

Der Faktor γ läßt sich aus den Meßpunkten zwischen 10 und 14°K als Ordinatenabschnitt in einem $C_v/T, T^2$ -Diagramm ermitteln. Wir fanden in diesem Temperaturgebiet aus nur wenigen Punkten:

$$\text{Rhodium: } C_v = C_g + C_e = \left(\frac{T}{450}\right)^3 + 10,0 \cdot 10^{-4} T, \quad (4)$$

$$\text{Iridium: } C_v = C_g + C_e = \left(\frac{T}{430}\right)^3 + 7,6 \cdot 10^{-4} T. \quad (5)$$

Diese Werte liegen in der für andere Metalle der Übergangselemente beobachteten Größenordnung und sind beim Rhodium etwa fünf- bis sechsmal, beim Iridium etwa drei- bis viermal größer, als man nach der Sommerfeldschen Formel für ein einzelnes freies Elektron erwarten würde.

In Spalte 6 von Tab. 4 und 5 ist diese Elektronenwärme und in Spalte 7 der Wert von $C_v - C_e$, d. h. die wahre Gitterwärme, angegeben, während in Spalte 8 die daraus resultierenden Θ_D -Werte nach Debye stehen. Ihr Verlauf ist in Abb. 1 bzw. 2 als gestrichelte Kurve eingetragen. Während beim Rhodium der eben angegebene Wert benutzt wurde, ergab sich beim Iridium eine bessere Konstanz der Θ -Werte bei hohen Temperaturen mit $\gamma_{\text{Ir}} = 8,4 \cdot 10^{-4}$. Man sieht, daß nunmehr bei den

hohen, oberhalb des Gebiets der flüssigen Luft liegenden Temperaturen der Θ -Wert recht befriedigend konstant wird. Für Rhodium ergibt er sich zu 346°, für Iridium zu 289°.

Wir legen Wert auf diesen Nachweis, nach dem die Elektronenwärme beim Rhodium und Iridium nicht nur bei den tiefsten Temperaturen festgestellt werden kann. Gerade im Bereich von der flüssigen Luft bis Zimmertemperatur besteht eine bislang noch wenig ausgenützte Möglichkeit, die Elektronenwärme unterhalb des Äquipartitionswertes der Atomwärme von $3 R \text{ cal/}^\circ$ scharf nachzuweisen und so die bei tiefen Temperaturen gewonnenen Erkenntnisse zu ergänzen. Die Berechtigung dieses Vorgehens wird in einer späteren Arbeit ausführlicher begründet werden.

Der eine von uns (C.G.L.) dankt dem Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Madrid) für die Gewährung eines Studienstipendiums. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sind wir für die Überlassung von Apparaten dankbar, durch die die Fortsetzung eines schon vor zwanzig Jahren aufgestellten Programms nach längerer Unterbrechung doch noch möglich wurde. Ferner verdanken wir dem Schweizerischen Nationalfonds namhafte Mittel für die Durchführung der vorliegenden Untersuchung.

Elektrische Einrichtungen für einen van de Graaff-Generator

Von F. BUMILLER, V. MEYER, H. H. STAUB und H. WINKLER

Aus dem Physikalischen Institut der Universität Zürich

(Z. Naturforsch. 10a, 551—556 [1955]; eingegangen am 24. Mai 1955)

Es werden einige Einrichtungen am druckisolierten van de Graaff-Generator der Universität Zürich beschrieben, insbesondere Sprühsystem, Apparate in der Hochspannungselektrode sowie eine einfache Spannungsstabilisierung ohne Benutzung des Ionenstrahls.

Für die Beschleunigung geladener Elementarteilchen auf Energien zwischen 1 und ca. 3 MeV ist ein elektrostatischer Druckgenerator nach van de Graaff die einfachste und billigste Maschine. Er erzeugt einen engen, gut fokussierbaren Teilchenstrahl mit hoher Energiehomogenität und -konstanz, auch kann die Energie leicht über große Bereiche variiert werden. Die Bau- und Betriebskosten sowie der Raumbedarf sind relativ niedrig. Am Target tritt nur wenig Streustrahlung auf. Trotz der hohen Spannung ist im Gegensatz zum Kaskadengenerator die gespeicherte elektrische Leistung gering, daher sind Überschlüsse ziemlich harmlos.

