

Elektrotechnische Probleme beim Bau von Hochleistungsoszillographen.

Von

Harald Ganswindt, Berlin.

(Mitteilung aus dem Forschungsinstitut der AEG.)

(Eingegangen am 1. 11. 1940.)

DK 621.317.755

Übersicht. Es werden spezielle Probleme der Oszillographie einmaliger Vorgänge behandelt deren schaltungstechnische Lösung zu einem mit abgeschmolzener Braunschwer Röhre arbeitenden Hochleistungsoszillographen führt. Bei diesem arbeitet der Zeitkreis symmetrisch und zeitlinear und gestattet Oszillogrammzeiten bis herunter zu $1,5 \cdot 10^{-7}$ s (in Sonderfällen sogar bis zu $1,5 \cdot 10^{-8}$ s) einzustellen. Die Verzögerungszeit wird durch Verwendung von Gasentladungsgefäßen auf $1 \cdot 10^{-7}$ s herabgedrückt. Oszillogramme demonstrieren die Brauchbarkeit des neuen Gerätes für die Hochspannungs- und Ultrakurzwellenmeßtechnik.

1. Einleitung.

Ein wichtiges Teilgebiet der Kathodenstrahloszillographie ist seit langem die Erforschung einmaliger sehr rasch verlaufender Vorgänge, wie z. B. der Wanderwellen in Hochspannungsnetzen oder der Vorgänge in den Transformatoren beim Einfallen solcher Wellen. Weiter gehören dazu Stoßfestigkeitsprüfungen an Hochspannungsisolatoren, Kabeln und Kondensatoren und nicht zuletzt die Kontrolle der zu diesen Untersuchungen und Prüfungen benutzten Normalstöße.

Nachdem bereits gezeigt worden ist¹⁾, daß die Helligkeit abgeschmolzener Hochleistungsröhren den Bedürfnissen der Hochspannungstechnik und selbst der Ultrakurzwellenoszillographie vollkommen genügt, und nachdem die damit zusammenhängenden Fragen allgemein meßtechnischer Art ebenfalls diskutiert worden sind, soll im folgenden auf die speziellen Probleme eingegangen werden, die für das Oszillographieren selbst wichtig sind und die sich aus den an ein fertiges Gerät zu stellenden Anforderungen ergeben. Die schaltungstechnische Lösung dieser Probleme führt dann zu einem Hochleistungsoszillographen, dessen Ergebnisse mitgeteilt werden.

2. Der Zeitkreis.

Eine Stoßspannungsprüfanlage läßt sich immer auf ein Schema nach Bild I zurückführen: Die Stoßspannung, die bei dem Zusammenbruch der Funkenstrecke F auf den Prüfling P gegeben wird, gelangt auf den Meßspannungsteiler Sp und löst über den Zeitkreis Z die Zeitablenkung des Oszillographen aus; gleichzeitig muß der bis dahin zur Vermeidung von Vorbelichtungen gesperrte Elektronenstrahl freigegeben werden. Da sich eine geringe Verzögerungszeit zwischen Stoßimpuls und endgültiger Zeitablenkung, bzw. Strahlfreigabe nie ganz vermeiden läßt, wird die Meßspannung über eine möglichst verzerrungsfreie Verzögerungsleitung K an die Meßplatten P_3 und P_4 des Oszillographen geführt.

Hieraus folgt vor allem die Forderung einer möglichst kleinen Verzögerungszeit des Zeitkreises, weil damit die Länge der Verzögerungsleitung K und also auch die Verzerrungen der Meßspannung geringer werden; ferner muß das Zeitablenkgerät auf positive und negative Stöße ansprechen. Wegen der zusätzlichen Verwendung für die UKW-Oszillographie müssen kürzere Ablenkzeiten einstellbar sein als es die genormten Stoßwellen erfordern; außerdem ist zur leichteren Auswertung der Oszillogramme eine lineare Zeitablenkung erwünscht. Schließlich muß noch auf folgenden wichtigen Punkt

¹⁾ H. Pieplow, Dieses Heft S. 319.

