

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Kurzzeitkameras mit elektrostatisch
fokussierter Bildwandlerröhre für
Dreibild- und Schmierbild-Betrieb

(High-Speed Cameras with Electro-
Statically Focussed Image Converter
Tube for Three Picture and Streak
Operation)

Franz Hofmeister

IPP 4/10

März 1965

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 4/10 F. Hofmeister

High-Speed Cameras with
Electro-Staticly Focussed
Image Converter Tube for Three
Picture and Streak Operation,
March, 1965 (in German)

ABSTRACT

For the Institut für Plasmaphysik at Garching several image converter cameras are being built which by means of pluggin-in can be used in many ways. Multiple frame photographs of high-speed events are possible with a maximum of three pictures at exposure times of 10 nsec to 1 usec in time distances between 50 nsec and 100 usec. Furthermore streak operation is possible with 2,5 mm/usec to 100 mm/usec at a streak length up to 50 mm.

Starting from the chosen image converter tube the circuit design, the results and border line problems at short exposure times are being treated.

I n h a l t

=====

Zusammenfassung

1. Gegenüberstellung von Verfahren für Kurzzeitphotographie
2. Die RCA-Bildwandler-Röhre Typ 4449A
 - 2.1 Stationäre Betriebsdaten
 - 2.2 Überschlägige dynamische Betriebsdaten
 - 2.3 Anforderungen an die Schaltungstechnik
3. Das gewählte Schaltungsprinzip für Dreibild- und für Schmierbild-Betrieb
 - 3.1 Allgemeines
 - 3.2 Schaltungsprinzip der Dreibild-Einschübe
 - 3.3 Schaltungsprinzip des Schmierbild-Einschubes
4. Elektronische Schaltungstechnik mit Thyratrons und Verzögerungselementen
 - 4.1 Dachkompensation
 - 4.2 Erzeugung von Rechteckimpulsen (Pulser)
 - 4.3 Sägezahn-Schaltungen
5. Netzgerät
6. Konstruktion
7. Technische Daten der Kamera mit Einschüben und Auflösungsergebnisse
 - 7.1 Technische Daten
 - 7.11 Triggerung
 - 7.12 Bildgröße
 - 7.13 Daten des Schmierbild-Einschubes EL 085 E 7
 - 7.14 Daten des usec-Einschubes
 - 7.15 Daten des nsec-Einschubes
 - 7.2 Auflösungsergebnisse
 - 7.21 Diskussion der KZ-Schärfe bei Momentaufnahmen
 - 7.22 Abschätzung der einzelnen Unschärfe-Einflüsse
8. Ausblick
9. Anhang
 - 9.1 Auflösungseinbuße bei Ablenkimpulsen mit Dachschräge

9.2 Optimalisierung der leuchtschirmseitigen optischen
Abbildung

Literaturangabe

Zusammenfassung

Für die Erfordernisse im Institut für Plasmaphysik in Garching bei München werden mehrere Bildwandler-Kameras gebaut, die durch Einschub-Betrieb vielseitig verwendbar sind. Es sind Momentaufnahmen mit maximal drei Bildern mit Öffnungszeiten von 10 nsec bis 1 usec bei zeitlichen Bildabständen zwischen 50 nsec und 100 usec möglich. Ferner ist Schmierbild-Betrieb mit 2,5 mm/usec bis 100 mm/usec bei einer Schmierbildlänge bis zu 50 mm möglich.

Ausgehend von der gewählten Bildwandler-Röhre werden die Schaltungstechnik, die erreichten Ergebnisse und Randprobleme bei kurzen Belichtungszeiten behandelt.

1. Gegenüberstellung von Verfahren der Kurzzeitphotographie

Wenn man einen sehr schnell verlaufenden Vorgang photographieren will, braucht man eine Öffnungszeit, die um eine Größenordnung kleiner ist als die Zeitspanne, während der sich der zu beobachtende Vorgang merklich verändert. Den besten Überblick erhält man, wenn man mit einem zeitlichen Abstand, der eine Größenordnung über der Verschlusszeit liegt, sehr viele Bilder nacheinander aufnimmt. Die Bildschärfe sollte mindestens so gut sein, daß alle vorhandenen Details richtig wiedergegeben werden. Die Wiedergabe der Farben sollte der Augenspektralempfindlichkeit entsprechen und Halbtöne sollten richtig wiedergegeben werden. Diese Ausführungen schließen nicht aus, daß man in Sonderfällen den Kontrast oder die Spektralempfindlichkeit beeinflussen will.

