

Eine neue Methode zur Erzeugung kurzer, ungedämpfter, elektromagnetischer Wellen großer Intensität.

Von **A. Arsenjewa-Heil** und **O. Heil** in Bormio.

Mit 10 Abbildungen. (Eingegangen am 20. April 1935.)

Ein neues Prinzip zur Schwingungserzeugung wird beschrieben, bei dem die Schwingungsenergie aus einem Elektronenstrahl herausgekoppelt wird, ohne daß die schwingenden Elektroden von Elektronen getroffen werden. Nach der Berechnung kann sich bis zu 35% der Elektronenstrahlenergie in Schwingungsenergie verwandeln. Die Berechnung gibt außerdem Aufschluß über das Einschwingen, die Stabilität und die Modulierbarkeit des Generators.

Die Erzeugung ungedämpfter, elektromagnetischer Wellen großer Intensität in dem Wellenlängenbereich von 1 m bis herab zu wenigen Zentimetern¹⁾ bietet heute noch Schwierigkeiten. Daß man in diesem Wellenlängenbereich nicht die bei längeren Wellen üblichen Intensitäten erzeugen kann, beruht im wesentlichen auf zweierlei Schwierigkeiten:

1. Die Elektronen sind zu träge. Die Flugzeit der Elektronen zwischen den Elektroden ist vergleichbar mit der Zeit einer Schwingungsperiode oder sogar größer als diese

2. Die Elektroden der Röhren müssen für kurze Wellen möglichst klein sein, da sie die Kapazität des Schwingungskreises bilden. Zur Erzeugung großer Energien dagegen müssen die Elektroden möglichst groß sein, damit sie die vom Elektronenaufprall erzeugte Wärme abstrahlen können. Die beiden Forderungen, kurze Wellen und große Energie, können demnach nicht gleichzeitig erfüllt werden und stehen im Widerspruch zueinander.

Bei dem hier beschriebenen Generatorprinzip werden diese Schwierigkeiten auf folgende Weise umgangen:

1. Die endliche Flugzeit der Elektronen, die sonst störend wirkt, wird gerade benutzt, um den Elektronenstrom zu steuern.

2. Die Elektronen treffen überhaupt nicht auf die schwingenden Elektroden auf. Ein Elektronenstrahl durchfliegt diese Elektroden und die Schwingungsenergie wird aus dem Elektronenstrahl herausgekoppelt. Dadurch wird eine Erwärmung der kleinen schwingenden Elektroden ganz vermieden.

¹⁾ Zusammenfassende Darstellungen: K. Kohl, *Ergebn. d. exakt. Naturwiss.* **9**, 1930; H. E. Hollmann, *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik* **44**, 37, 1934.

zum größten Teil in derselben positiven Halbperiode verlassen. Es überwiegt demnach während der positiven Halbperiode das Abströmen der Elektronen aus dem Käfig, und in der negativen Halbperiode überwiegt das Zuströmen der Elektronen in den Käfig. Das bedeutet eine Unterstützung und Entdämpfung der vorhandenen Schwingung. Oder mit anderen Worten gesagt: Es entsteht infolge der verschiedenen Verweilzeiten der Elektronen eine pulsierende Raumladung im Innern des Käfigs und diese pulsierende Raumladung unterstützt und entdämpft die Schwingung. Wieviel Energie auf diese Weise dem Schwingungskreis zugeführt wird, läßt sich berechnen, indem man die Energieverluste der einzelnen Elektronen berechnet und über den Verlauf einer Periode summiert.

Die Berechnung ergibt, daß maximal 35% der Elektronenstrahlenergie in Schwingungsenergie verwandelt wird. Da man den Elektronenstrahl zum Schluß im Gegenfeld abbremsen kann, so kann der tatsächliche Wirkungsgrad des Generators nahezu 100% betragen. Außerdem folgt aus der Berechnung, daß der Generator selbst anschwingt und stabil arbeitet.

Berechnung des Generators.