geachtet werden: Es ist bekannt, daß unsymmetrische Ablenkspannungen Fleckverzerrungen hervorrufen, die um so stärker sind, je näher der Ablenkkondensator der Anode ist¹⁾; Fleckverzerrungen bedeuten aber außer einer Verringerung der Meß-

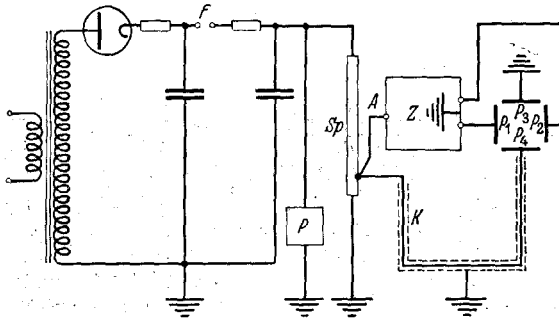


Bild 1. Prinzipschaltbild einer Stoßspannungsprüfanlage.

genauigkeit vor allem eine durch die geringere Strahlstromdichte bedingte Herabsetzung der Leuchtfleckhelligkeit. Da nun die Stoßspannung in Prüfanlagen immer einpolig geerdet ist und sich ohne weiteres nicht symmetrieren läßt, muß sie an die schirmnahen Ablenkplatten gelegt werden, während die im Oszillographen fest eingebaute Zeitablenkspannung symmetriert und dem anodennahen Ablenkplattenpaar zugeführt werden kann.

Aus diesen Überlegungen heraus wurde eine Zeitkreisschaltung nach

Bild 2 entwickelt: Der Zeitablenkkondensator C wird bei gesperrtem Elektronenstrahl über die Widerstände R_1 und R_2 aufgeladen und während des Oszillogramms über die Pentode L zeitlinear entladen. R_1 und R_2 sind gleich groß, so daß die Spannung an C erdsymmetrisch ist; außerdem ist der Aufladestrom C klein gegen den Entladestrom durch L , so daß eine gute Zeitlinearität erreicht wird.

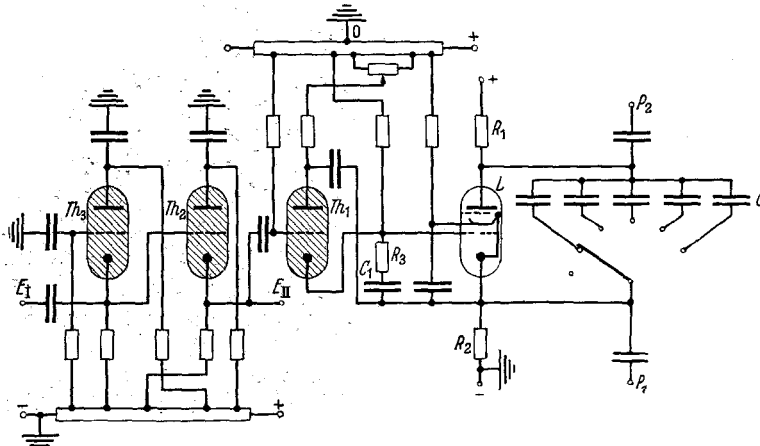


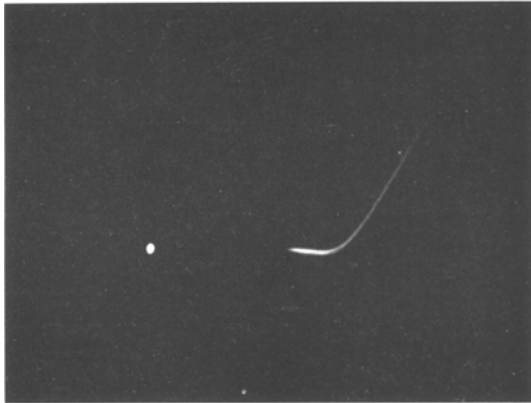
Bild 2. Zeitkreis für lineare und symmetrische Zeitablenkung.