In der Plasmaphysik spielen sich die zu beobachtenden Vorgänge bei energiereichen Entladungen in einigen usec bis einigen 100 usec ab. Hier sind nach dem heutigen Stand der Technik nicht mehr alle Forderungen gleichzeitig zu erfüllen. Deshalb ist eine Vielzahl von Verfahren entwickelt worden, von denen jedes eine Reihe von Forderungen erfüllen kann und andere wiederum nicht. Eine sinnvolle Forderung, die nicht vergessen werden sollte, ist auch eine bequeme Handhabung, denn die Kurzzeitphotographie ist nur ein Hilfsmittel unter vielen diagnostischen Verfahren.

Zu der folgenden Tabelle, die einzelne Kurzzeitphotographie-Verfahren vergleicht, sind voraus einige Erläuterungen notwendig.

1. Auflösung

Eine vernünftige, einfach meßbare Angabe ist die Auflösung in Linienpaaren pro mm, d.h. das dichteste vom Auge noch als Folge von Strichen auflösbare Raster.

Diese Angabe wird vollständig durch die zusätzliche Angabe des Bildformats. Bei quadratischen Bildformaten und ungefähr konstanter Bildschärfe bis zum Rand und in beiden Dimensionen wäre dann die totale Bildpunktzahl eine quadratische Funktion der totalen Linienzahl über die Bildbreite. Normalerweise hat man einen Schärfeabfall am Rand und deshalb einen kleineren Exponenten als 2.

2. Lichtempfindlichkeit

Angegeben wird die Apertur des Kurzzeitverschlusses mit Photoapparat. Bei Bildwandlern, bei denen 2 optische Abbildungen nötig sind, sind zweimal $f/1$ Objektive angenommen worden, falls nicht wie bei manchen magnetischen Bildwandlern solche Objektive aus räumlichen Gründen unbrauchbar sind.

3. Zahl der möglichen Einzelbilder pro Entladung mit einer Kamera

Bei Kerrzellenkamaseras werden oft mehrere Kameras in schneller Folge ausgelöst. Dies kann nicht als Mehrbild-Betrieb bezeichnet werden.

4. Bei Verschlusszeiten ist deshalb ein Strich eingesetzt.

5. Mögliche Farbwiedergabe

Hier muß berücksichtigt werden, daß Farbfilme vergleichsweise unempfindlich sind, d.h. die unter 2. angegebene Lichtempfindlichkeit gilt hierbei nicht.

6. Triggerung

Die elektrische Triggerung der Kamera ist am günstigsten. Falls das zu beobachtende Experiment mechanisch ausgelöst wird, scheidet das Verfahren "Kurzzeitkamera triggert Experiment" aus.

Verfahren	Mechanisch	Magn. fokussierte einstufige BW	Magn. fokussierte mehrstufige BW	Elektrostat. fokuss. einstufige BW	Kerzellen-Kameras
Auflösung	30 - 600	20 - 600	20 - 600	20 - 500	30 - 800
$\xi p/mm - \Sigma \xi p \text{über Bildbreite}$	-	ja	ja	ja	nein
Auflösungsverlust im nsec-Bereich	-	ja	ja	ja	nein
effektive Lichtstärke	$f/10$	$f/0,5$	$f/0,001$	$f/0,5$	$f/4$
maximale Zahl der Einzelbilder	100	16	1	3 bis 3 ²	1
möglicher zusätzlicher Schmierbild-Betrieb	ja	ja	ja	ja	nein
Zeitbereiche					
Öffnungszeiten	0,5 μ sec - msec	20 nsec - μ sec	20 nsec - μ sec	5 nsec - μ sec	1 nsec - 200 nsec
zeitliche Bildabstände	1 μ sec - msec	1 μ sec - msec	-	50 nsec - 100 μ sec	-
Spektralempfindlichkeit	sichtbarer Bereich Farbwiedergabe	UV, blaugrün, JR	UV, blaugrün, JR	UV, blaugrün, JR	sichtbarer Bereich eingeeengt
Triggerung	triggert selbst	elektrisch triggerbar	elektrisch triggerbar	elektrisch triggerbar	elektrisch triggerbar

Tab. 1.1 Typische Eigenschaften von Verfahren der Kurzzeitfotografie

Die im Folgenden beschriebenen Bildwandlerkamas mit elektrostatisch fokussierter Röhre haben den Vorteil der Vielseitigkeit. Unter Verzicht auf Auflösung und sehr viele Bilder pro Entladung können praktisch alle in der Kurzzeit-Plasmaphysik vorkommenden Aufgaben gelöst werden. Die Nachteile sind nicht gravierend.

