes Palladiumventil wird wieder durchlässig, wenn es $1/2$ Std lang mit einer Vorpumpe evakuiert wird.

— 15000 V liegt an der Extraktionselektrode (10). An der Elektrode (9) liegt stets eine um 1000 V positivere Spannung als an der Elektrode (10). Der Zweck dieser Elektrode wird später erläutert werden.

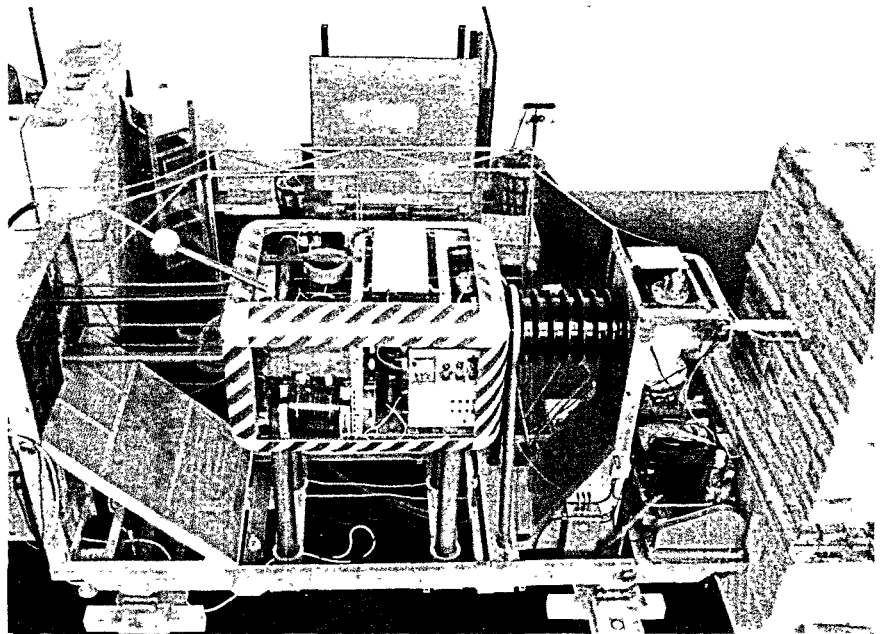


Abb. 4. Der fahrbare Neutronenimpulsgenerator NG 250

Die Form des Extraktionssystems ist die von SCHMIDT [5] angegebene. Durch Verwendung der Plasmaelektrode und durch geeignete Formgebung des Elektrodenraumes zwischen Elektrode (11) und (10) lassen sich — ähnlich wie bei einer Pierce-Elektronenoptik — Raumladungseffekte weitgehend kompensieren. Man kann dadurch einen sehr hohen Ionenstrom durch den Extraktionskanal in den Nachbeschleunigungsraum ziehen und erhält keine starke Strombelastung der Elektroden. Die Plasmaelektrode ist gegenüber dem Entladungsraum mit Glas abgedeckt, um eine zu starke Rekombination zu vermeiden. Dem gleichen Zweck dient die Quarz-Abdeckplatte (15).

Abb. 7a und b zeigen vergrößert zwei im einzelnen untersuchte Extraktionssysteme. Mit der in Abb. 7a