Diese Kombination einer symmetrischen und zeitlinearen Kondensatorentladung über eine Hochvakuumröhre hat eine charakteristische Schwierigkeit zur Folge, die darin besteht, daß die Steuergitterspannung von L während der Entladung konstant bleiben muß, obwohl sich das Erdpotential der Kathode von L ändert. Wie aus Bild 2 hervorgeht, ist diese Schwierigkeit dadurch überwunden worden, daß als Gittersteuerung die Brennspannung einer Gasentladungsröhre Th_1 benutzt wird, die selbst die Potentialschwankungen der Kathode von L mit ausführt²⁾. Der Vorteil der Verwendung einer gasgefüllten Relaisröhre liegt dabei darin, daß trotz des nach dem Zünden von Th_1 stark negativ werdenden Gitters die Brennspannung praktisch konstant bleibt, solange dafür gesorgt wird, daß der Anodenstrom von Th_1 nicht zu klein wird. Für den bei größeren Zeitkreiskondensatoren möglichen Fall des vorzeitigen

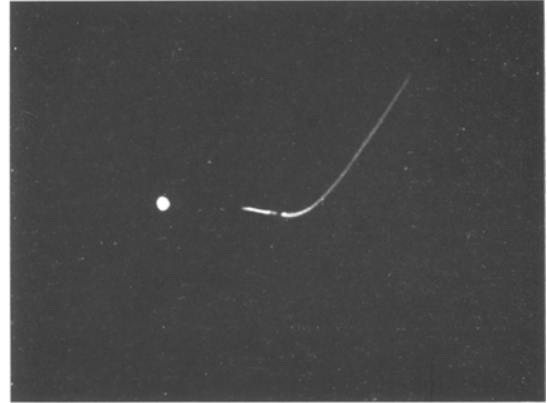
¹⁾ H. Pieplow u. E. Steudel, Arch. Elektrotechn. 32 (1938) S. 627.

²⁾ Die Schaltung wurde im Sommer 1939 entwickelt. Unabhängig davon ist sie inzwischen auch von anderer Stelle veröffentlicht worden [vgl. H. Schneider, Arch. Elektrotechn. 34 (1940) S. 457].

Verlöschen der Relaisröhre Th_1 ist der Spannungshaltekapazitor C_1 eingeführt; der verhältnismäßig kleine Widerstand R_3 , der zu ihm in Reihe geschaltet ist, ermöglicht trotz des Kondensators einen steilen Spannungsanstieg am Gitter der Pentode L . Die Spannungen werden den Elektroden von Th_1 über ohmsche Widerstände zugeführt, die die Relaisröhre von der auf Erdpotential liegenden Spannungsquelle wechselstrommäßig entkoppeln. Die Zeitproportionalität wird durch diese Widerstände nicht

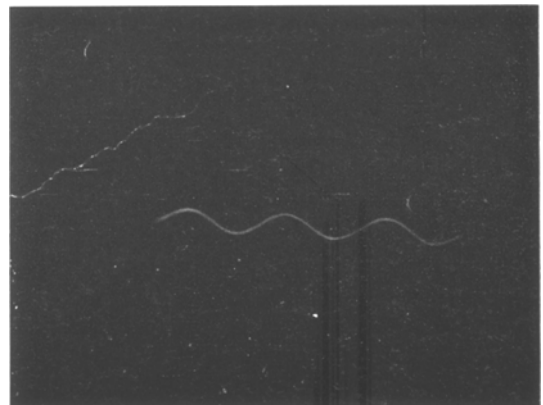


a Auslöseimpuls an E_I .



b Auslöseimpuls an E_{II} .

beeinträchtigt, da der Strom der Pentode sehr groß gegenüber dem in den Widerständen ist. Ein linearer Verlauf der Zeitablenkung, wie er auch sonst allgemein angestrebt wird, ist übrigens grundsätzlich dem exponentiellen vorzuziehen, weil er die allgemeine Verwendbarkeit des Oszillographen wegen der besseren Übersichtlichkeit und der leichteren Auswertbarkeit der Kurven erhöht, besonders wenn man berücksichtigt, daß man durch Einstellen verschiedener Ablenkzeiten, bzw. durch eine Vergrößerung der Verzögerungszeit jeden beliebigen Teil einer Meßkurve in jeder beliebigen Zeitauflösung betrachten kann.



c Eichschwingung von 12 MHz.