Diesen Vorzügen stehen eine Reihe Nachteile gegenüber, die teils technischer Natur sind (komplizierte Apparate im Drucktank, mechanisch bewegte Teile), teils aber auch, trotz der Einfachheit des Grundprinzips, aus der mangelnden Klarheit über manche physikalischen Vorgänge im Generator stammen. Als wichtigstes Beispiel sei nur der immer noch nicht völlig verstandene Mechanismus der elektrischen Durchbrüche im Hochvakuum des Beschleunigungsrohres genannt.

Der Innenaufbau des Generators muß sehr betriebssicher sein, denn der Erfolg hängt oft von Kleinigkeiten ab. Es sollen nun hier einige Einrichtungen am elektrostatischen Druckgenerator



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitalized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

der Universität Zürich (max. Spannung 1,6 MV) beschrieben werden, die teilweise nach Versuchen mit anderen Lösungen gefunden wurden und die besonders zur elektrischen Stabilität und Betriebssicherheit des Generators beitragen. Es sind dies:

1. Sprühsystem und Vakuumrohre,
2. elektrische Geräte in der Hochspannungselektrode,

3. Ionenquelle und Strahlfokussierung,

4. Stabilisierung der Spannung.

Eine kurze technische Beschreibung des Generators ist bereits an anderer Stelle¹ gegeben worden. Abb. 1 zeigt die wichtigsten Maße der Maschine.

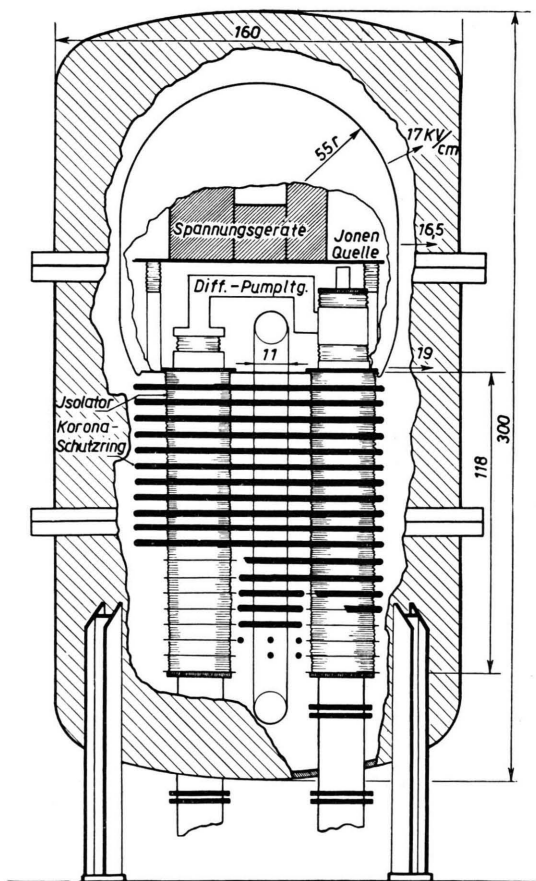


Abb. 1. Generator im Schnitt (Maße in cm).

1. Sprühsystem und Vakuumrohre

Zum Aufsprühen der Ladung bei der unteren Bandrolle verwenden wir einen 60 cm langen

¹ H. Bömmel, H. H. Staub u. H. Winkler, *Helv. Phys. Acta* **24**, 632 [1951].

Kamm aus Grammophonnadeln, der aus sechs voneinander isolierten Gruppen von je zwölf Nadeln besteht. Jede Gruppe ist über einen Widerstand von 25 M Ω an die Sprühspannung (bei 10 atm ca. 30 kV) angeschlossen. Durchschläge von einer Nadel zur Bandwalze können infolge des hohen Vorschaltwiderstandes nicht sehr kräftig werden, zugleich arbeiten die anderen Gruppen weiter. Die Nadeln stehen einige mm über der Horizontalen durch die Walzenachse, ca. 3 mm vom Band entfernt, sie brennen langsam ab und werden etwa alle 500 Betriebsstunden ersetzt.

