

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Testsignalgenerator zur Überprüfung von Oszillographengenauigkeiten

M. Ulrich

IPP 1/73

Dezember 1967

Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem Institut für Plasmaphysik GmbH und der Europäischen Atomgemeinschaft über die Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.

IPP 1/73

M. Ulrich

Testsignalgenerator zur Überprüfung von Oszillographengenauigkeiten

(Testsignal generator for accuracy checks on oscilloscopes)

Dezember 1967

Abstract

An electronic instrument is described here which was built for the easy checking of the accuracy and linearity of oscilloscopes. The testsignal allows simultaneous checking of: timebase calibration and timebase linearity, calibration of vertical deflection sensitivity and vertical deflection linearity, focus and astigmatism setting and beam brightness and triggering level for negative-going signals.

One of the major advantages is that the output of the generator can be easily fitted to any setting of the oscilloscope, sensitivity as well as timebase. Thus the setting of the oscilloscopes ready for measurements on an experiment needs not to be changed for the checking procedure. Just the signal cable has to be replaced by the cable of the testsignal generator. The fact that the testsignal is similar to a stair-step function allows the registration of all checks by taking one polaroid picture of a single display of the testsignal on the oscilloscope screen.

Zusammenfassung

Das hier beschriebene Gerät dient zur schnellen Überprüfung von Oszillographen. Mit dem Testsignal können gleichzeitig überprüft werden: Zeitbasiseichung und Zeitbasislinearität, Vertikalempfindlichkeit und Vertikallinearität, Strahlschärfe (Fokus und Astigmatismus) und Strahlhelligkeit, sowie die Triggerempfindlichkeit für negative Signale.

Wesentlich dabei ist, dass an der für das vorbereitete Experiment vorgenommenen Einstellung der Vertikalempfindlichkeit und Zeitablenkung nichts geändert zu werden braucht; lediglich der Signalanschluss am Oszillographen wird vorübergehend abgetrennt und durch die Testsignalleitung ersetzt. Photographiert man das Schirmbild mit einer Polaroidkamera so erhält man alle oben genannten Genauigkeitsinformationen einschliesslich eventueller Fehler der Kameraeinstellung innerhalb weniger Sekunden auf einem einzigen Polaroidbild.

Das Gerät wurde entwickelt, weil es an Isar I nicht mehr anders möglich war die hier verwendeten 12 Zweistrahloszillographen (Tek 551) oft und schnell genug auf ihre Genauigkeit zu überprüfen. Spezielle Messungen (z.B. Anisotropie der Neutronenemission oder Röntgenabsorptionsmessungen) verlangen aber Genauigkeiten der Oszillographen besser 3 %, was meist nur über sehr kurze Betriebszeit gewährleistet ist.

Messfehler von 10 % oder 20 % der Oszillographen spielen zwar für manche Messungen keine Rolle; dies trifft jedoch nur für Messungen zu, die völlig unabhängig von anderen Messwerten beurteilt werden können. Sobald jedoch weitere Signale zur Auswertung mit herangezogen werden müssen, sind solche Fehler nicht mehr zulässig. Selbst wenn die absolute Genauigkeit des Zeitmasstabes und der Vertikalablenkung weiterhin keine grosse Rolle spielen, so müssen doch alle beteiligten Oszillographen untereinander sehr gut übereinstimmen.

Zudem zeigte die Erfahrung am Experiment, dass bei der Vielzahl von gleichzeitig hier arbeitenden Experimentatoren, die ihre Oszillographen meist selbst einstellen, ein Testsignal benötigt wird, das es gestattet die Einstellungen am Oszillographen zu belassen; andernfalls kommt es leicht zu Fehleinstellungen an Oszillographen, die das gesamte Ergebnis einer Messung in Frage stellen können.