So kann eine zum schnellen Überblick über die Entladung nötige Bilder-Serie oft durch eine Schmierbild-Aufnahme ersetzt werden. Ferner sollten die Auflösungsunterschiede zwischen den einzelnen Verfahren nicht überbewertet werden. Meist begnügt man sich sowieso mit kleinerer Auflösung, so beim Arbeiten mit Polaroid-Filmen und dies mit Recht, weil eine Gasentladung meist relativ wenige Details enthält. Man berücksichtige, daß das Bild eines Fernsehempfängers nur eine Auflösung von 300 Linienpaaren über die Bildbreite hat!

2. Die Bildwandler-Röhre Typ 4449 A (Vorläufer C 73435 B, 4449) der RCA

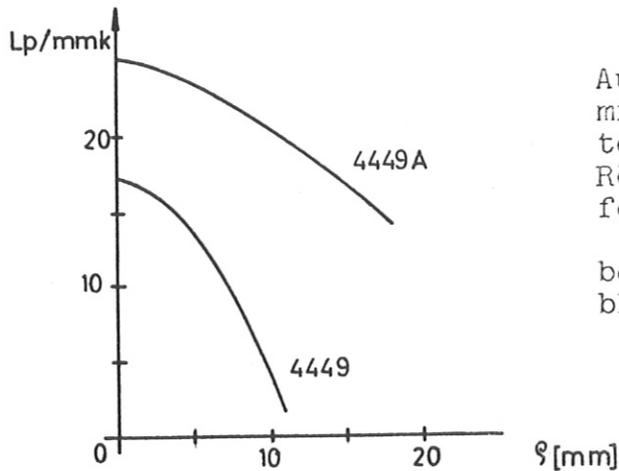
2. 1. Stationäre Betriebsdaten

Genaue Daten geben die photokopierten ersten drei Seiten des Datenblattes der 4449 A (mit gekrümmter Kathode). (S. 21 - 23)

Die Kathode hat S-11 Empfindlichkeit, also maximale Empfindlichkeit bei 4400 \AA . Die Halbwertsbreite ist 2000 \AA , so daß also das Spektralgebiet vom nahen UV bei zur Grün-Gelb-Grenze erfaßt wird. Die Röhre ist aber auch mit anderen Kathoden lieferbar. Die Nachleuchtdauer des P11-Leuchtschirms ist 350 usec für Abfall auf 10%.

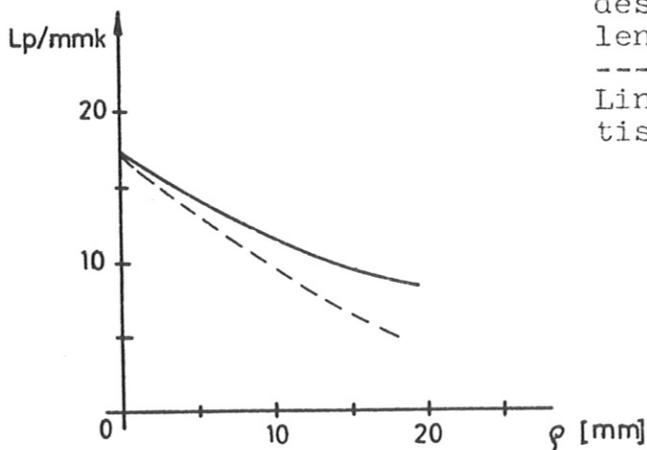
Im Datenblatt ist der Auflösungsabfall bei Ablenkung des Strahls aus der Mitte nicht angegeben. Diese Abhängigkeit wurde gemessen. Bei symmetrischer Ablenkung wird im wesentlichen nur die Auflösung von Strichrastern senkrecht zur Ablenkrichtung verringert, wäh-

rend Strichraster parallel zur Ablenkrichtung in ihrer Schärfe erhalten bleiben. Bei unabgelenktem Strahl ist bei elektrostatisch fokussierten exakt justierten Elektronen-Optiken die Auflösung auf konzentrischen Kreisen um das Zentrum konstant und nimmt mit dem Abstand vom Zentrum ab. In Bild 2.1 a, b und c sind diese Einflüsse dargestellt.