Bild 3. Zur Bestimmung der Verzögerungszeit

Mit einem derartigen Zeitkreis wurden Kondensatorentladungsgeschwindigkeiten von rd. $100\,000\text{ V}/\mu\text{s}$ erreicht, d. h. bei Verwendung der neuen Hochleistungsröhre mit 20 kV Anodenspannung kürzeste Oszillogrammzeiten von $1,5 \cdot 10^{-8}\text{ s}$, so daß sich von dieser Seite aus praktisch alle vorkommenden Meßaufgaben lösen lassen.

Ganz besonderer Wert wurde indessen auf eine möglichst kurze Verzögerungszeit des Zeitkreises gelegt, also auf die Zeit, die vom Eintreffen des Auslöseimpulses an bis zum Beginn der Zeitablenkung des Elektronenstrahls verstreicht. Die kürzesten Verzögerungszeiten werden bei sehr steilen positiven und negativen Stößen erreicht, die über die Klemme E_{II} in Bild 2 direkt auf das Gitter von Th_1 gegeben werden können. Lassen sich dagegen über Steilheit und Größe des Auslöseimpulses keine Aussagen machen, so wird die Zeitauslösung über die Klemme E_I in Bild 2 vorgenommen: Die vorgeschaltete Relaisröhre Th_2 dient dann dazu, einen gegebenenfalls flachen Spannungsanstieg des Auslöseimpulses so steil zu machen, daß er einwandfrei über den kleinen Kopplungskondensator zum Gitter von Th_1 übertragen wird. An die Klemme E_I

ist sowohl das Gitter von Th_2 als auch die Kathode einer weiteren Relaisröhre Th_3 angeschlossen. Bei positiven Stößen zündet nur Th_2 , bei negativen zunächst Th_3 und dann Th_2 . Ebenso zündet beim Anschluß an E_{II} nur Th_1 bei positiven Stößen, während bei negativen Stößen zunächst Th_2 und dann Th_1 zündet. Es ist also möglich, ohne jede Umschaltung positive und negative Stöße zu oszillographieren.

Zur quantitativen Bestimmung der für die Praxis wichtigen Größe der Verzögerungszeit wurde ein zweiter ganz analog aufgebauter Zeitkreis benutzt: Der Gitterspannungsimpuls an der Entladeröhre L des einen Zeitkreises, der die normale Zeitablenkung der Braunschen Röhre übernimmt, wurde gleichzeitig auf die Klemme E_I , bzw. E_{II} des zweiten Zeitkreises übertragen und die Anodenspannung an der Entladeröhre L dieses zweiten Zeitkreises oszillographiert; die Hellsteuerung des Elektronenstrahls geschah hierbei vom zweiten Zeitkreis aus, und zwar in der normalen Art, auf die später eingegangen werden wird. Auf diese Art wird erreicht, daß die Zeitachse des Oszillogramms im gleichen Augenblick zu schreiben begonnen wird, in dem der Auslöseimpuls an E_I oder E_{II} gelangt, und man braucht nur noch auf dem Oszillogramm die Strecke zwischen dem Beginn der Zeitachse und dem der Meßablenkung auszumessen, um unmittelbar die Verzögerungszeit zu bestimmen. Dies ist in den Oszillogrammen Bild 3 durchgeführt worden:

Polarität des Stoßes	Klemme	Verzögerungszeit in s
positiv	E_{II}	$1 \cdot 10^{-7}$
negativ	E_{II}	$1,5 \cdot 10^{-7}$
positiv	E_I	$1,5 \cdot 10^{-7}$
negativ	E_I	$2 \cdot 10^{-7}$

In Bild 3a war der (positive) Auslöseimpuls an E_I , in Bild 3b an E_{II} gelegt worden; Bild 3c gibt eine 12 MHz-Schwingung zur Eichung des Zeitmaßstabes. Man entnimmt den Oszillogrammen nebenstehende Verzögerungszeiten.