Das Testsignal

Das Testsignal ist treppenähnlich. Einem kurzen horizontalen Signalverlauf folgt ein zeitlich gleich langes Stück, das unter -45° verläuft, dann wieder ein horizontales Stück usw. Zeit- und Amplitudenmasstab können so gewählt werden, dass pro Teilung der Zeitachse des Oszillographenschirmes je eine solche Stufe geschrieben wird (siehe Abb. 1). Die Knickpunkte des Signals liefern so 20 Zeitmarken für 10 cm Horizontalauslenkung, die horizontalen Teile liefern 10 Eichstriche für 5 cm Vertikalablenkung. Stufen-

schalter am Testsignalgenerator erlauben es Zeit- und Amplitudenmasstab in 8 bzw. 7 Stufen ($0,1 \mu\text{sec/cm}$; $20 \mu\text{sec/cm}$ und 5 mV/cm $0,5 \text{ V/cm}$) der jeweiligen Oszillographeneinstellung anzupassen. Die 8 möglichen Einstellungen für den Zeitmasstab entsprechen den hier fast ausschliesslich verwendeten Zeitbasen, eine Erweiterung zu längeren Zeiten wäre möglich. Das gleiche gilt für die 7 Amplitudenstufen; eine Erweiterung zu höheren Signalspannungen hin wäre allerdings sehr aufwendig. Unserer Erfahrung nach besteht aber keine Notwendigkeit die Signalspannungen noch zu erhöhen, da Fehler in Amplitudeneichung und -Linearität praktisch nur im Bereich hoher Eingangsempfindlichkeit unterschiedlich sind. Da die Eingangsspannungsteiler der Oszillographen im Bereich kleiner Empfindlichkeit (20 V/cm $0,1 \text{ V/cm}$) rein passiv sind, kann mit grosser Sicherheit angenommen werden, dass für ein einmal geeichtes Gerät eventuelle Fehler bis $0,1 \text{ V/cm}$ die gleichen sind wie in allen Bereichen kleinerer Empfindlichkeit.

Das treppenähnliche Testsignal wird periodisch erzeugt. Die Wiederholzeit beeinflusst dabei nur die Strahlhelligkeit; sie kann passend eingestellt werden.

Ablesung der Oszillographenfehler aus der Testsignalwiedergabe

Zeitbasiseichung:

Liegt ein Testsignalknick auf der ersten senkrechten Rasterlinie, so muss der zwanzigste Knickpunkt danach genau auf der zehnten Rasterlinie liegen.

Zeitbasislinearität:

Alle Testsignalknickpunkte müssen gleich weit voneinander entfernt sein. Ist die Zeitbasiseichung korrekt und liegt ein Knickpunkt auf der ersten senkrechten Rasterlinie, so muss jeder zweite Knickpunkt wieder auf einer Rasterlinie liegen.

Vertikalempfindlichkeit:

Der vertikale Abstand von 8 horizontalen Signalteilen muss 4 cm betragen.

Vertikallinearität:

Alle horizontalen Signalteile müssen gleichweit voneinander entfernt sein. Ist die Vertikalempfindlichkeit richtig und liegt ein horizontales Signalstück auf der obersten Rasterlinie, so muss jedes zweite horizontale Signalstück wieder auf einer Rasterlinie liegen. Ist die Zeitbasislinearität gut, so lässt sich ein Fehler in der Vertikallinearität sofort daran erkennen, dass die Verbindung aller Knickpunkte des Testsignals keine Gerade mehr ist. Dieses Kriterium für die Vertikallinearität ist deshalb günstig, weil hierbei die Vertikalempfindlichkeit und Zeitbasiseichung nicht zu stimmen braucht und auch keine besondere Lage des Signals zum Raster erforderlich ist, um Abweichungen von der Linearität leicht zu erkennen.

Strahlschärfe:

Da das Testsignal horizontale und vertikale Komponenten hat, lassen sich Fokus und Astigmatismus leicht optimal einstellen. Die -45° Steigung des Testsignals ist dabei besser geeignet als ein senkrechter Sprung, da die Strahlhelligkeit wesentlich höher ist.

Triggerempfindlichkeit für negative Signale:

Da der Testsignalgenerator die meiste Zeit die Ausgangsspannung Null liefert (DC-Kopplung), lässt sich durch Verdrehen der Triggerempfindlichkeit leicht jeder gewünschte Triggerpegel einstellen. Der Abstand zwischen Nulllinie und Beginn des Treppensignals auf dem Schirm entspricht genau dem Triggerpegel.