Der Abnahmekamm in der Hochspannungselektrode (ab hier HSE genannt) muß für stabilen Lauf des Generators so nahe als möglich am Band stehen. Der Strom geht von dort über ein durch Serienwiderstand und Glimmlampe gesichertes Meßinstrument zur isolierten oberen Bandrolle, dann durch einen Widerstand von 2,5 M Ω und eine variable Koronastrecke zur HSE. Diese Korona regelt das Potential des mit der HSE über ein Instrument verbundenen Rücksprühkammes. Die vom Strom wenig abhängige Brennspannung der Koronastrecke „stabilisiert“ deren Potential. Zur Vermeidung von Durchschlägen besteht die Korona aus fünf parallel geschalteten Rasierklingen (Herabsetzung der Stromdichte), ferner liegt zwischen der oberen Bandrolle und der HSE ein Kondensator von 500 pF, der zusammen mit dem 2,5 M Ω -Widerstand als Siebglied für schnelle Schwankungen des vom Band abgenommenen Stromes wirkt. Der Rücksprühstrom beträgt 70 bis 250 μ A bei etwa 700 μ A Strom am oberen Abnahmekamm, über 250 μ A wird die elektrische Stabilität des Generators schon merklich verschlechtert. Der elektrisch stabile Lauf (Konstanz aller Potentiale) trägt wesentlich zur Erreichung einer hohen Betriebsspannung bei. Eine wichtige Vorbedingung dafür ist auch ein wirklich trockenes Band. Wir halten vor der Füllung ca. 8 Stdn. lang im Tank ein Vakuum besser als 3 mm Hg, dann wird mit durch Silicagel getrockneter Luft gefüllt. Der Taupunkt ist im Betrieb etwa -5° bis 0° .

Die drei Vakuumrohre des Generators (zwei zur differentiellen Pumpung, eines für den Strahl) tragen innen Elektroden aus Stahlblech nach einer von Herb angegebenen Form. Bei 1,5 MV zeigten sie kräftige Entladungen und teilweise Funken zwischen den Elektroden, die sich jeweils rasch häuften. Auch trat eine starke Bremsstrahlung seitlich vom Generator und in dem Laboratorium

darüber auf. Zur Abhilfe wurde jedes Rohr durch zwei Diaphragmen in drei gleichlange Abschnitte geteilt. Ein Diaphragma besteht aus zwei Blechen von Halbkreisfläche, die im Abstand eines Isolators so eingesetzt sind, daß sie beim Durchblick entlang der Rohrachse das Rohr vollständig sperren. Die Bleche im Strahlrohr haben in der Mitte ein Loch von 4 cm \varnothing für den Strahl. Bei fast gleicher Pumpgeschwindigkeit wird es dadurch in den Pumpprohren vollständig, im Strahlrohr beinahe (mit Ausnahme des Strahls) unmöglich, daß ein geladenes Teilchen oder ein Sekundärelektron auf die volle Spannung des Generators beschleunigt wird. Jetzt ist stabiler Betrieb bei 1,6 MV möglich; nach einer Konditionierung der Rohre (Ausgasen unter Spannung) von etwa 30 Stdn. kommt man auch höher. Ferner konnten wir so und durch einige Bleiabschirmungen in der HSE die Bremsstrahlung im Laboratorium über dem Generator, 2,5 m über dem Tank, auf den zehnten Teil herabsetzen, sie beträgt jetzt noch etwa 8 mr/h. Die Intensität der Bremsstrahlung im Raum unter dem Generator (Target und Kontrolltisch) ist gering und beträgt maximal 1 mr/h.

2. Elektrische Geräte in der HSE

Im potentialfreien Raum der HSE befinden sich die Geräte zum Betrieb der Ionenquelle und zur Fokussierung des Strahles. Die für diese Geräte erforderliche Leistung erzeugt ein Dynamo, welcher über einen flachen Nylonriemen von der oberen Bandrolle angetrieben wird. Bei 6000 Upm liefert er im Leerlauf 250 V Wechselspannung von 100 Hz, die Spannung sinkt bei der maximal zulässigen Belastung mit 4,5 A auf 220 V. Die Spulen befinden sich im Stator, der Rotor ist ein radial magnetisierter Permanentmagnet aus Ticonal von 80 mm \varnothing und 85 mm Länge. In Übereinstimmung mit der Rechnung betragen die Wirbelstromverluste im Rotor etwa 50 Watt.

Die vom Dynamo gespeisten Geräte und ihre Daten sind aus dem Blockdiagramm Abb. 2 ersichtlich. Die Regulierung der Spannungen erfolgt durch primärseitige Regeltransformatoren, welche über Plexiglasstäbe von Motoren unter dem Tankboden eingestellt werden. Die Gleichrichtung erfolgt bei Fokussier-, Sonden- und Extraktions-Spannungsgerät durch Hochspannungs-Trockengleichrichter, beim Senderspannungsgerät durch druckfeste Metallröhren 5T4.