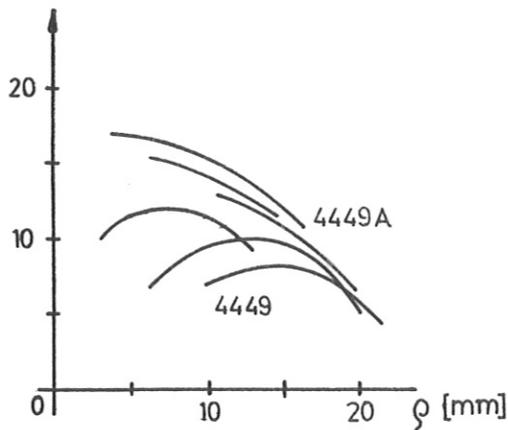
Auflösung auf konz. Kreisen mit Abstand φ vom unabgelenktem Bildzentrum bei einer Röhre 4449 mit Zentralschärfe $17 \frac{L_p}{\text{mm}}$ auf Anode gemessen bzw. für 4449 A aus Datenblatt intrapoliert.

Bild 2.1 a



Auflösung des Zentrums eines symmetrisch abgelenkten Bildes auf der Anode - zur Ablenkrichtung parallele Linien, --- zur Ablenkrichtung senkrechte Linien für 4449 (hierin identisch mit 4449 A)

Bild 2.1 b



Auflösung von Strichrastern senkrecht zur Ablenkrichtung bei 8, 12 und 16 mm abgelenktem Strahl für 4449 und 4449 A.

Bild 2.1 c

Das Bild 2.1 c stellt die Überlagerung des Bildes a und b dar.

Die ebenfalls vorhandene kissenförmige Verzeichnung von 6% bei einem Kreis von 1" Durchmesser auf der Kathode fällt nicht stark ins Gewicht. Im Folgenden wird stets die Auflösung auf die Kathode bezogen. Die Auflösung des Anoden-Bildes ist auf das Anoden-Bild bezogen, um den Verkleinerungsfaktor der Röhre, der ca. 0,7 beträgt, höher. Daraus ist ersichtlich, daß die Zentralauflösung der 4449 A von $25 \times \frac{1}{0,7} \approx 40 \text{ Lp/mm}$ schon durch die Leuchtschirmkörnigkeit begrenzt wird.

Bei der Röhre 4449 A mit gekrümmter Kathode braucht man zur kathodenseitigen Abbildung ein besonders korrigiertes optisches System, das im allgemeinen keine 25 Lp/mm auflöst, also die Schärfe begrenzt.

2. 2. Überschlägige dynamische Betriebsdaten

2. 21 Schaltverhältnis

Eine Größe, die unabhängig von der Güte der Impulsspannungen den Anwendungsbereich einengt, ist das Schaltverhältnis der Röhre. Auch im gesperrten Zustand der Röhre (d.h. U_{g1k} negativer als Cutoff-Spannung) scheint nämlich ein Bruchteil des Lichts, das

auf die Kathode auffällt, durch die ganze Röhre und durch den aluminiumhinterlegten Leuchtschirm durch. Ausserdem werden durch Feldemission bzw. durch auf dem Steuergitter spurenweise niedergeschlagenes Kathodenmaterial Elektronen emittiert, die den Leuchtschirm anregen. Dieser Bruchteil Licht beträgt bezogen auf die am Leuchtschirm durch die gewünschte Elektronenoptik-Abbildung (im geöffneten Zustand) erzeugte Helligkeit ungefähr 10^{-6} . Dieser Wert ist allerdings relativ gesehen gut. Z.B. beträgt die Größenordnung des Schaltverhältnisses (dies ist der Reziprokwert) bei mehrstufigen SEV-Röhren 10^5 .

Das endliche Schaltverhältnis grenzt die verwendbaren Öffnungszeiten ein. Dies zeigt das folgende Beispiel:

Der zu beobachtende selbstleuchtende Vorgang habe eine rechteckförmige Impuls-Lichtverteilung mit einer Dauer von 10^{-3} sec. Bei einer Öffnungszeit von 10^{-8} sec und einem Schaltverhältnis von 10^6 rührt dann schon 1/10 der Filmschwärzung vom Lichtanteil der gesperrten Zeitperiode her.