Da die Hellsteuerung vom zweiten Zeitkreis (der also die Ablenkung in Ordinatenrichtung liefert) aus betätigt wird, erscheint im Oszillogramm der Beginn der Zeitachse dunkel, und man kann gleichzeitig den betriebsmäßigen Einsatzpunkt der Hellsteuerung kontrollieren; die Ruhelage des Leuchtflecks wurde durch kurzes Aufblenden des Elektronenstrahls photographiert. Man erkennt, daß die Verzögerungszeiten der Hellsteuerung des Elektronenstrahles sogar jeweils noch etwas kürzer sind als die entsprechenden des Zeitkreises.

3. Der Hellsteuerkreis.

Im Gegensatz zum Kaltkathodenoszillographen kann bei der abgeschmolzenen Braunschen Röhre die Sperrung, bzw. Freigabe des Elektronenstrahls sehr leicht durch

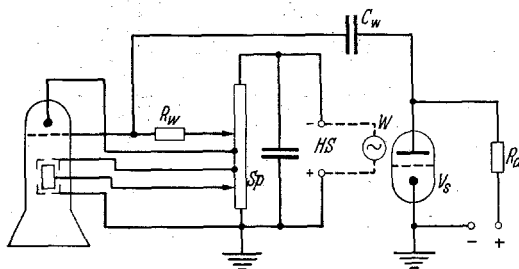


Bild 4. Übliche Anordnung der Hellsteuerung.

den Wehnelt-Zylinder erfolgen, der nur Steuerspannungen von größenordnungsmäßig 100 V benötigt. Dabei tritt aber auch hier wieder ein dem Hochleistungsoszillographen ganz eigentümliches Problem auf, und zwar deswegen, weil beim Oszillographen mit elektrostatischer Ablenkung die Anode geerdet sein muß und die Kathode der Braunschen Röhre folglich Hochspannung führt. Wird nun nach Bild 4 der nächstliegende Weg zur Steuerung des Wehnelt-Zylinders benutzt, indem der von der Impulsröhre V_s kommende Hellsteuerimpuls über den Kopplungskondensator C_w auf einen in den Wehnelt-Kreis geschalteten Ableitwiderstand R_w gegeben wird, so treten folgende Verhältnisse auf: Der Außenwiderstand R_a von V_s muß sehr klein sein, da V_s noch rechteckige Steuerspannungsimpulse von 10^{-7} s Dauer liefern muß; die Zeitkonstante $C_w \cdot R_w$ muß aber groß gegenüber der längsten einstellbaren Oszillogrammzeit sein, muß also

mindestens 10^{-2} bis 10^{-1} s betragen, damit die Bildhelligkeit überall konstant ist. Daraus folgt, daß der Kondensator C_w , der ja auch die Hochspannung der Braunschen Röhre von V_s fernhalten muß, groß und damit teuer wird und daß sich die gesamte Brummspannung der Hochspannungsquelle HS , die in Bild 4 schematisch als Wechselstromgenerator W angedeutet ist, auf den Widerstand R_w verlagert und damit eine unerwünschte Helligkeitsmodulation im Takt der Welligkeit von HS hervorruft. Bei Anwendung einer Schaltung nach Bild 4 wird also nicht nur ein teurer und großer Koppelkondensator C_w gebraucht¹⁾, sondern das Netzanschlußgerät der Hochspannungsquelle HS muß außerordentlich gut gesiebt sein und bedeutet damit einen ganz erheblichen Aufwand²⁾.