Im folgenden soll die Berechnung des Generators gegeben werden. Als Bezeichnungen werden eingeführt:

- e = Ladung des Elektrons,
- m = Masse des Elektrons,
- v = Geschwindigkeit des Elektrons,
- p = Potential des Faraday-Zylinders,
- p_1 = Potential beim Elektroneneintritt,
- p_2 = Potential beim Elektronenaustritt,
- V = mittleres Potential des Faraday-Zylinders
(angelegte Spannung),
- A = Amplitude der Schwingung,
- ω = Kreisfrequenz $= 2\pi\nu$,
- T = Elektronenverweilzeit im Faraday-Zylinder,
- l = Flugstrecke der Elektronen im Faraday-Zylinder,
- C = Kapazität des Schwingungskreises,
- J = Elektronenstromstärke,
- N = Nutzeffekt,
- E = Entdämpfung.

Aufgabe der Berechnung ist es:

1. die günstigsten Größen von V , A und l zu finden und zahlenmäßige Resultate zu geben für den Nutzeffekt. Als Nutzeffekt wird das Verhältnis definiert:

$$N = \text{Nutzeffekt} = \frac{\text{gewonnene Schwingungsenergie}}{\text{mittlere Elektronenstrahlenergie (J. V.)}}.$$

Aufgabe der Berechnung ist es:

2. festzustellen, ob der Generator selbst einschwingt und ob er in dem Arbeitspunkt stabil arbeitet. Zu dem Zweck wird der Begriff Entdämpfung E eingeführt und als Funktion von V und A untersucht. Als Entdämpfung wird das Verhältnis definiert:

$$E = \text{Entdämpfung} = \frac{\text{dem Schwingungskreis pro Periode zugeführte Energie}}{\text{im Schwingungskreis enthaltene Energie}}.$$

Die Berechnung.

Der zeitliche Potentialverlauf des Faraday-Zylinders ergibt sich zu (siehe Fig. 2):

$$p = V + A \cdot \sin \omega t.$$

Die Elektronengeschwindigkeit v als Funktion der Zeit des Elektroneneintritts in den Faraday-Zylinder ergibt sich aus:

$$\frac{m v^2}{2} = e \cdot (V + A \sin \omega t)$$

zu

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m} \cdot (V + A \sin \omega t)}.$$

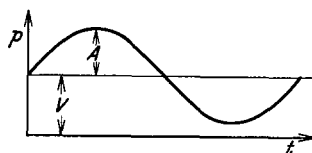


Fig. 2.

Die Elektronenverweilzeit T im Faraday-Zylinder ist:

$$T = \frac{l}{v} = \frac{l}{\sqrt{\frac{2e}{m} \cdot (V + A \sin \omega t)}}.$$

Das Elektronenaustrittspotential p_2 als Funktion der Eintrittszeit ergibt sich als:

$$p_2 = V + A \sin \omega (t + T) = V + A \cdot \sin \omega \left(t + \frac{l}{\sqrt{\frac{2e}{m} (V + A \sin \omega t)}} \right).$$

Der Energieverlust des Elektrons ist gleich dem Energiegewinn des Schwingungskreises $= e \cdot (p_2 - p_1) = \text{Energiegewinn} = e \cdot A \cdot (\sin \omega (t + T) - \sin \omega t)$.

Es fließe ein konstanter Strom von Elektronen in den Faraday-Zylinder (n Elektronen pro Sekunde). Der gesamte Energiegewinn des Schwingungskreises während einer Periode beträgt dann:

$$\begin{aligned} & n \cdot e \cdot A \int_0^{2\pi/\omega} (\sin \omega(t+T) - \sin \omega t) dt, \\ &= J \cdot A \int_0^{2\pi/\omega} \sin \omega(t+T) dt \\ &= J \cdot A \int_0^{2\pi/\omega} \sin \omega \left(t + \frac{l}{\sqrt{\frac{2e}{m} (V + A \sin \omega t)}} \right) dt. \end{aligned}$$

Der pro Sekunde dem Schwingungskreis zufließende Energiestrom ist gleich:

$$\frac{\omega}{2\pi} \cdot J \cdot A \int_0^{2\pi/\omega} \sin \omega \left(t + \frac{l}{\sqrt{\frac{2e}{m} (V + A \sin \omega t)}} \right) dt.$$

Von Interesse ist 1. der *Nutzeffekt* N , der das Verhältnis darstellt:

$$\begin{aligned} N &= \frac{\text{zufließender Energiestrom}}{\text{zugeführte Elektronenstrahlenergie}} \\ N &= \frac{\frac{\omega}{2\pi} \cdot A \cdot \int_0^{2\pi/\omega} \sin \omega \left(t + \frac{l}{\sqrt{\frac{2e}{m} (V + A \sin \omega t)}} \right) dt}{V}. \end{aligned}$$