Bei stationärer Belichtung, z.B. beim Arbeiten mit Interferometern, kann man diesen Effekt durch zusätzlichen schnellen mechanischen Verschluss verringern.

2.22 Kathodeneinflüsse

Die erreichte Auflösung hängt natürlich von der Güte der verwendeten Impulsspannungen ab.

Die einzige Angabe dynamischer Natur, die von RCA im Datenblatt angegeben wird, ist der Wert des Spitzenkathodenstroms. Bei der Röhre 4449 A werden 20 mA angegeben, bei der 4449 waren es 100 mA, bei dem Versuchsmuster (73435 D (1959)) waren es 300 mA. Die Kathoden haben sich aber nicht geändert. Vielmehr sind die neuerdings verringerten Werte darauf zurückzuführen, daß im Zuge der Verbesserung der Meßverfahren

immer höhere Auflösungen gefordert und erreicht wurden. Dieser Wert gibt nämlich den Strom an, bei dem Verzerrungen (Bildzusammenziehung, Unschärfe) in der Röhre auftreten, und ist kein Grenzwert, dessen Überschreiten zur Kathodenzerstörung führt.

Bei fest vorgegebenen optischen Daten (Objektiv, Abbildungsmaßstab, Filmempfindlichkeit) auf der Leuchtschirmseite heißt dies ferner, daß eine bestimmte kürzeste Belichtungszeit von einigen 10^{-9} sec nicht unterschritten werden kann.

Dieser Übersteuerungseffekt macht sich aber auch schon bei mittleren Öffnungszeiten bemerkbar.

Wie die Diskussion der Ergebnisse in 7.2 zeigen wird, ist dies der wesentliche Unschärfe-Beitrag. Es werden nämlich auch im unabgelenkten Fall und mit weitgehend idealen Öffnungsimpulsen nur 5 Lp/mm (auf die Kathode bezogen) bei 10 nsec und 10 Lp/mm bei 50 nsec erzielt, also Werte, die weit unter der stationär möglichen Auflösung liegen.

2.3 Anforderungen an die Schaltungstechnik

Die zulässige Beschleunigungsspannung der Röhre ist 15kV Anode gegen Kathode. Die Spannung der Fokussierelektrode g_2 beträgt rund 1,5 kV gegen Kathode. Die Ablenkplatten müssen im Mittel gleiches Potential wie die Anode haben. Der Hub zum Öffnen oder Schliessen der Röhre muß ca. $300 V_{SS}$ (neuerdings $250 V_{SS}$ für die 4449 A) betragen.

2.31 Polung der Röhre gegenüber Erdpotential

Wie gesagt, müssen die Ablenkplatten gleichspannungsmäßig Anodenpotential haben, während das Steuergitterpotential in der Nähe des Kathodenpotentials liegt. Die Frage ist nun, ob man die Kathode oder die Anode auf Hochspannung gegenüber Erde legen will.

Geerdete Anode hätte manche Vorteile, da die Ablenk-

spannungen galvanisch angekoppelt werden können und der Leuchtschirm geerdet wäre. Allerdings müßte der Steuergitterimpuls kapazitiv angekoppelt werden.

Im Falle der geerdeten Kathode bringt die Ablenkplattenverschaltung Probleme mit sich. Dafür ist die Versorgung des Steuergitters einfacher.

Für eine Kamera mit Einschubtechnik und einem Öffnungszeiten-Bereich von 10 nsec bis 20 usec (größte Schmierbildzeit) ist die Erdung der Kathode vorzuziehen, da hier eine kapazitive Steuergitterkopplung Schwierigkeiten machen würde. Außerdem kann bei geerdeter Kathode leichter durch einen Begrenzungswiderstand im Anodenkreis eine Strombegrenzung erzeugt werden.

Da die Ablenkplatten gleichstrommäßig hochohmig versorgt werden können, ist es möglich, die Ablenkvorspannungen über hochliegende Versorgungen, die transformatorisch von der Erdseite gespeist werden, zu erzeugen.

Beim Bau einer Kamera für einen kleinen Zeitbereich wäre jedoch eine Schaltung mit geerdeter Anode vorzuziehen.