Die Abb. 1, 2 und 3 zeigen Testaufnahmen einiger Oszillographen. Die Photos wurden an Oszillographen gemacht, die seit der letzten Korrektur von Vertikalempfindlichkeit und DC-Balance höchstens 50 Std. betrieben wurden (mit Ausnahme von Bild 1). Fehler in der Vertikaleichung betragen zwischen 0 und 30 %, diese Fehler wurden beseitigt bevor die Photos der Abb. 1, 2 und 3 gemacht wurden.

Nun zur Beurteilung der Fehler aus den Testaufnahmen. Der Absolutfehler in der Zeitbasiseichung ist augenfällig (Abb. 1: 0; Abb. 2: 5 %; Abb. 3: 2 %). Für die Beurteilung der Zeitbasislinearität

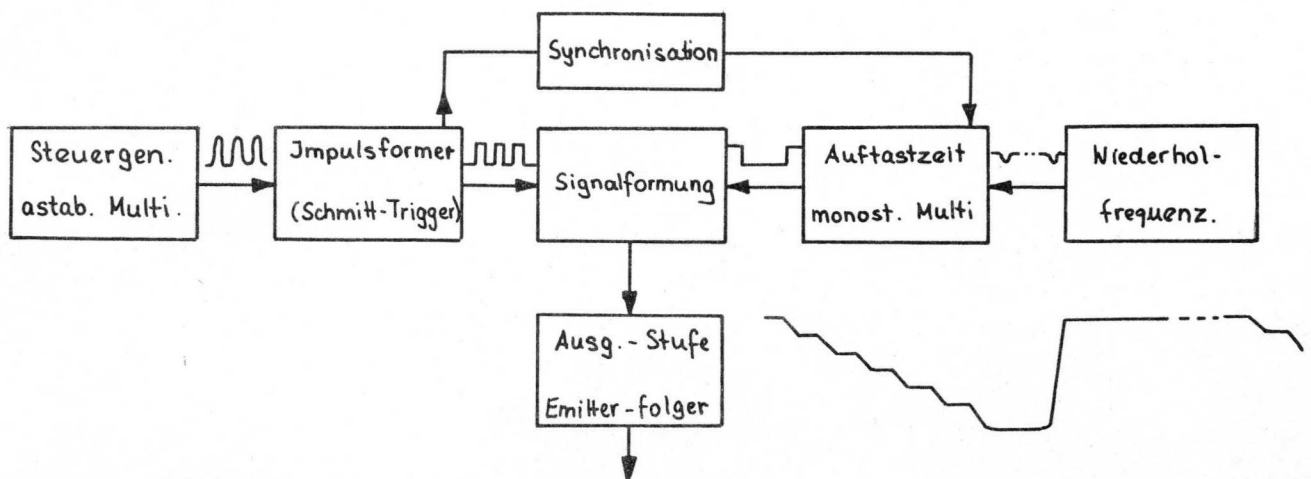
muss man den horizontalen Knickpunkt Abstand genau betrachten (für alle 3 Photos keine Nichtlinearität erkennbar). Da die Zeitbasislinearität gut ist, kann man jetzt Abweichungen in der Vertikallinearität sehr leicht erkennen indem man mit dem Auge an der Testspur entlangvisiert. Eine krumm verlaufende Testspur bedeutet nichtlineare Vertikalablenkung. Genau lässt sich dieser Fehler aus den vertikalen Stufenabständen ablesen. Da sich gezeigt hat, dass die grössten Abweichungen entweder am oberen oder am unteren Rand des ausgesteuerten Schirmbereiches auftreten, ist der Fehler hier immer auf diejenige Treppenstufe bezogen (oberste oder unterste) in deren Bereich die Linearität noch gut ist. Das beste Ergebnis, das aber erst nach den umfangreichen Abgleichvorgängen an Netzgerät, Hauptverstärker und Einschub erzielt wurde zeigt die obere Spur von Bild 1. Eine Zusammenstellung der aus Abb. 1, 2 und 3 ermittelten Fehler zeigt die Tabelle.

| Fehler der: | Abb. 1 Spur | | Abb. 2 Spur | | Abb. 3 Spur | |
|---|--------------------------------------|-------|----------------|-------|------------------|-------|
| | oben | unten | oben | unten | oben | unten |
| Zeitbasiseichung | - | - | 5 % | 5 % | 2 % | 2 % |
| Zeitbasislinearität | gut | gut | gut | gut | gut | gut |
| Vertikaleichung | - wurde vorher richtig eingestellt - | | | | | |
| Vertikallinearität über 4 cm Bildschirm | 2 % | 6 % | 5 % | 5 % | 8 % ⁺ | 2,5% |
| Vertikallinearität oberster cm/unterstem cm | 10 % | 15 % | 10 % | 15 % | - | 10 % |