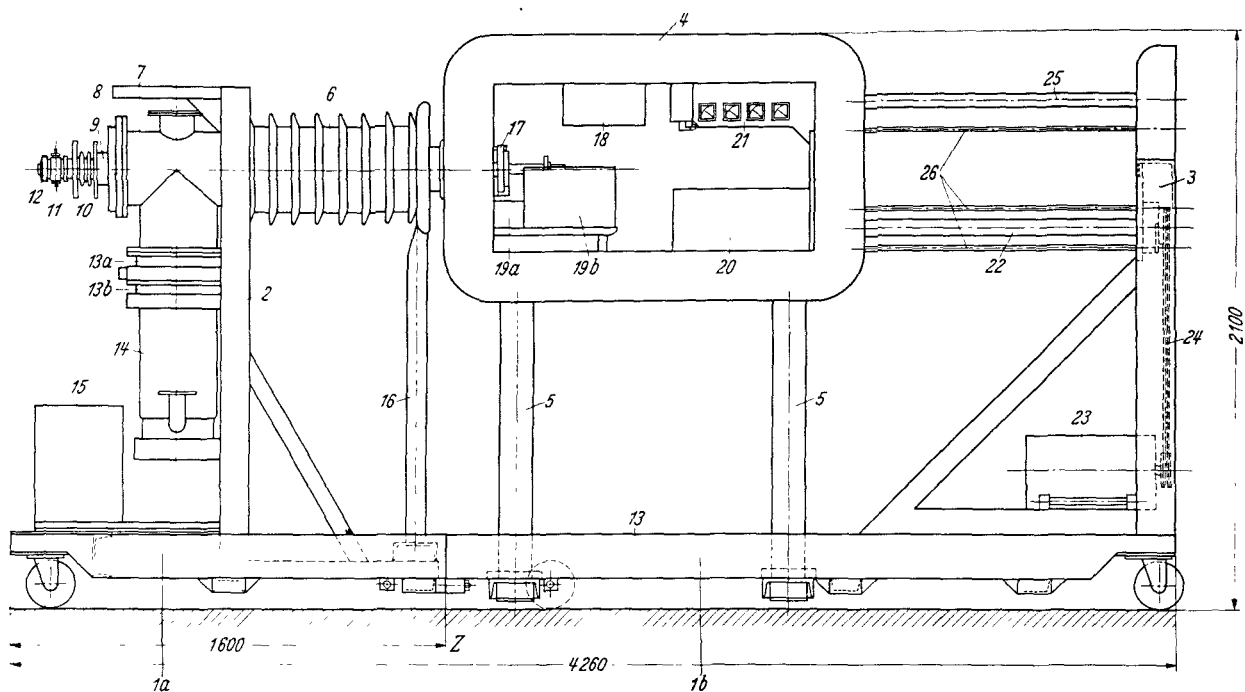


Abb. 5. Schematische Seitenansicht des Neutronenimpulsgenerators NG 250; 1a, 1b Grundrahmen aus U-Eisen zweiteilig; 2 Grundrahmen für das Ionenrohr; 3 Rahmen für den Generatorantrieb; 4 Paraday-Käfig; 5 Pertinax-Tragsäule; 6 Beschleunigungsrohr mit zwei Pertinaxträgern 16; 7 T-Stück; 8 Schleusenventil; 9 Glaszylinder; 10 Metallbalg; 11 Fokussierungsanzeiger; 12 Target; 13 bis 15 Vakuumanlage; 16 zwei Pertinax-Tragsäulen für das Ionenrohr; 17 Ionenquelle; 18 15 kV-Netzgerät; 19a 27 MHz-Sender; 19b 2,5 kV-500 mA-Netzgerät für den Sender; 20 220 V-5,5 kW-Generator; 21 Anzeigeelemente für Linsenspannung, Saugspannung, Generatorspannung und Absaugstrom; 22 Antriebswelle für den Generator 20 aus PVC; 23 Antriebsmotor; 24 Riemenübertragung; 25 Lichtsteuerung; 26 Regelstäbe; z Trennstelle

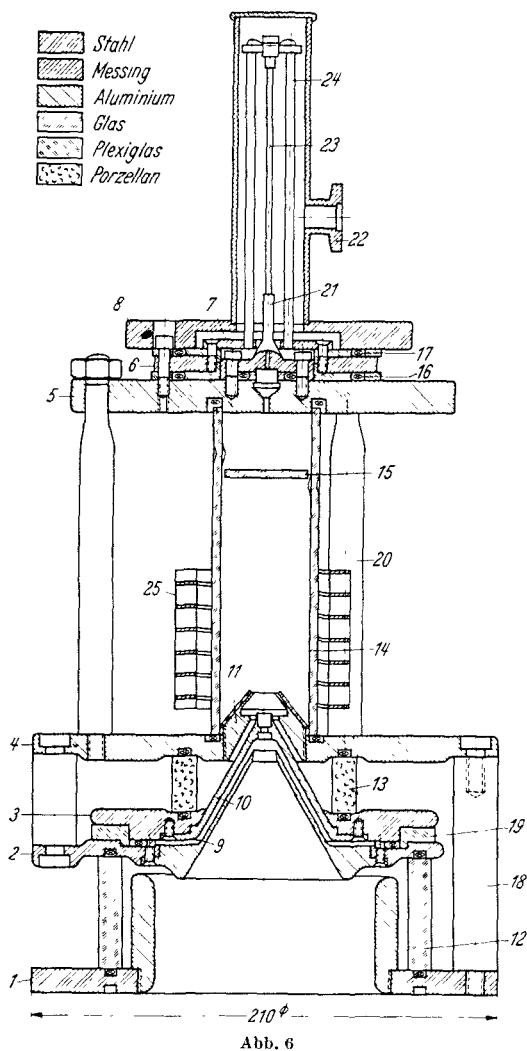


Abb. 6

gezeigten Vorrichtung ließ sich ein fokussierbarer Ionenstrom (Messung am Target des Beschleunigers!) von 16 mA, mit der in Abb. 7b gezeigten Anordnung ein Strom von 26 mA erreichen. Nähere Angaben zur Auslegung solcher Extraktionssysteme und allgemeine Gesichtspunkte zur Optimierung von Hochfrequenzquellen finden sich in der bereits mehrfach zitierten Arbeit von A. SCHMIDT.

4. Einrichtungen für den Impulsbetrieb der Ionenquelle

Normalerweise werden die Generatoren NG 250 und NG 400 nur im Impulsbetrieb benutzt. Dazu ist es erforderlich, den Ionenstrom der Quelle entsprechend ein- und auszuschalten. Grundsätzlich existieren die folgenden Möglichkeiten zum Impulsbetrieb einer Hochfrequenzquelle: Pulsung des Senders. Pulsung der Extraktionsspannung oder kombinierte Pulsung des Senders und der Extraktionsspannung. Bei den hier beschriebenen Neutronengeneratoren wird die Extraktionsspannung gepulst. Die dabei zur Verwendung kommende Prinzipschaltung zeigt die Abb. 8. Die Ionenquelle liegt im Anodenkreis einer Schaltöhre. In den Pausen zwischen den Pulsen ist die Schaltöhre geschlossen; durch den Widerstand