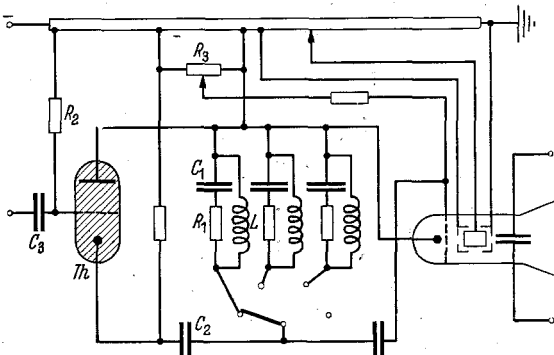


Bild 5. Ausgeführter Hellsteuerkreis.

Aus diesen Gründen wurde für die Strahlsteuerung eine Anordnung nach Bild 5 gewählt, bei der die Steuerröhre Th des Wehnelt-Zylinders wieder gasgefüllt ist und zusammen mit ihren Schaltelementen ebenfalls auf Hochspannung gegen Erde liegt. Damit können keinerlei Brummspannungen mehr auf den Wehnelt-Zylinder gelangen, die Leitungsführung wird kurz und der Koppelkondensator C_3 , der die Hochspannung von den übrigen Geräteteilen fernhält, kann sehr klein werden, weil er nur den sehr kurzen Zündimpuls für Th zu übertragen braucht. Die Steuerröhre Th wird parallel mit der Braunschen Röhre geheizt, so daß sich ein besonderer Isolierwandler erübrigt.

Der Rechteckimpuls, der auf den Wehnelt-Zylinder gegeben wird, wird durch die Relaisröhre Th und eine Kombination von Schaltelementen (C_1 , R_1 , L) erzeugt, durch deren Umschalten die Dauer der Rechteckspannung der jeweiligen Ablenkzeit angepaßt wird. Der dazu dienende Umschalter ist mit dem für die Zeitkondensatoren mechanisch gekoppelt. Der Kondensator C_1 dient zum Halten der Spannung, falls die Relaisröhre Th vorzeitig verlöschen sollte. Der Widerstand R_1 ermöglicht einen schnellen Anstieg der Spannung beim Zünden der Röhre Th , während die Induktivität L den Zusammenbruch der Spannung am Ende des Rechteckimpulses bewirkt, und zwar in günstigerer Weise, als es ein ohmscher Widerstand tun würde, da bei der Induktivität im Gegensatz zum Widerstand der Strom zuerst fast Null ist, um dann zu sehr hohen Werten anzusteigen. Daraus ergibt sich eine gute Annäherung der Wehnelt-Steuerspannung an eine Rechteckkurve. Der Kondensator C_2 ist die Energiequelle der Schaltung.



Bild 6. Der Hochleistungsoszillograph.

¹⁾ C_w muß übrigens auch noch der Zusatzbedingung äußerster Induktivitätsfreiheit genügen, da sonst bei den kurzen Stößen Störschwingungen auf der Wehnelt-Leitung auftreten können.

²⁾ Als Störspannung auf dem Wehnelt-Zylinder könnte man äußerstenfalls 10 V zulassen; dies würde aber bei 20 kV Anodenspannung einer Glättung auf $5 \cdot 10^{-4}$ entsprechen!

Die Vorspannung des Wehneltzylinders wird am Potentiometer R_3 eingestellt. Der Gitterkondensator C_3 ist an den mit E_{II} bezeichneten Punkt in Bild 2 angeschlossen. Bemerkenswert ist noch, daß durch die umschaltbare Kombination von Schaltmitteln (C_1 , R_1 , L) die Dauer der Rechteckkurve von der Brenndauer der Relaisröhre Th unabhängig gemacht ist und allein durch die Daten dieser Schaltmittel gegeben ist.

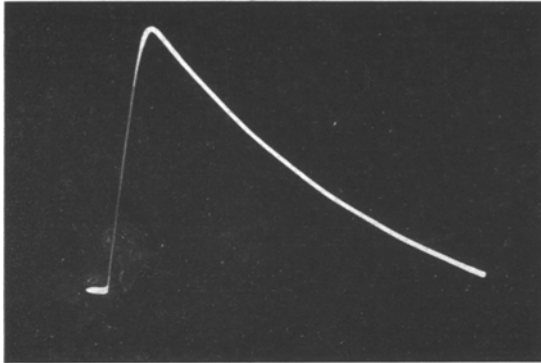


Bild 7. VDE-Stoßwelle 0,5/5 (Anodenspannung: 15 kV; Aufnahmeapparat: Contax, Blende 1:8).