⁺hierzu siehe nachfolgenden Text

Die obere Spur der Abb. 3 zeigt die Differenz des Testsignals mit sich selbst (Sollwert: 0), wie sie ein CA-Einschub in Stellung A-B bildet. Dabei war die Eingangsempfindlichkeit am Einschub 5 mal höher gewählt, als es für das Einzelsignal richtig gewesen wäre; d.h. das Testsignal durchlief während der Ablenkzeit 2,5 V, die Differenzeingänge des CA-Einschubes waren auf 0,1 V/cm eingestellt. Die gemessene Differenz beträgt 0,2 V, daraus ergibt sich der Messfehler zu $0,2/2,5 = 8\%$. Es muss also davor gewarnt werden die Differenz zweier ähnlicher Signale (in Zeitverlauf und Amplitude) elektronisch zu bilden um höhere Genauigkeit zu erreichen, ohne vorher zu prüfen ob die Gleichtaktunterdrückung des verwendeten Einschubs noch ausreichend ist. Die letzte Zeile "Fehler der Vertikallinearität oberster cm/unterster cm" ist deshalb besonders aufgeführt, da sie bei der Bildung des Quotienten aus zwei Signalspuren von Bedeutung sind. Bildet man beispielsweise den Quotienten aus Spur 1 und 2 der Abb. 2 (der 1 sein sollte, da es sich um das identisch gleiche Eingangssignal handelt), so liegen die dem Bild entnommenen Werte zwischen 0,90 und 1,14. Der maximale Fehler beträgt also 24%, obwohl jede Spur über 4 cm Auslenkung nur max. 5% falsch ist. Dies liegt daran, dass Spur 1 am Anfang zu geringe Amplitude schreibt (im Bild ganz oben), Spur 2 aber am Ende (im Bild unten).

Die Schaltung des Gerätes



Das Blockschaltbild ist in obiger Skizze wiedergegeben, die genaue Schaltung in Abb. 4. Das Kernstück der Schaltung stellt die Signalformstufe dar. Sie ist im Prinzip eine periodisch geschaltete Stromquelle, die einen Kondensator entlädt. Im Ruhezustand ist sie völlig gesperrt. Die Rechteckschwingung des Impulsformers steht ständig an einem Eingang der Signalformstufe. Kommt am anderen Eingang ein Auftastpuls an, dann wird der Arbeitspunkt der Stufe so verschoben, dass die Rechteckschwingung vom Impulsformer einen Strom schaltet, der mit der Frequenz des Steuergenerators zwischen Null und einem konstanten Wert wechselt. Der Kondensator wird also immer $1/2$ Steuergeneratorperiode lang mit konstantem Strom entladen (lin. Spannungsabfall am C), dann bleibt der Strom $1/2$ Periode lang Null (keine Spannungsänderung am C, horizontaler Teil des Treppensignalverlaufes). Die Entladung in diesem Rhythmus geht bis zum Ende des Auftastpulses, bzw. bis zum Erreichen einer Grenzspannung am Kondensator so weiter, dass immer 12 Treppen mit konstanten Abständen entstehen. Am Ende des Auftastpulses wird der Kondensator wieder auf seine Anfangsspannung aufgeladen. Die Ausgangsspannung des Gerätes wird dann Null, bis der nächste Auftastpuls kommt. Das Signal wird nach Impedanztransformation über einen "White-Emitterfolger" dem Ausgangsspannungswähler zugeführt.

Einzelheiten der Schaltung

Fast alle Funktionsgruppen werden in "current-mode" betrieben ^{1 +)}, d.h. die Ströme werden im wesentlichen geprägt, kein Transistor wird in die Sättigung gefahren. Dadurch wird zweierlei erreicht:

- 1) Hohe Schaltgeschwindigkeit, also steile Flanken (Anstieg am unbelasteten Schmitt-Trigger-Ausgang 3 nsec).
- 2) Die einzelnen Funktionsgruppen sind unempfindlich gegen Streuung der Transistorparameter, Temperatureinfluss etc.