Abb. 6. Die Ionenquelle. 1 Grundflansch mit der ersten Linsenelektrode; 2 Gegenspannungsflansch mit Elektrode 9; 3 Absaugelektrodenflansch mit Elektrode 10; 4 Plasmaflansch mit Elektrode 11; 5 oberer Abschlußflansch mit Palladiumventil; 6 und 7 Stromzuführungsflansche für das Palladiumröhrchen. Sie sind zwischen zwei Tragringen 16, 17 mit Schmirgeln eingespannt. 8 Abdeckhaube aus Aluminium mit Kleinflanschanschluß 22. 9 Gegenspannungselektrode; 10 Saugspannungselektrode; 11 Plasmaelektrode mit Glasabdeckung; 12 Glaszylinder; 13 Porzellanring; 14 Pyrexglaszylinder; 15 Abdeckplatte aus Quarzglas; 16 und 17 Tragringe mit Schmirgeln aus PVC; 18 Stützsäulen aus PVC bzw. Plexiglas; 19 Tragring aus Teflon, Silikondichtungsring und Außenträger aus Plexiglas; 20 drei Spannsäulen aus Aluminium; 21 Tragflansch aus V2A für das Palladiumröhrchen; 22 Deuteriumzuführungsflansch, Kleinflansch NW 10; 23 Palladiumröhrchen. Es ist in den Flansch 21 hart eingelötet; auf das obere Ende ist eine Schraube aufgelötet. 24 Stromzuführungssäulen für das Palladiumröhrchen; 25 Anodenschwingkreisspule

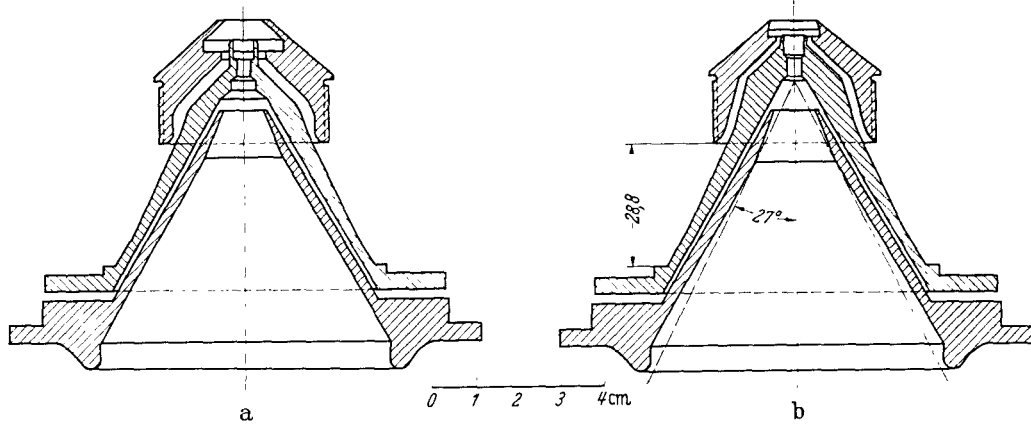


Abb. 7. a Absaugsystem für etwa 16 mA; b Absaugsystem für etwa 26 mA

bei (1) liegt die Absaugelektrode auf dem Anodenpotential der Ionenquelle und es fließt kein Ionenstrom. Soll ein Impuls ausgelöst werden, so wird die Schaltrohre geöffnet. Das Extraktionssystem wird dadurch niederohmig an das Kathodenpotential angeschlossen. Die verschiedenen Experimente verlangen eine sehr saubere Vorderflanke des Neutronenimpulses (etwa 0,5 μ sec oder kleiner). Damit der Ionenstrom in einer derart kurzen Zeit seine volle Höhe erreichen kann, ist es erforderlich, daß sich das Potential an der Extraktionselektrode entsprechend schnell aufbaut. Das erfordert, daß die unvermeidlichen Streukapazitäten von etwa 100 pF entsprechend schnell umgeladen werden können. Die Schaltrohre muß daher sehr steil sein und einen hohen Emissionsstrom besitzen; wir verwenden die Röhre QB 3,5/750. Es ist ebenfalls erforderlich, daß die Impulse eine saubere Rückflanke erhalten. Diese Rückflanke wird bestimmt durch die Zeitkonstante $R \cdot C$, wo C die Streukapazität und R der Parallelwiderstand ist.

Abb. 9 zeigt das Schaltbild der Endstufe des Impulsgenerators. Die Schaltrohre wird angesteuert von einem speziellen Schmitt-Trigger-System mit aufgestocktem Kathodenfolger, das einen positiven Steuerimpuls von 900 V liefert. Der Schmitt-Trigger wird durch einen Univibrator normaler Bauart angelassen, in dem Impulse verschieden einstellbarer Länge (zwischen etwa 0,5 μ sec und 10 msec) erzeugt werden. Der Univibrator wird durch ein vom Schaltpult her drahtlos übertragenes Signal ausgelöst. Dabei hat sich ein optisches System, bestehend aus einer Braunschen Röhre als gepulster Lichtquelle, einem Lichtleiter und einem Multiplier, besonders bewährt.