Von Interesse ist 2. die *Entdämpfung* E , die das Verhältnis darstellt:

$$\begin{aligned} E &= \frac{\text{pro Periode zugeführte Energie}}{\text{im Schwingungskreis vorhandene Energie}} \\ E &= \frac{J \cdot \int_0^{2\pi/\omega} \sin \omega \left(t + \frac{l}{\sqrt{\frac{2e}{m} (V + A \sin \omega t)}} \right) dt}{\frac{1}{2} C \cdot A}, \end{aligned}$$

wobei C die wirksame Kapazität des Schwingungskreises bedeutet.

Ergebnisse der Berechnung.

In Fig. 3 sind einige Kurven gezeigt, die den Energieverlust der Elektronen während des Verlaufs einer Periode veranschaulichen. Dieser Energieverlust der Elektronen ist gleich dem Energiegewinn des Schwingungskreises. Über die Periode gemittelt ist er positiv und gleich der Differenz der schraffierten Flächenstücke. Die verschiedenen Kurven in Fig. 3a, b, c und d gelten für verschiedene Werte der Amplitude A und der

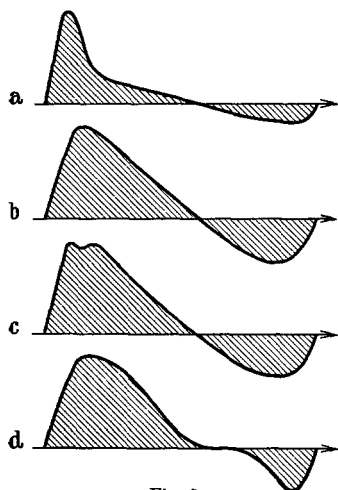


Fig. 3.

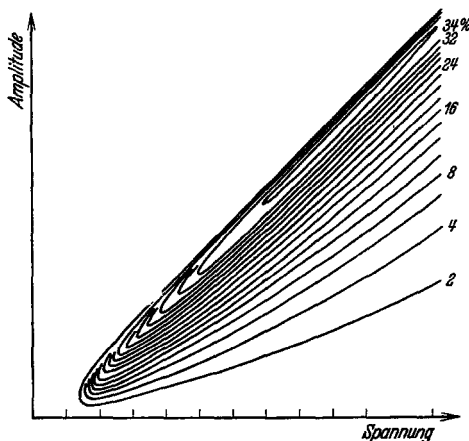


Fig. 4.

mittleren Käfigspannung V . Kurve c stellt den Fall des größten Nutzeffektes von 35 % dar. In Kurve d ist ein besonderer Fall dargestellt. Nämlich das langsamste Elektron verweilt drei halbe Perioden, das schnellste Elektron verweilt eine Periode im Käfig.

Zu dem Arbeitsdiagramm des Generators kommen wir erst, wenn Nutzeffekt und Entdämpfung für sämtliche Werte von A und V bekannt sind. Sie wurden berechnet und sind in den Fig. 4, 5, 6 und 7 dargestellt.

Nutzeffekt. In Fig. 4 ist der Nutzeffekt in Prozenten als Funktion von A und V dargestellt. Es wurde die Darstellung durch Höhenlinien gewählt. Fig. 5 zeigt einige Schnitte durch diesen Berg für verschiedene Werte von $V = \text{konstant}$. Die Punkte, durch die die Schnitte gelegt wurden, sind in Fig. 4 auf der V -Achse markiert. Für das Maximum des Nutzeffektes gilt

$$\frac{v \cdot l}{\sqrt{\frac{2e}{m} \cdot V}} = 0,173.$$

Entdämpfung. In Fig. 6 ist die Entdämpfung als Funktion von A und V durch Höhenlinien dargestellt. Fig. 7 zeigt Schnitte durch diese Fläche für verschiedene Werte von $V = \text{konstant}$. Die Punkte, durch die die Schnitte gelegt wurden, sind in Fig. 6 auf der V -Achse markiert. Die Fig. 4, 5, 6 und 7 haben bezüglich A und V den gleichen Maßstab. Die

Entdämpfung ist nur relativ wiedergegeben. Der jeweilige Absolutwert ermittelt sich aus:

$$E = \frac{4 \pi \cdot N \cdot V \cdot J}{A^2 \cdot \omega \cdot C};$$

Diskussion der Ergebnisse.