⁺) 1 Motorola Switching Handbook

Der Steuergenerator:

Er ist ein symmetrischer astabiler Multivibrator in current-mode-Betrieb. Die Periode wird durch das C zwischen den Emitttern und dem geprägten Strom bestimmt. Mit einem Stufenschalter kann C_{EE} so gewählt werden, dass eine Periode immer gleich 1 cm der Oszillographenzeitablenkung entspricht ($0,1 \mu\text{sec/cm} = 10 \text{ MHz}$, $20 \mu\text{sec/cm} = 50 \text{ kHz}$).

Der Schmitt-Trigger:

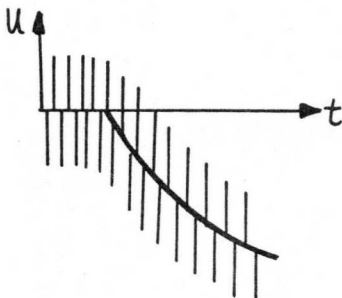
Er ist ebenfalls in current-mode betrieben und dient durch seinen rückwirkungsfreien Ausgang der Entkopplung zwischen Steuergenerator und Signalformstufe, sowie zur Flankenversteilerung und Erzeugung einer geeigneten Rechteckamplitude.

Der Wiederholfrequenzgenerator:

Zur Zeitbestimmung dient ein RC-Glied, das einen unijunction-Transistor steuert. Bei Erreichen einer bestimmten Kondensatorspannung wird der Transistor leitend und liefert an der Basis 2 einen negativen Impuls. Durch kapazitive Beschaltung ist der Anstieg des Ausgangsimpulses sehr flach.

Synchronisierung:

Zu dem flach ansteigenden Impuls des Wiederholfrequenzgenerators wird nun das stark differenzierte Schmitt-Trigger-Signal addiert. Es entsteht nebenstehendes Signal. Einer der Nadelpulse, der weit



genug ins Negative reicht triggert dann den monostabilen Multivibrator, der die Signalformstufe für die maximal nötige Zeit aufsteuert. Durch diese Synchronisation wird vermieden, dass das erste unter -45° verlaufende Signalstück unterschiedliche Amplituden hat.

Auftastpuls erzeugung:

Sie geschieht durch einen monostabilen Multivibrator, der ebenfalls in current-mode betrieben, und durch das oben beschriebene Synchronisierungssignal getriggert wird. Die Pulszeit beträgt ca. $250 \mu\text{sec}$.

Signalformstufe:

Sie ist im wesentlichen eine Schaltung, die den in der gemeinsamen Emitterzuleitung geprägten Strom (current-mode) zwischen den beiden Transistoren umtastet. Im Ruhezustand leitet T 6 und sperrt durch die Emitterkopplung T 5. Gelangt der Auftastimpuls an die Basis von T 6, dann sinkt die Emitterspannung so weit, dass während der negativen Halbwelle an der Basis von T 5 weiterhin nur T 6 leitet, während der positiven Halbwelle aber T 5 den Strom übernimmt und T 6 sperrt. Solange der Auftastpuls ansteht fließt also in den Kollektor von T 5 ein zeitlich rechteckförmiger Strom, der zwischen null und dem im Emitterkreis geprägten Strom springt. Am Ende des Auftastpulses übernimmt T 6 den Strom und T 5 wird wieder völlig gesperrt.

Da der zeitlich rechteckförmige Strom durch T 5 einem Kondensator entnommen wird, der zwischen Kollektor und Masse liegt, tritt am Kondensator der beschriebene treppenähnliche Spannungsverlauf auf. Der Kondensator wird jeweils nach Ende des Auftastpulses über einen Emitterfolger wieder aufgeladen; während der Auftastzeit ist der Emitterfolger gesperrt. Um gute Linearität der Treppenspannung zu erreichen muss entweder die Stromprägung sehr gut sein (hoher Emitterwiderstand und hohe negative Spannungsversorgung) oder bei mässig guter Stromprägung gute Konstanz des Spannungswertes im positiven Dach der Rechteckschwingung an der Basis von T 5 (letzteres ist in der vorliegenden Schaltung der Fall); ausserdem sollen die Transistoren weitab vom Sättigungsgebiet betrieben werden. Eine gewisse Neigung der Kennlinien im Aussteuerbereich des $I_c - U_{CE}$ -Feldes ist zulässig, da der Emitterwiderstand gegenkoppelnd wirkt. Ausserdem darf der Kondensator praktisch nicht belastet werden, da sonst der gewünschten Treppenkurve eine e-Funktion mit $\tau = R_{Last} \cdot C$ überlagert wird. R soll also sehr hoch werden. Um konstante Signalamplitude zu erhalten, muss die Versorgungsspannung stabilisiert sein, ausserdem TK der Widerstände und Kondensatoren klein sein.