Für Experimente mit gepulsten Neutronenfeldern ist es besonders wichtig, daß das Verhältnis des Ionenstroms während des Impulses zum Strom in den Impulspausen extrem hoch (10^4 bis 10^5 oder höher) ist. Bei der hier angewandten Methode zeigt es sich jedoch, daß auch in den Pausen zwischen den Impulsen ein Untergrundstrom von etwa 3 μ A fließt. Es handelt sich hierbei um Ionen, die mit dem Gasstrom durch den Kanal hindurch auch bei fehlender Absaugspannung gelangen und anschließend im Nachbeschleunigungssystem beschleunigt werden. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, diesen Untergrund zu beseitigen. Man kann durch ein schwaches Magnetfeld die langsamen Ionen umlenken [6]. Sehr viel wirkungsvoller jedoch ist das Anbringen einer Gegenspannung von etwa 500 bis 1000 V. Wir haben eine Gegenspannung

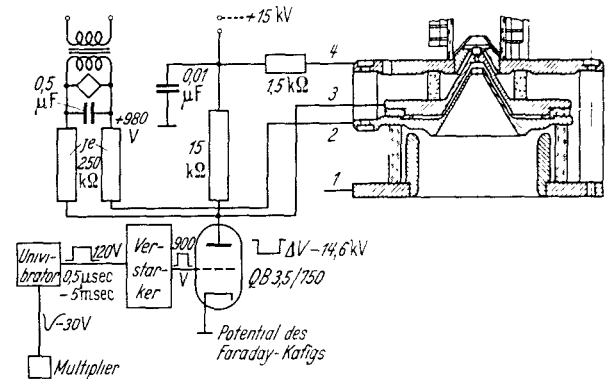


Abb. 8. Prinzipschaltung der Ionenquelle und der Pulseinrichtung. 1 Grundflansch mit der ersten Linsenelektrode; 2 Gegenspannungsflansch; 3 Absaugelektrodenflansch; 4 Plasmaflansch

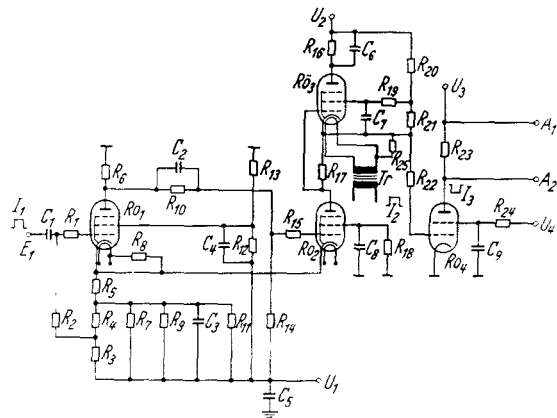


Abb. 9. Schaltbild des Impulsverstärkers. E_1 Eingang; I_1 Eingangsimpuls vom Univibrator (120 V hoch positiv). Impulslänge 0,5 sec bis 5 msec Länge; I_2 Ausgangsimpuls aus dem Verstärker, 900 V hoch positiv; I_3 bis zu 14,6 kV hohe negative Impulse nach dem Endverstärker. A_1 Anschluß zum Plasmaflansch; A_2 Anschluß zur Saugspannungselektrode; $U_1 = 500$ V, 0,3 A Anschluß; $U_2 = 450$ V, 0,2 A Anschluß; U_3 0 bis 15 kV, 80 mA Anschluß; $U_4 = 450$ V Anschluß

Ro1 E130L,	Ro2 E130L,	Ro3 E130L,	Ro4 Qb 3.5.750
R1 50 Ω	R9 2 k Ω 50 W	R17 150 Ω 6 W	
R2 0,1 M Ω 1 W	R10 150 k Ω 6 W	R18 50 k Ω 50 W	
R3 56 k Ω 1 W	R11 1 k Ω 25 W	R19 2,2 k Ω 2 W	
R4 22 k Ω 1 W	R12 10 k Ω 30 W	R20 5 k Ω 200 W	
R5 50 Ω 2 W	R13 20 k Ω 50 W	R21 1 k Ω 50 W	
R6 1,5 k Ω 4 W	R14 39 k Ω 2 W	R22 100 Ω 2 W	
R7 15 k Ω 50 W	R15 59 Ω	R23 15 k Ω	
R8 470 k Ω 0,5 W	R16 300 Ω 12 W	R24 5 k Ω	
C1 0,1 μ F	C4 0,5 μ F	C7 0,25 μ F	
C2 100 pF	C5 10 nF	C8 0,5 μ F	
C3 1 μ F	C6 4,7 nF	C9 4 μ F	

von +950 V an der Elektrode (9) angebracht; dadurch gelingt es, den Untergrundstrom auf weniger als 10^{-5} des Impulsstroms zu reduzieren.