Ein besonderes Problem stellt die Sicherung der Geräte dar. Der Permanentmagnet des Dynamos wird bei Stromentnahme über 4,5 Amp., z. B. durch Kurzschluß in den Regeltransformatoren, entmagnetisiert, und die Klemmenspannung sinkt fast auf Null. Das ist ein wirksamer Schutz gegen Brandentstehung. Weiter sind Sicherungen notwendig gegen kurzzeitige Überlastungen der Spannungsgeräte in der HSE, wie sie durch Entladungen im Fokussiersystem des Strahlrohres oder Eindringen von Wanderwellen bei Durchschlägen der Druckisolation in die nach unten nicht völlig geschlossene HSE vorkommen. Das Auswechseln von Sicherungen ist natürlich unmöglich, Relais arbeiten bei diesen Betriebsbedingungen unzuverlässig.

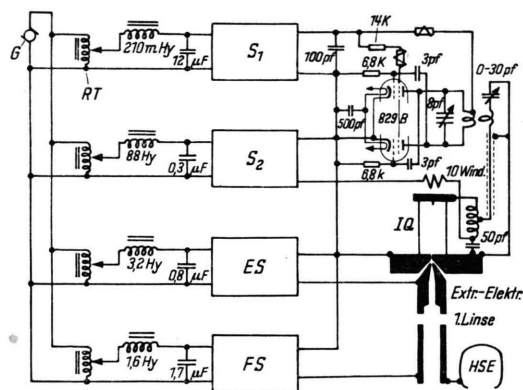


Abb. 2. Elektrische Einrichtung in der Hochspannungselektrode. G Generator 1 kW, 220 V, 100 Hz; RT Regeltrafo; S₁ Spannungsgerät für Sender 600 bis 700 V, 250–300 mA; S₂ Spannungsgerät für Sonden-spannung 0 bis +2 kV; ES Extraktions-Spannungs-gerät 0 bis –5 kV; FS Fokussier-Spannungsgerät 0 bis –30 kV. IQ Ionenquelle.

Sehr gut bewährt hat sich die in Abb. 2 gezeigte Anordnung. Der Strom J im Eingangstransformator eines Gerätes ist für eine gegebene Ausgangsspannung V des Regeltrafos konstant und von der Größe

$$J = V/\omega L,$$

sofern Drossel und Kondensator die Bedingung $L = 1/\omega C$ erfüllen. Die Sicherung erlaubt z. B. Kurzschlüsse am Ausgang der Fokussierspannung ohne wesentliche Änderung des Eingangsstromes.

Die von den Geräten abgegebenen Spannungen und teilweise die Ströme werden auf acht handelsüblichen Drehspulinstrumenten angezeigt, die durch ein Schauloch im Tankboden beobachtet werden können. Sie sind mit 6,3 V-Lämpchen be-

leuchtet und gegen Überlastung wie vorn angegeben geschützt.

3. Strahl

Der Generator arbeitet mit einer 100 MHz-Hochfrequenz-Ionenquelle. Sie liefert bei 150 Watt Eingangsleistung am Sender einen Ionenstrom von etwa $50 \mu\text{A}$ am Target, wovon ca. 60% Protonen sind. Den einfachen und betriebssicheren Aufbau der Quelle zeigt Abb. 3. Ein handelsüblicher Pyrexzylinder wird auf einen O-Ring im Tragflansch gepreßt. Seine obere Öffnung ist mit einem O-Ring in einer Kupferplatte verschlossen. Um den Entladungsraum möglichst frei von Metallteilen zu halten, sind oben und unten Pyrexplatten eingesetzt. Durch eine Bohrung in der oberen Platte reicht eine Molybdänspitze als Sonde ca. 1 mm in den Entladungsraum. Der Austrittskanal von 1,7 mm \varnothing und 6 mm Länge ist zur Verminderung von Rekombination durch Aluminium geführt, die Kathode in der üblichen Weise geformt² und von einem Quarzröhrchen umgeben.

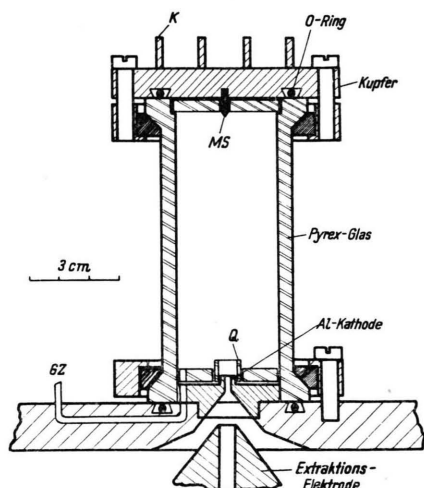


Abb. 3. Ionenquelle. K Kühlrippe, MS Molybdän-Sonde, GZ Gaszufuhr, Q Quarzrohr.