Mit der Bereichsumschaltung wird gleichzeitig auch der Kondensator umgeschaltet an dem die Treppenspannung auftritt, damit deren Amplitude in allen Zeitbereichen gleich bleibt. Es war leider nicht möglich Kondensatoren mit hoher Genauigkeit zu beschaffen (2 nF bis 0,4 μ F) und Parallelschalten von Korrektorkondensatoren ist unzulässig, da parallelgeschaltete Kondensatoren verschiedener Eigenresonanzfrequenz einen Schwingkreis bilden, der bei jedem Stromsprung zum Klingeln angeregt wird. Hier wurden daher Kondensatoren mit ungefähr richtigem Wert ausgesucht und der Abgleich der Signalamplitude durch Potentiometer im Emitterkreis vorgenommen. Störend macht sich das Zuleitungs-L zu den Kondensatoren bemerkbar (Schleife zum Zeitbereichsschalter), da bei jedem Stromsprung eine Störspannung $U = -L\dot{I}$ induziert wird. Bei niedrigen Steuergeneratorfrequenzen ist die dadurch verursachte Verzerrung des Treppensignals unerheblich, bei den höchsten Frequenzen war die Störung nicht tragbar. Deshalb wurden die Kondensatoren für diese Frequenzen direkt neben dem Transistor auf der Platine untergebracht und über Mikro-Hg-Relais geschaltet, die direkt daneben eingelötet sind. Diese Relais haben eine Heizwicklung und können durch Ein- und Ausschalten des Heizstromes betätigt werden, was über Kontakte des Zeitbereichsschalters geschieht.

Die Ausgangsstufe:

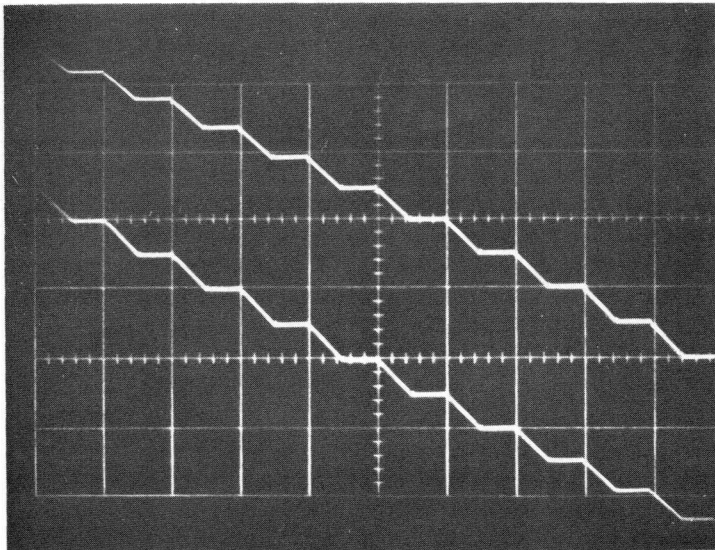
Sie ist ein zweistufiger Emitterfolger, dessen zweite Stufe in "White-Schaltung" arbeitet. Die Eingangsstufe des Emitterfolgers muss sehr hochohmig sein (ca. 100 k Ω), damit der Kondensator an dem das Treppensignal entsteht nicht zu sehr belastet wird. Der Widerstand in der Basisleitung ist nötig, damit J_B der Spannung am Kondensator folgt. Ohne diesen Widerstand fließt aus der Eingangskapazität ein Rechteckstrom (wie aus dem Kondensator an dem die Treppenspannung auftritt), weshalb der Ausgangsspannung dann ein Rechteck überlagert ist. Die zweite Stufe arbeitet in White-Schaltung (Mitsteuerung des Lastwiderstandes durch einen Transistor), da sie dem einfachen Emitterfolger in mehrfacher Hinsicht überlegen ist. Ihr Ausgangswiderstand (U Ausg. Leerlauf/ J Ausg. Kurzschluss) ist wesentlich kleiner, ihr linearer Durch-