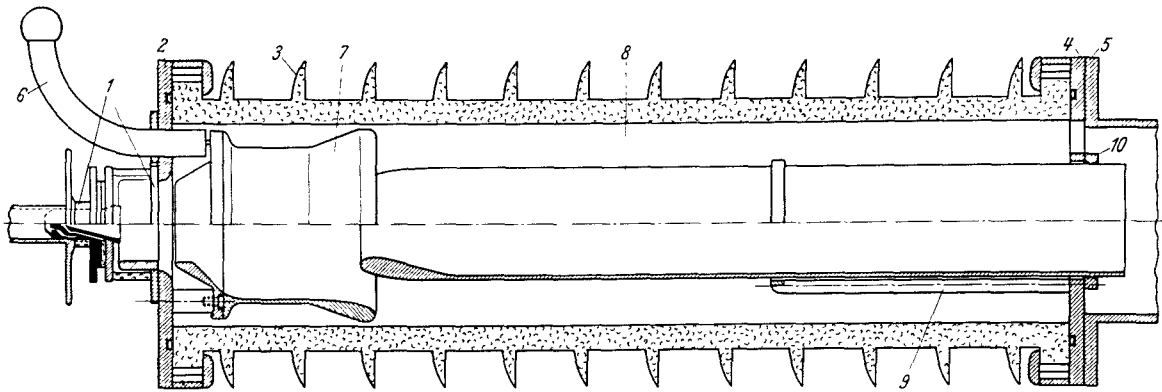


Abb. 10a. Linsensystem des NG 400. 1 Ionenquelle; 2 Abschlußflansch auf der Hochspannungsseite; 3 Porzellanüberwurf; 4 Abschlußflansch auf der Erdseite; er trägt die Erdelektrode 8; 5 T-Stück; 6 Linsenspannungszuführung; 7 Zwischenelektrode des Linsen- und Beschleunigungssystems; 8, 9, 10 Erdelektrode mit Justiereinrichtung

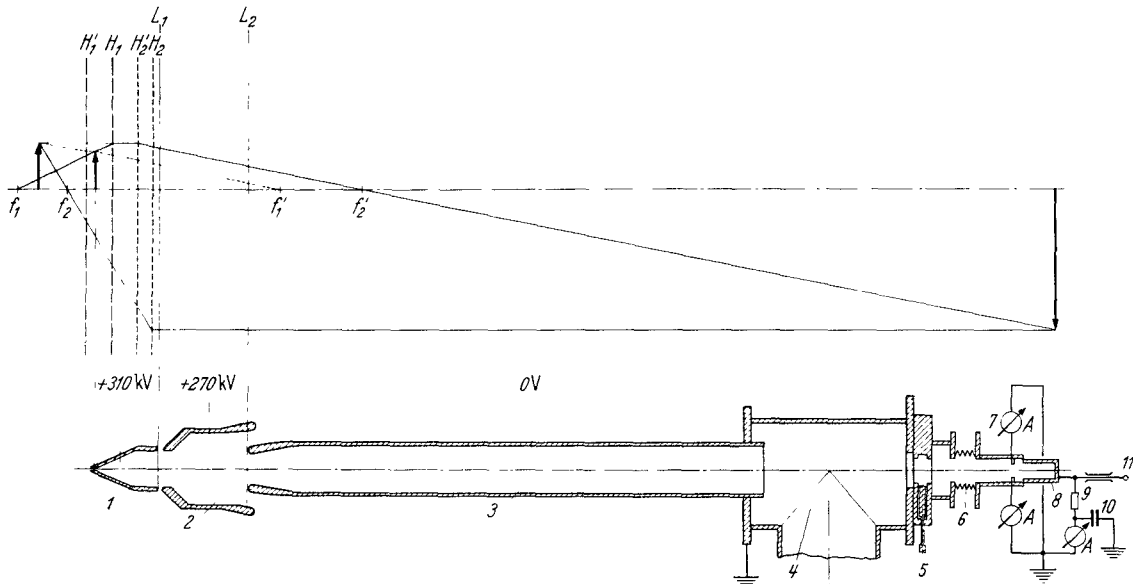


Abb. 10b. Schematische Darstellung des Linsensystems und des elektronenoptischen Strahlengangs. 1 Absaugelektrode mit Kanal, 2 Zwischenelektrode, 3 Erdelektrode, 4 T-Stück; 5 Schleusenventil; 6 Metallbalg; 7 Fokussierungsanzeiger; 8 Target; 9 100 Ω Widerstand, 10 16 μ F Kondensator; 11 zum Oszillographen