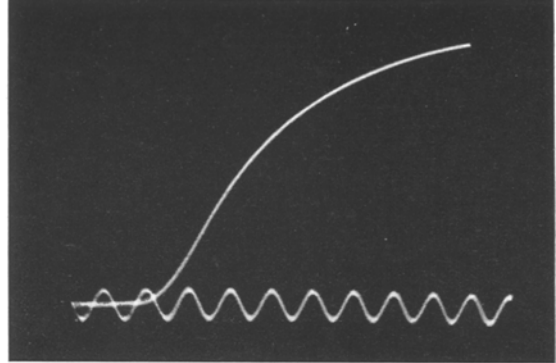


Bild 8. VDE-Stoßwelle 0,5/5 in größerer Zeitauflösung und Eichfrequenz 10 MHz (Anodenspannung: 15 kV; Aufnahmeapparat: Contax, Blende 1:6).

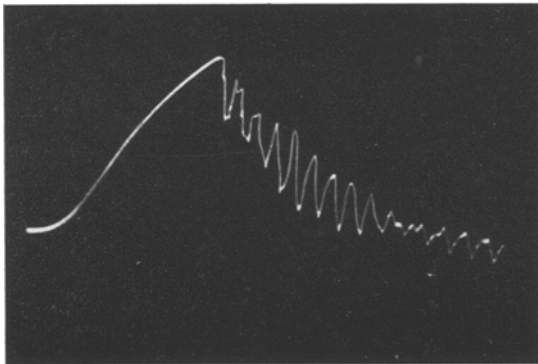


Bild 9. Stoßprüfung eines Überspannungsableiters (alle Daten wie in Bild 8).

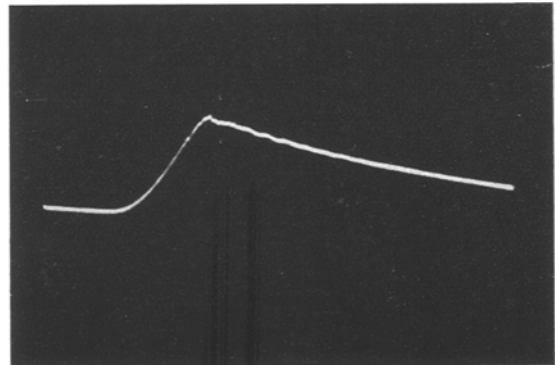


Bild 10. Stoßprüfung eines Überspannungsableiters anderen Fabrikates (alle Daten wie in Bild 8).

Da im gesamten Zeit- und Steuerkreis, von der Pentode L abgesehen, nur Gasentladungsröhren benutzt werden, ergeben sich nicht nur die sehr kurzen Verzögerungszeiten, sondern auch der Vorteil, daß im Ruhezustand kein Strom fließt, während im Arbeitszustand, also während des Oszillogramms, die Gasentladungsröhren einen außerordentlich kleinen Innenwiderstand besitzen. Damit werden einerseits die Netzanschlußapparate der Gleichspannungshilfsquellen sehr klein und einfach, auf der anderen Seite aber haben schädliche Schalt- und Leitungskapazitäten auf die Verzögerungszeit nur einen ganz unwesentlichen Einfluß.

4. Ergebnisse.

Zur praktischen Erprobung der hier entwickelten Steuerschaltungen wurde ein vollständiger Hochleistungsoszillograph aufgebaut (Bild 6)¹⁾. Die Ablenkzeit (das ist die Zeit, in der der Leuchtfleck den Bildschirm in der Zeitachse durchläuft) kann

¹⁾ Öffentlich gezeigt auf der Rundfunkausstellung Berlin 1939.