steuerbereich grösser und die Wahl der Arbeitspunkte ermöglicht es den linearen Aussteuerbereich so zu legen, wie es für das jeweilige Signal am günstigsten ist (hier für Signale mit $U < 0$). Über einen Ausgangsspannungsteiler, der entsprechend den Oszillographenempfindlichkeiten gestuft ist, gelangt das Signal zur Ausgangsbuchse.

Zusammenstellung technischer Daten

| | |
|--|--|
| Versorgungsspannung | 24 V stabilisiert |
| Strombedarf | 200 mA |
| Treppenperiode | 0,1/0,2/0,5/1/2/5/10/20 μ sec (Genauigkeit ca. 1 %) |
| Wiederholzeit | 3 sec bis 10 msec kontinuierlich einstellbar |
| Ausgangsspannung an 120Ω pro 2 Treppenstufen | 0,5/0,2/0,1 V/50/20/10/5 mV (Genauigkeit ca. 3 %) |

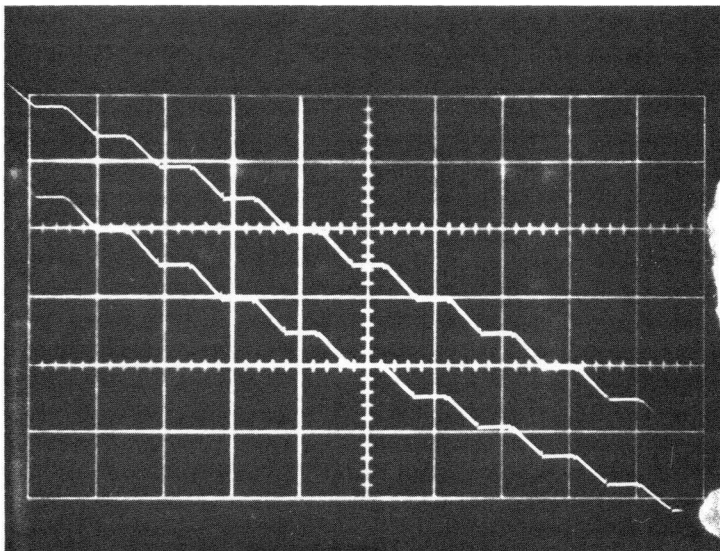
Testaufnahmen an Tek.551 mit den angegebenen Einschüben bei $1 \mu\text{sec/cm}$
und $0,5 \text{ V/cm}$