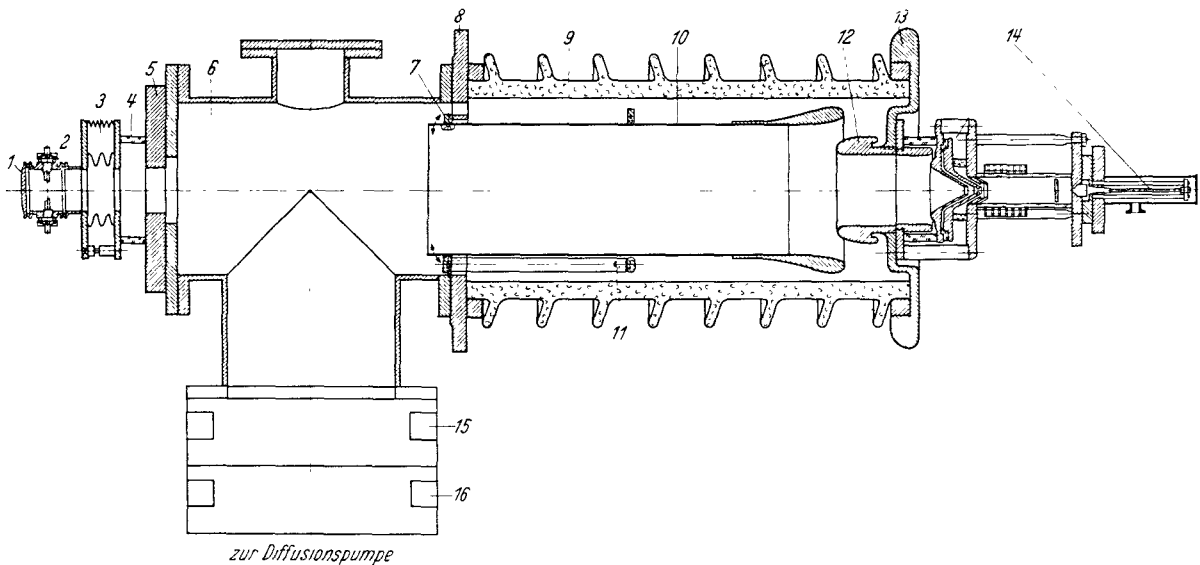


Abb. 11. Linsensystem des NG 250. 1 Target; 2 Fokussierungsanzeiger; 3 Metallbalg; 4 Glaszylinder; 5 Schleusenventil; 6 T-Stück; 7 Erdelektrode mit Justiereinrichtung; 8 Grundflansch des Ionenrohrs. 9 Ionenrohr; 10, 11 Erdelektrode mit Justiereinrichtung; 12 Zwischenelektrode; 13 Abschlußflansch des Ionenrohrs; 14 Ionenquelle

5. Beschleunigungssystem

Während der Beschleunigung der Ionen hat gleichzeitig eine Fokussierung des divergent eintretenden Ionenbündels auf das Target zu erfolgen. Daher ist

das Beschleunigungssystem als elektrostatisches Linsensystem ausgelegt. Bei beiden Generatoren erfolgt die Beschleunigung auf die volle Spannung in einer einzigen Stufe. Zwischen dem Ionenquellenaustritt

und der eigentlichen Beschleunigungsstufe ist jedoch bei beiden Generatoren eine Zwischenelektrode angebracht, deren Potential aus einer besonderen Quelle gespeist wird und im Bereich 0 bis -60 kV (relativ zum Potential des Faraday-Käfigs) variiert werden kann. Dadurch läßt sich die Brennweite des durch die beiden Linsen gebildeten Objektivs variieren, um unter verschiedensten Bedingungen eine gute Fokussierung der Ionen am Target zu erreichen. Zur Berechnung der optischen Eigenschaften des Linsensystems wurden Unterlagen von K. SPANGENBERG und M. FIELD [7] benutzt. Bei der Auslegung des Systems sind eine Reihe von Gesichtspunkten zu berücksichtigen. Das System muß so aufgebaut sein, daß der Strahl stets gegenüber den Wänden des Beschleunigungsrohrs abgeschirmt ist, weil sonst durch Wandaufladungen Unstabilitäten in der Lage des Brennflecks eintreten können. Die Elektroden müssen so geformt sein, daß längs ihrer Endflächen eine konstante Feldstärke herrscht. Die Berechnung ihrer Profile erfolgte nach Angaben von N. J. FELICI [8]. Als Material für die Elektroden dient durchweg blank polierter Stahl (St 56). Besondere Sorgfalt ist auf die Zentrierung des Elektrodensystems zu legen, zu diesem Zwecke läßt sich die erdseitige Elektrode bei beiden Generatoren justieren. Zum Justieren des Strahls auf die Mittelachse des Beschleunigungsrohres kann weiterhin die Ionenquelle verschoben werden. Dies ist möglich, ohne die Apparatur zu belüften. Es läßt sich außerdem das Target, das über einen Metallbalg aus Tombak beweglich angeflanscht ist, verschieben. Die Kontrolle einer sauberen Zentrierung ist durch die in Abs. 6 beschriebene Quadrantenvorrichtung (Fokussierungsanzeiger) leicht möglich.

Abb. 10 zeigt das Linsensystem des Generators NG 400. Es ist außerdem die Lage der Hauptebenen der beiden Linsen und der Brennpunkte zu erkennen. Die Abbildung des Extraktionskanals auf das Target erfolgt ohne Zwischenbild. Deshalb mußten die Brennweiten der Linsen möglichst groß gestaltet werden. Daraus erklärt sich der große Durchmesser der Zwischenelektrode (2).

Abb. 11 zeigt das Linsensystem des Generators NG 250. Auch hier erfolgt die Abbildung des Extraktionskanals ohne Zwischenbild. Bei diesem Generator mußte auf die Auslegung der Optik besondere Sorgfalt verwandt werden, da bei einigen Experimenten der Ionenstrahl bis zu 5 m vom Beschleuniger weggeführt werden soll, ohne daß besondere zusätzlich Fokussierungsmaßnahmen ergriffen werden.

6. Steuerung und Überwachung der Generatoren

Abb. 12 zeigt das Schaltpult des Generators NG 250. Es lassen sich die folgenden Steueroperationen vornehmen:

1. Steuerung der Vakuumanlage, Vor- und Diffusionspumpe (die Pumpen können auch von einem getrennten Schaltpult aus bedient werden).

2. Ein- und Ausschalten der Hochspannung.

3. Ein- und Ausschalten des Antriebmotors für den Wechselspannungsgenerator.

4. Bedienung der Ionenquelle. Es lassen sich an der Ionenquelle verändern: Die Extraktionsspannung, die Fokussierungsspannung, der Strom durch das Ventil (Gasdruck!) und die Senderleistung. Die Einstellung dieser Größen erfolgt hochspannungsseitig durch Ringkern-Regeltransformatoren, die über isolierte Wellen von Stellmotoren an angetrieben werden. Auf dem Schaltpult befinden sich Stellungsanzeiger für die