Kupferplatte, Entladungsraum und Tragflansch bilden Kapazität und Parallelwiderstand des Schwingkreises, dessen Selbstinduktion, eine Spule von zehn Windungen, über einen Kondensator von 80 pF zur Blockierung der SONDENSPANNUNG mit dem Tragflansch verbunden ist. Die Schaltung geht aus Abb. 2 hervor. Durch die variable Art der An-

passung an den Sender ist man von der Länge der Zuleitung Sender-Quelle unabhängig.

Die Ionenquelle benötigt ca. $8 \text{ cm}^3 \text{ H}_2 \text{ NTP}$ in der Stunde. Das zur Regulierung benutzte Fowler-Ventil ist direkt in den Wasserstofftank eingebaut. Das Vakuum in den Pumprohren, gemessen am Boden des Drucktanks, beträgt ohne Gaseinlaß $6 \cdot 10^{-6} \text{ mm Hg}$, im Betrieb $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ mm Hg}$. Die Vakuumdichtigkeit der Quelle prüfen wir stets durch Massenanalyse des Strahls. Die Ionenquelle benötigt zur Zündung weder erhöhten Gasdruck noch Überspannungen. Ein kleiner Zentrifugalverdichter und die vom Band erzeugte Luftbewegung halten die Temperatur des Pyrexzylinders im Betrieb unter 60°C . Die Ionenausbeute ist nach einer Betriebsdauer von 150 Stdn. etwa auf die Hälfte gesunken und bleibt dann konstant. Sie steigt bei einer Reinigung der Glasteile mit Flußsäure wieder auf den alten Wert. Während mehr als 400 Betriebsstunden unter Druck zeigte die Quelle nie Störungen. Die im Sender verwendete Glasröhre 829 B erträgt bis zu 20 atm Außendruck.

Aus der Quelle treten die Ionen durch eine Extraktionselektrode in das Fokussiersystem, bestehend aus zwei elektrischen Linsen, während das nicht ionisierte Gas bis auf wenige % durch die Differential-Pumpleitung in die beiden Pumprohre gelangt. Die Spannung an der Extraktionsstrecke beträgt maximal 4 kV, diejenige an der ersten Linse bis 26 kV. Beide Spannungen werden in der HSE erzeugt und sind unabhängig regelbar. An der zweiten Linse liegt die Spannung der obersten Stufe des Generators (bis 80 kV), durch eine variable Korona in Serie mit einem Widerstand überbrückt. Das Linsensystem berechneten wir nach den Daten von Spangenberg und Field³. Es gestattet die Anpassung an die einer Berechnung nur schwer zugänglichen Feldverhältnisse im Strahlrohr. Etwa 1 m nach dem Ende des Beschleunigungsrohres ist ein Hochvakuum-Klappventil mit aufgesetztem Tantalblech (zur Beobachtung des Strahles) über einen Federkörper angekoppelt. Damit fest verbunden ist der zur Massentrennung verwendete Magnet mit einem Luftspalt von 8 mm, maximal 9000 Gauß. Von den runden Polschuhen von 60 mm \varnothing wurde zur Vermeidung von Defokussierung oben und unten ein kleines Segment abgeschnitten. Noch 2 m hinter dem Magne-

² C. D. Moak, H. Reese u. W. M. Good, *Nucleonics* (September) 1951, 18.

³ F. E. Terman, *Radio Engineers Handbook*, McGraw-Hill 1950.

ten kann die Austrittsöffnung der Ionenquelle in einen Fleck von 4 mm \varnothing abgebildet werden.

4. Stabilisierung

Die Hochspannung des Generators wird auf den gewünschten Wert eingestellt durch die Sprühspannung für das Band und eine Koronaentladung vom Tank zur HSE als zusätzliche Belastung (50–400 μ A). Die Charakteristik dieser Entladung bewirkt an sich schon eine Stabilisierung der Hochspannung auf etwa $\pm 3\%$. Für eine bessere Stabilisierung benützen wir eine gittergesteuerte Koronaentladung⁴. Das Steuersignal gewinnen wir nicht, wie sonst allgemein üblich, aus der Energie des Strahles, sondern nehmen es vom rotierenden Voltmeter ab (Abb. 4).