1A1

Abb. 1

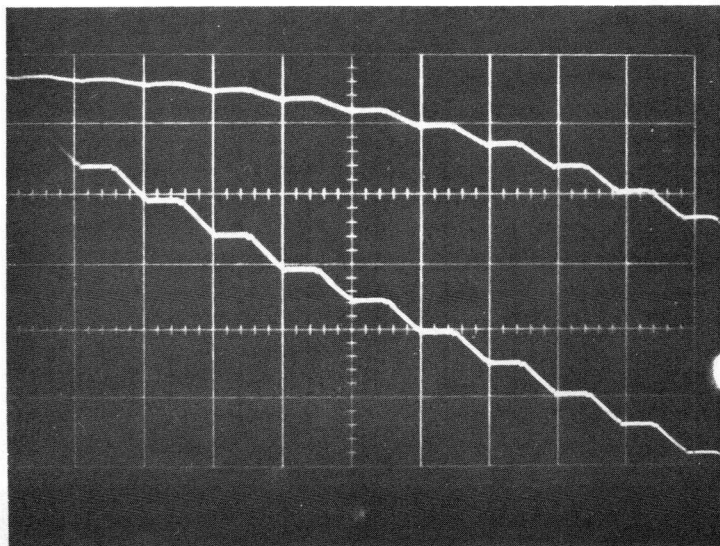
1A1



CA

Abb. 2

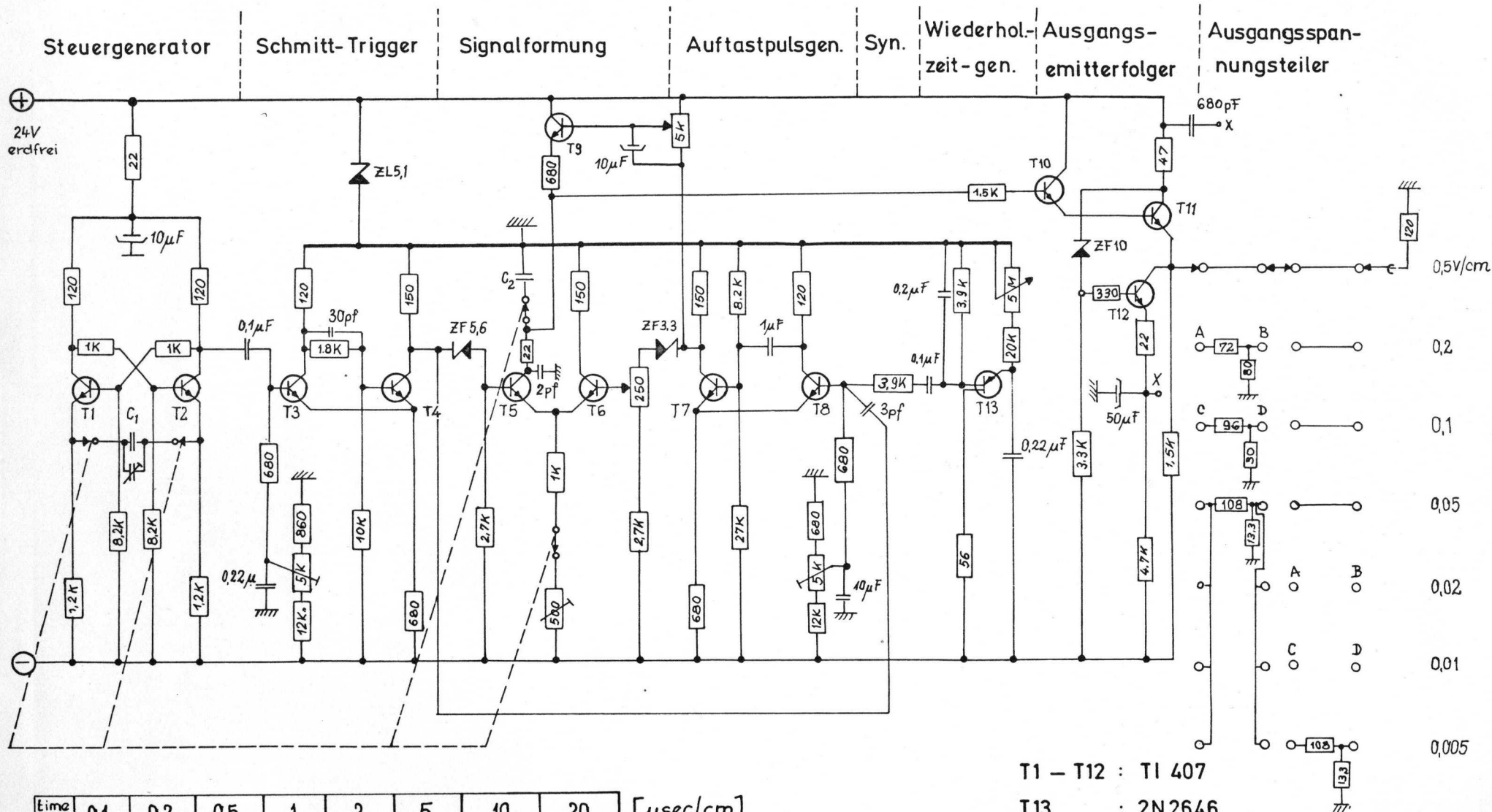
1A1



CA(A-B)

Abb. 3

L



| time base | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 |
|----------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| C ₁ | 130pf | 270pf | 900pf | 2nF | 4,1nF | 11nF | 22nF | 44nF |
| C ₂ | 2nF | 4nF | 10nF | 20nF | 40nF | 0,1μF | 0,2μF | 0,4μF |

[μsec/cm]

T1 - T12 : TI 407
T13 : 2N2646

Abb. 4