Gleichgewicht. Maßgebend für das Verhalten des Generators ist der Verlauf der Entdämpfung. Die Gleichgewichtsbedingung ist gegeben durch die Gleichung Entdämpfung = Dämpfung, wobei sich die Dämpfung aus Nutzdämpfung und Eigendämpfung zusammensetzt. Die Nutzdämpfung soll groß sein verglichen mit der Eigendämpfung.

Stabilität. Die Stabilitätsbedingung ist gegeben durch

$$\frac{\partial E}{\partial A} < 0.$$

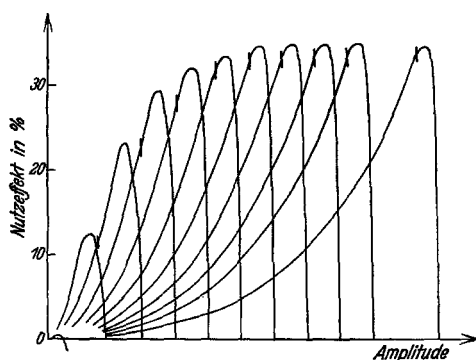


Fig. 5.

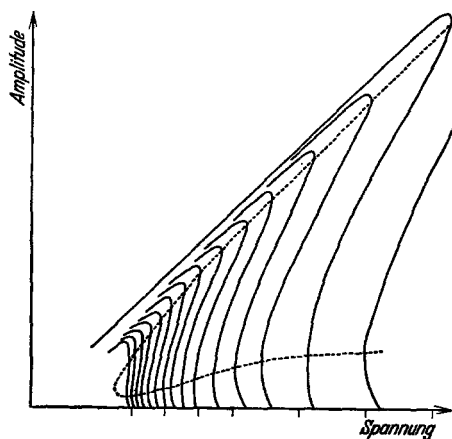


Fig. 6.

Sobald dieser Differentialquotient positiv wird und die Gleichgewichtsbedingung erfüllt ist, reißt die Schwingung ab. Aus diesen beiden Bedingungen und den beiden Diagrammen Fig. 6 und 4 läßt sich das ganze Verhalten des Generators ableiten.

Man könnte durch besondere Schaltmaßnahmen, unter Verwendung des abgebremsten Elektronenstrahles, V von A abhängig machen. Jedoch wird gewöhnlich V unabhängig von der Amplitude A sein. Für diesen

Fall erhalten wir im A - V -Diagramm zwei Bereiche stabiler Schwingungen, einen bei kleinen Amplituden, der uns nicht interessiert, und einen bei großen Amplituden. Beide Bereiche hängen im Gebiet kleiner Amplituden und kleiner Spannungen zusammen. Die punktierte Linie in Fig. 6 stellt die Grenze dieser Bereiche dar. In dem mittleren Bereich des A - V -Diagramms sind keine stabilen Schwingungen möglich. In diesem Bereich kann die Amplitude wachsen für den Fall, daß die Entdämpfung größer ist als die Dämpfung, oder abnehmen für den Fall, daß die Dämpfung größer oder gleich der Entdämpfung ist. Der obere stabile Bereich enthält das Maximum

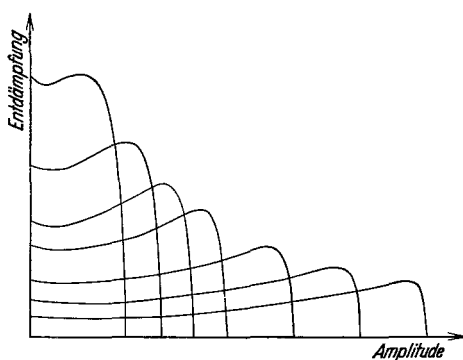


Fig. 7.

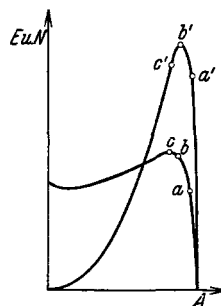


Fig. 8.

des Nutzeffektes in sich. Auf den Kurven der Fig. 5 ist die Grenze dieses stabilen Bereiches durch Striche markiert. Diese Grenzen entsprechen den Maxima der zugehörigen Kurven in Fig. 7.