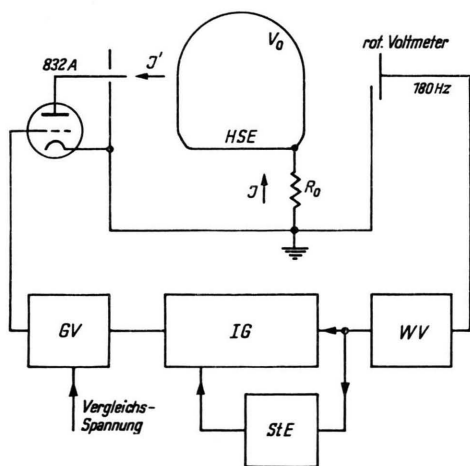


Abb. 4. Schema der Stabilisierung der Generatorspannung. GV Gleichspannungsverstärker, IG Impuls-gesteuerter Gleichrichter, WV Wechselspannungsverstärker, StE Steuerimpuls-Erzeugung.

Die Wechselspannung (180 Hz) des rotierenden Voltmeters wird hinter einem Verstärker sehr hoher Stabilität gleichgerichtet und die entstehende Gleichspannung βV_0 , welche der Generatorspannung V_0 proportional ist, mit einer festen Spannung V verglichen. Die Differenz $\Delta V_0 = (\beta V_0 - V)$ gelangt über einen Gleichspannungsverstärker mit variabler Verstärkung G auf das Gitter einer Tetrode, an deren Anode die Spitzen der gittergesteuerten Korona angeschlossen sind (Abb. 4). Sei nun R_0 der dynamische Widerstand zwischen HSE

und Erde bei der Generatorspannung V_0 , J' der Strom durch die gittergesteuerte Korona und J der Ladestrom. Der Einfachheit halber werden nur die Schwankungen ΔJ im Ladestrom betrachtet. Belastungsschwankungen durch den Strahl, durch Elektronenstrom im Hochvakuum und Koronaentladungen können ohne weiteres auch als ΔJ ausgedrückt werden. Es wird

$$\Delta V_0 = R_0 (\Delta J - \Delta J');$$

und wenn μ_1 bzw. μ_2 der Verstärkungsfaktor, r_1 bzw. r_2 der Innenwiderstand der Tetrode (1) und der gittergesteuerten Korona (2) sind, so ist die Schwankung der stabilisierten Spannung

$$\Delta V_0 = R_0 \cdot \Delta J_0 / S,$$

wobei der Stabilisierungsfaktor S

$$S = 1 + \left(\frac{R_0 \beta G (\mu_2 \mu_1 + \mu_1)}{r_1 + r_2 + \mu_2 r_1} \right) = 1 + F,$$

wenn $(\mu_1 + \mu_1 \mu_2) \beta G \gg 1$ ist. F heißt der Rückkopplungsfaktor.

Für die Stabilität des ganzen Systems sind die Zeitkonstanten des Generators und der Stabilisierungseinrichtung von Bedeutung. Sie sind auch wichtig für die Frage, ob nach einem rasch eintretenden ΔJ der durch die Stabilisierung erzwungene Wert von V_0 asymptotisch oder oszillatorisch (hunting) wieder erreicht wird. Ist C die Kapazität der HSE gegen den Tank, so wird die Zeitkonstante des Generators $\tau_0 = R_0 C$. Für den Frequenzgang der gesamten Stabilisierungseinrichtung benützen wir als Näherung den Verstärkungsang eines einfachen RC-Verstärkers:

$$g = g_0 / (1 + i \omega \tau).$$

Die Anwendung des Theorems von Nyquist⁵ zeigt, daß damit keine selbstunterhaltene Schwingung eintritt. Eine Berechnung von ΔV_0 aus der zeitabhängigen Rückkopplungsgleichung dagegen ergibt aber, daß für ein stufenförmiges ΔJ_0 der neue Wert von V_0 nur dann monoton asymptotisch ohne Oszillationen erreicht wird, wenn τ/τ_0 oder $\tau_0/\tau > 4/F_0$ ist, wobei F_0 den Wert von F für $\omega = 0$ bedeutet. In unserem System wurde die Zeitkonstante τ des Stabilisierungskreises so kurz als möglich gegen τ_0 gemacht und der zulässige Wert von F_0 durch Veränderung von G aus Versuchen gefunden. Wie experimentell festgestellt wurde und auch berechnet werden kann, ist übrigens eine

⁴ R. M. Ashby u. A. O. Hanson, Rev. Sci. Instrum. **13**, 128 [1942].

⁵ H. Nyquist, Bell Syst. Tech. J. **11**, 126 [1932].