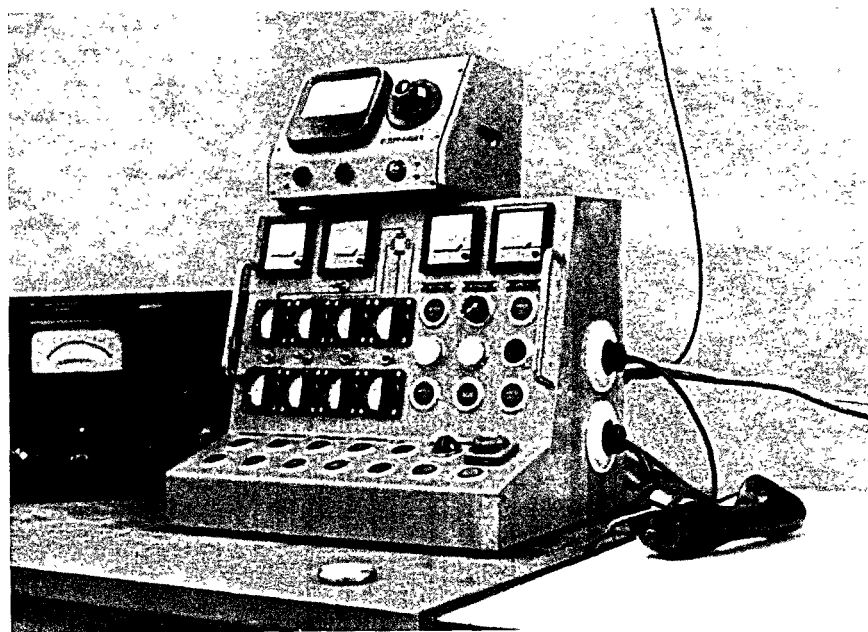


Abb. 12. Schaltpult des NG 250

Ringkern-Regeltransformatoren sowie die Meßinstrumente für den mittleren Targetstrom, für die mittlere Strombelastung des Hochspannungsgerätes und vier Instrumente zur Überwachung der Fokussierung. Jedes dieser Instrumente ist an eine von den vier quadrantenförmigen Elektroden in Targetnähe angeschlossen (vgl. Abb. 11). Bei normalen Betriebsbedingungen muß der Strom auf alle diese vier Quadranten gleichgroß und sehr klein gegen den Targetstrom sein. Abweichungen von der optimalen Fokussierungslage lassen sich auf diese Weise sofort erkennen. Auf einem Oszillographen können bei Impulsbetrieb die Formen der einzelnen Impulse kontrolliert werden.

Das Schaltpult des NG 400 ist grundsätzlich ähnlich, jedoch weniger kompakt ausgeführt.

7. Betriebserfahrungen mit den Generatoren

Die beiden Generatoren wurden im Jahre 1959 in Betrieb genommen und haben sich in der Zwischenzeit bei vielen Experimenten bewährt (insgesamt etwa 2000 Betriebsstunden).

Nach Inbetriebnahme ergaben sich zunächst die bei solchen Anlagen üblichen vakuumtechnischen Schwierigkeiten (mangelnde Spannungsfestigkeit der Beschleunigungsrohre!), die auf unvollständige Entgasung der Oberflächen, insbesondere der Elektroden, zurück-

gehen. Nach längerem Evakuieren und nach wiederholtem Entgasen durch Durchschläge ließen sich diese Schwierigkeiten abstellen; Hochspannungsdurchschläge werden heute nicht mehr beobachtet. Das Vakuum beträgt etwa $2 \cdot 10^{-6}$ Torr beim NG 250 und $6 \cdot 10^{-6}$ Torr beim NG 400 (bei eingeschalteter Ionenquelle beträgt es 6 bzw. $8 \cdot 10^{-6}$ Torr). Es wird darauf geachtet, daß die Beschleunigungsrohre sich stets unter Vakuum befinden. Durch Schleusenventile ist dafür gesorgt, daß bei Targetwechsel die Gesamtanlage nicht belüftet werden muß.

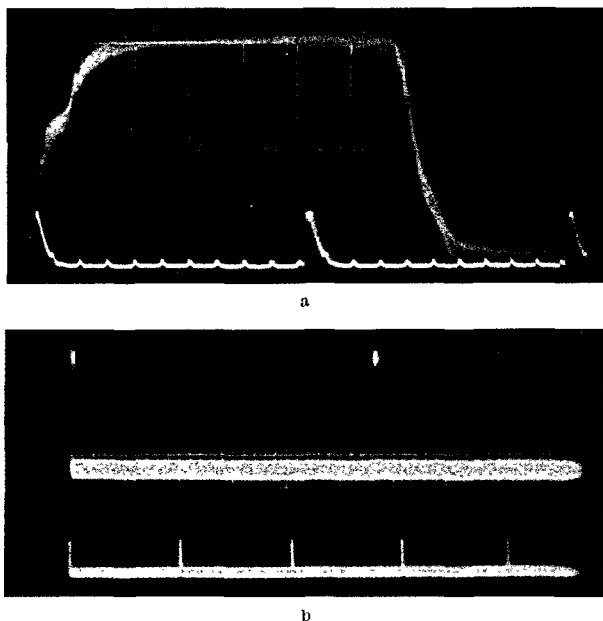


Abb. 13 a u. b. Ionenstromimpulse beim NG 250. a Ein 26 mA-Impuls. Impulslänge 13,1 μ sec mit eingblendeter Zeitmarke von 10 μ sec/1 μ sec (Abstand der hohen Zeitmarken 10 μ sec). b Impulsfolge mit eingblendeter Zeitmarke (Abstand der Zeitmarken 1 msec)