Verhalten bei variabler Belastung. An Hand der Fig. 8 sei beispielsweise das Verhalten des Generators bei konstantem V und variabler Belastung gezeigt. Es sind die zwei zugehörigen Kurven für Entdämpfung und Nutzeffekt dargestellt. Bei geringer Belastung geht der Generator von selbst in den Punkt a bzw. a' . Bei Steigerung der Belastung steigt die Ausbeute bis zum Maximum des Nutzeffektes in Punkt b' bzw. b und sinkt wieder bis zum Maximum der Entdämpfung in Punkt c' bzw. c . In diesem Punkte reißt die Schwingung ab.

Der Einschwingungsvorgang. Wir können aus dem Diagramm 6 auch ablesen, wie der Generator beim Einschalten einschwingt. Wir geben zunächst sämtlichen Elektroden der Röhre außer dem Käfig ihre Betriebsspannungen. Wird nun die Käfigspannung V angelegt, so steigt sie infolge der Selbstinduktion der Zuleitung relativ langsam an. Der Generator wird sich in jedem Moment dieses Spannungsanstieges im Gleichgewichtszustand

befinden. Da die Dämpfung immer konstant bleibt, läuft der Generator auf einer Kurve konstanter Entdämpfung entlang, und zwar auf dem oberen, fast geradlinigen Ast der Kurve (Fig. 6).

Erst wenn V bis zum Umkehrpunkt dieser Kurve gesteigert wird, reißt die Schwingung ab.

Die Modulation. Infolge der Geradlinigkeit des soeben beschriebenen Kurvenastes kann man durch Variieren von V die Amplitude fast proportional, d. h. fast verzerrungsfrei modulieren. Da die Kurve bis nahe zum Nullpunkt läuft, läßt sich beinahe die ganze Energie des Generators modulieren.

Die Grenzen der Methode. Die hier beschriebene Methode der Schwingungserzeugung hat ihre Grenze bezüglich Kürze der Wellen und bezüglich Leistungsausbeute. Die Grenzen sind zu ersehen:

1. Aus der Gleichung für die Entdämpfung:

$$E = \frac{4\pi \cdot N \cdot V \cdot J}{A^2 \cdot \omega \cdot C}.$$

2. Aus der Bedingung, daß die Nutzdämpfung möglichst größer sein soll als die Eigendämpfung des Schwingungskreises. Die Entdämpfung soll möglichst groß sein, die Eigendämpfung möglichst klein.

1. Aus der Gleichung kann man folgendes ersehen: Bei Verkürzung der Wellenlänge bleibt die Entdämpfung nur konstant, wenn gleichzeitig die Kapazität proportional verkleinert wird und die Elektronenstromstärke konstant bleibt. Das bedeutet eine der Wellenlängenverkürzung proportionale Erhöhung der Elektronenstromdichte. Es wächst nämlich die Kapazität unter sonst gleichen Bedingungen ungefähr proportional mit dem Elektronenstrahlquerschnitt. Also wird man um so kürzere Wellen erzeugen können, je höhere Elektronenstromdichten man erzeugen kann. Man wird die in der Elektronenoptik üblichen Mittel zur Strahlenkonzentration anwenden¹⁾.

2. Die Eigendämpfung des Schwingungskreises setzt sich zusammen aus Ohmscher Dämpfung und aus Dielektrizitätsverlusten. Die Strahlungsdämpfung zählt zur Nutzdämpfung. Die Ohmsche Dämpfung hält man gering durch Anwendung breiter Metallbügel oder Metallrohrbügel als Selbstinduktionen. Die Dielektrizitätsverluste vermeidet man, indem man den Schwingungskreis ganz in das Röhreninnere verlegt.

Wie weit man die Elektronendichte steigern und die Eigendämpfung verringern kann, muß das Experiment zeigen.

¹⁾ Siehe z. B. E. Brüche u. O. Scherzer, Geometrische Elektronenoptik. Berlin, Julius Springer, 1934.

Vernachlässigungen bei der Berechnung.