stufenweise zwischen $5 \cdot 10^{-3}$ s und $1,5 \cdot 10^{-7}$ s eingestellt werden¹⁾. Durch eine symmetrische Vorspannung, die mittels eines Potentiometers regelbar ist, kann der Elektronenstrahl in der Abszissenrichtung vorabgelenkt werden. Außerdem kann auch der Elektronenstrahl in der Ordinatenrichtung verschoben werden, und zwar nach oben und unten, so daß die Verschiebung der Zeitlinienhöhe einmal zur virtuellen

Schirmbildvergrößerung²⁾ dienen kann und dann dazu, die Eichkurve unterhalb der Meßkurve aufzunehmen. Außer dem Zeit- und Hellsteuerkreis ist in das Gerät zur Zeiteichung noch ein Meßsender fest eingebaut, dessen Frequenz zwischen 100 MHz und 10 kHz in Stufen von 1:3 geändert werden kann. Die Ablenkplatten in der Ordinatenrichtung können durch einen Umschalter entweder auf die Meßspannung oder auf die Senderspannung geschaltet werden, so daß man zu jeder Aufnahme auf dasselbe Bild gleich eine Zeiteichung aufnehmen kann. Die Zeitablenkung wird dabei durch Betätigung eines besonderen Druckknopfes ausgelöst.

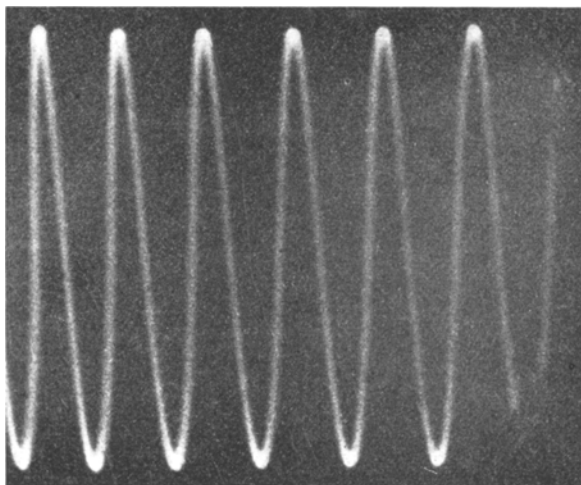


Bild 11. 300 MHz-Schwingung (Anodenspannung: 20 kV; Aufnahmeoptik: Leitz; Blende: 1:1; Abbildungsmaßstab: 1:1.

Die Bilder 7 bis 11, die mit dem Hochleistungsoszillographen aufgenommen wurden, wurden mit einer Kleinbildkamera (Leicaformat) auf Agfa-Fluorapidfilm in der Verkleinerung 1:6 photographiert und dann wieder vergrößert.

Bild 11 zeigt als Beispiel einer Aufnahme mit besonders hoher Schreibgeschwindigkeit eine 300 MHz-Schwingung, die eine Schreibgeschwindigkeit von 50 000 km/s ergibt.

Zusammenfassung.

Es wurde ein Hochleistungsoszillograph entwickelt, dessen Zeitkreis symmetrisch und zeitlinear arbeitet und Ablenkzeiten bis zu $1,5 \cdot 10^{-7}$ s zu erzielen gestattet. Durch Verwendung von Gasentladungsröhren zur Steuerung ließen sich außergewöhnlich kurze Verzögerungszeiten von $1 \cdot 10^{-7}$ s erreichen. Zur Steuerung des Wehnelt-Zylinders wurde ein Weg-beschritten, der die bisher notwendige völlige Glättung der Anodenspannung der Braunschen Röhre nicht erfordert und somit wesentlich zur Vereinfachung des Gerätes beiträgt. Die mitgeteilten Oszillogramme veranschaulichen die Brauchbarkeit des neuen Gerätes für die Hochspannungs- und Ultrakurzwellenmeßtechnik.

¹⁾ In Sonderfällen wurden bis zu $1,5 \cdot 10^{-8}$ s erreicht. Vgl. H. Ganswindt u. H. Pieplow, Hochfrequenztechnik und Elektroakustik 57 (1941) S. 116.

²⁾ H. Pieplow, ETZ 58 (1937) S. 242.