Nach der Inbetriebnahme und nach sorgfältiger Justierung wurden zunächst umfangreiche Messungen über die Stromergiebigkeit der Generatoren angestellt. Messungen des Ionenstroms sind schwierig, weil am Target ausgelöste Sekundärelektronen das Ergebnis erheblich verfälschen können. Es wurden daher kalorimetrische Messungen durchgeführt sowie Messungen, bei denen durch eine besondere Gegenspannungselektrode, die nicht dem direkten Strahl ausgesetzt ist, der Austritt von Sekundärelektronen aus dem Target verhindert wurde. Die Ergebnisse dieser beiden Messungen stimmten überein; die im folgenden genannten Stromwerte sind daher frei von Sekundärelektroneneffekten. Sämtliche Messungen wurden bei Impulsbetrieb der Generatoren durchgeführt. Abb. 13 zeigt einige typische Impulsformen.

Unter Verwendung des in Abb. 7b gezeigten Absaugsystems ließen sich am Generator NG 400 Impulsstromamplituden bis zu 26 mA erreichen. Ein derart hoher Strom setzt eine besonders sorgfältige Einstellung und Justierung voraus. Normalerweise arbeitet die Maschine betriebsmäßig mit einem Impulsspitzenstrom von 15 mA. Diese Stromwerte sind für eine

Anlage dieser Art extrem hoch, sind jedoch für einige der in der Einleitung erwähnten Experimente Voraussetzung. Das Tastverhältnis ist bei diesen Experimenten in der Regel niedrig, so daß der mittlere Targetstrom einige 100 μ A kaum übersteigt. Es ist daher in der Regel ausreichend, die Targets mit Luft zu kühlen. Für Bestrahlungsexperimente wurden gelegentlich mittlere Ströme bis zu 1,5 mA erreicht. Es ist dann jedoch erforderlich, das Target durch Wasser zu kühlen. Wir haben keine Anstrengungen unternommen, den mittleren Strom höher zu treiben.

Auch beim Generator NG 250 beträgt der Impulsstrom betriebsmäßig 15 mA. Für eine Reihe von Experimenten war es erforderlich, den Ionenstrahl nach Verlassen des Beschleunigers durch ein etwa 5 m langes Rohr zu führen und erst dann auf das Target zu lenken. In diesem Fall betrug der Targetstrom ohne zusätzliche Linsen etwa 1 mA.

Unter Zugrundelegung der eingangs erwähnten Neutronenergiebigkeit von Tritium-Titargets und der obigen Ströme kann die Neutronenquellstärke der Generatoren berechnet werden. Es ergibt sich eine maximale Quellstärke (während des Impulses) von $5 \cdot 10^{12}$ n/sec. Es wurden bis jetzt nur sehr grobe Direktbestimmungen dieser Ergiebigkeit durchgeführt. Dazu wurden ein „long counter“ sowie ein Rückstoßprotonen-Spektrometer der Firma 20th Century Fabrikat FN 2/3 benutzt, die mit Hilfe radioaktiver Neutronenquellen geeicht worden waren. Diese mehr orientierenden Messungen ergaben Ergiebigkeiten, die mit der berechneten Ergiebigkeit übereinstimmten. Eine genauere Absolutmessung an Hand der „Methode des assoziierten Teilchens“ ist in Vorbereitung.

Entsprechend dem wesentlich geringeren mittleren Targetstrom ist auch die mittlere Neutronenquellstärke der Generatoren wesentlich kleiner als ihre Instantanquellstärke. Je nach Art des Experimentes beträgt sie 10^{10} – 10^{11} n/sec. Wegen ihrer hohen Energie sind die Neutronen aus der (d, T)-Reaktion außerordentlich durchdringend. Es ist daher bereits bei derartigen Quellstärken erforderlich, mit sehr großer Sorgfalt Abschirmmaßnahmen durchzuführen.

Wesentliche Teile des NG 400 wurden am Max Planck-Institut für Physik in Göttingen nach den Angaben von Herrn Dipl.-Physiker K. H. BÖCKHOFF angefertigt. Die Hochspannungsanlage, die Vakuumanlage und den Faraday-Käfig des NG 400 finanzierte die Deutsche Forschungsgemeinschaft. Bei Herrn Prof. Dr. K. WIRTZ und Herrn Dr. K. H. BECKURTS fand ich jederzeit tatkräftige Unterstützung. Ich möchte mich bei allen bedanken, die mir beim Bau dieser beiden Neutronenquellen behilflich waren.

Literatur: [1] BECKURTS, K. H.: Nuclear instruments 11, 144 (1960). — [2] MEISTER, H.: Wird veröffentlicht. — [3] KÜCHLE, M.: Wird veröffentlicht. — [4] BECKURTS, K. H.: Z. Naturforsch. 16a, 6 (1961). — [5] SCHMIDT, A.: Diplomarbeit, unveröffentlicht. — [6] BECKURTS, K. H.: Diss. Göttingen 1956 u. Nuclear Sci. Engineering 2, 516–522 (1957). — [7] SPANGENBERG, K., u. M. FELD: Radio engineers handbook, Datenblätter. — [8] FELICI, N. J.: Elektrostatische Hochspannungsgeneratoren. Karlsruhe: G. Braun 1957.