Bei der Berechnung wurde die Annäherungszeit und Entfernungszeit der Elektronen zu und vom Faraday-Zylinder nicht beachtet. Ebenso wurde der Durchgriff des äußeren Feldes in den Faraday-Zylinder außer acht gelassen. Die Berücksichtigung führt zu folgendem: Der Durchgriff wirkt sich so aus, als seien die Annäherungs- und Entfernungswege größer. Die endliche Annäherungs- und Entfernungszeit bewirkt

1. *eine scheinbare Verlängerung von l .* Diese scheinbare Verlängerung von l ist für langsame Elektronen größer als für schnelle Elektronen. Es wird also hierdurch die Flugzeit der langsamen Elektronen mehr vergrößert als die Flugzeit der schnellen Elektronen. Das kann bei geeigneter Dimensionierung den Nutzeffekt verbessern.

2. *eine Verwaschung der Elektronengeschwindigkeit*, d. h. die Elektronen haben nicht Geschwindigkeiten, die dem jeweiligen Eintrittspotential entsprechen. Die Geschwindigkeiten entsprechen vielmehr einer unsymmetrisch abgeflachten Sinuskurve. Die negative Halbperiode ist wegen der längeren Laufzeiten am meisten abgeflacht. Auch das bedeutet bei geeigneter Dimensionierung eine Verbesserung des Nutzeffektes, da ein größerer Teil von den in der negativen Halbperiode eintretenden Elektronen den Faraday-Käfig im positiven Spannungsmaximum verläßt. Die Diagramme 4 bis 7 werden sich in Wirklichkeit infolge der Vernachlässigungen etwas verformen, jedoch ihr wesentlicher Charakter bleibt erhalten.

Praktische Ausführung.

Man wird zur Vermeidung von Energieverlusten über die Zuleitungen immer zwei Systeme in einer Röhre im Gegentakt arbeiten lassen. Fig. 9 zeigt einen Schnitt durch eine solche Anordnung. Die beiden Elektroden C werden durch einen Selbstinduktionsbügel miteinander verbunden. Die Spannungszuleitung muß auf der Mitte dieses Bügels liegen. Die Übergänge von Elektrode B nach C und von C nach D wirken wie elektrische Sammellinsen auf den Elektronenstrahl und erhöhen seine Konzentration. Dazu kann man noch die in Braunschen Röhren übliche Gaskonzentration verwenden¹⁾.

Die Elektronenstrahlen enthalten nach dem Austritt aus Elektrode D Elektronen verschiedener Geschwindigkeit. Mit einer Anordnung nach Fig. 10 kann man die Elektronen stufenweise abbremmen und auffangen. Ein System paralleler Metallplatten steht etwas schräg zur Richtung des

¹⁾ Siehe Fußnote 1, S. 752.

Elektronenstrahles. Die Platten sind von links nach rechts stufenweise negativer. Die punktierten Linien zeigen die Bahnen der Elektronen verschiedener Geschwindigkeiten. Man kann auch die Elektronen mit ihrer vollen Geschwindigkeit auf eine wassergekühlte Elektrode fallen lassen.

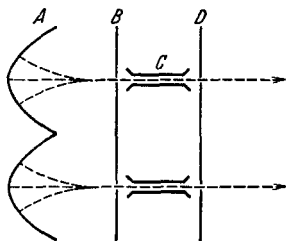


Fig. 9.

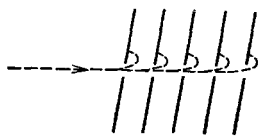


Fig. 10.

Die Hauptsache ist jedoch, daß die Wärmeentwicklung durch Elektronenaufprall genügend weit entfernt von den kleinen schwingenden Elektroden gelegt werden kann.

Zum Schluß sei noch ein Zahlenbeispiel gegeben. In einer Röhre erzeuge man zwei gebündelte Elektronenstrahlen von je 50 mA. Die Beschleunigungselektroden bekommen 10000 Volt, die beiden Schwingelektroden 4000 Volt. Die Elektronenstrahlen haben eine wirksame Energie von $(100 \text{ mA} \cdot 4000 \text{ Volt}) = 400 \text{ Watt}$. Bei einem Nutzfaktor von 35 % bekommt man 140 Watt Schwingleistung. Man wird in der Praxis mit einem Nutzeffekt von 25 % rechnen können, was eine Nutzleistung von 100 Watt bedeutet. Die Länge l des Faraday-Zylinders beträgt dabei für eine 20 cm-Welle etwa 5 mm.