2.32 Die zulässigen Toleranzen der Betriebsspannungen

Wie in Bild 2.32 zusammengestellt ist, braucht die Bildwandler-Röhre für den Betrieb mit Ablenkung folgende Spannungen

1. U_a Anodenspannung
2. U_{g2} Fokussier-Spannung
3. U_{sperr} Steuergittervorspannung
4. $-U_{av1}$ und U_{av2} auf Anode bezogene Ablenkvorspannungen
5. U_{g1ss} Rechteckimpulse zum Öffnen der Röhren
6. $U_{abl.1}$ und $U_{abl.2}$ Ablenkspannungen für die beiden Ablenkelektroden

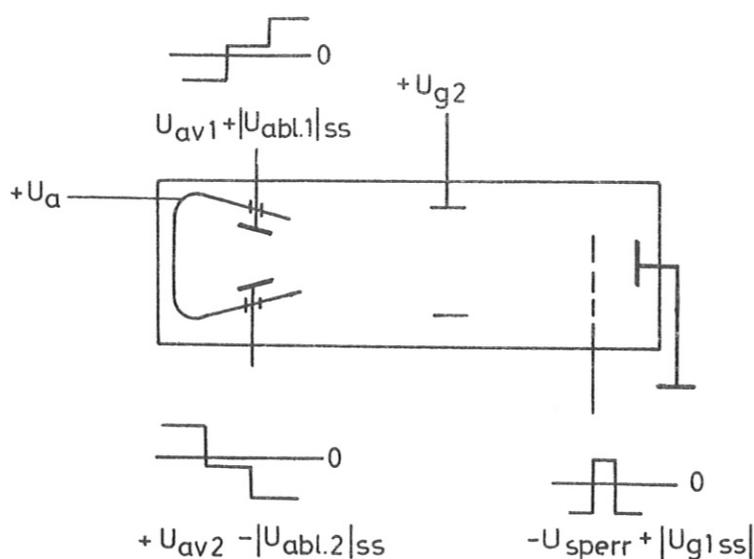


Bild 2.32

Durch Messung im stationären Falle wurde ermittelt, wie genau die an der Fokussierung beteiligten Spannungen U_a , U_{g2} und $(-U_{sperr} + |U_{s1ss}|) = \text{Steuergitterspannung}$ im geöffneten Zustand eingehalten werden müssen. Bei Konstanzhaltung zweier davon und Abweichung der dritten um 2% ist schon eine Schärfeverminderung erkennbar.

Die Symmetrie der Ablenkspannungen inklusive Ablenkvorspannungen braucht nicht sehr genau eingehalten zu werden. 10% Abweichung einer von beiden vom Mittelwert beider bringt noch keine merkliche Verschlechterung. Völlig unsymmetrische Ablenkung würde aber eine erhebliche Schärfe-Verminderung bei weit abgelenkten Bildern ergeben. Bei Schmierbild-Betrieb wäre dies tragbar. Dagegen würde hier die inkonstante Ablenkempfindlichkeit stören, welche bei unsymmetrischer Ablenkung auftritt.

Der Betrag der summierten Ablenkspannungen, der die Ablenkung in mm auf dem Leuchtschirm ergibt, sollte ebenfalls auf $\pm 10\%$ festgehalten sein. Selbstverständlich beinhalten diese Toleranzangaben etwaige Dachwelligkeiten oder Dachschrägen der Impulsspannungen, so daß hier sehr strenge Forderungen gestellt werden müssen.

Eine weitere Forderung ist, daß die Anstiegs- und Abfallzeiten der Öffnungsimpulse klein gegenüber den Öffnungszeiten selbst bleiben, damit diese Bereiche defokussierten Bildes schnell durchlaufen werden und keinen wesentlichen Helligkeitsbeitrag liefern.

Besonders strenge Forderungen werden an die Ablenkimpulse gestellt. Schon kleine überlagerte Welligkeiten oder Dachschrägen können die abgelenkten Bilder verwischen, d.h. Strichraster senkrecht zur Ablenkrichtung werden dann unscharf. Für einen bestimmten einfachen Fall ist dies im Anhang 9.1 durchgerechnet. Falls auf den Ablenkplatten-Spannungen Brummspannungen von 50 Hz überlagert sind, ist dies wegen des Zeitbereichs der Kamera von μsec wegen des langsamen Spannungsanstiegs $\frac{dU}{dt}$ weniger kritisch für den dynamischen Betrieb. Es würde aber beim Betrachten des stationären Bildes stören.

Auf Einzelheiten des Impulsbetriebes wird im Folgenden eingegangen.

3. Das gewählte Schaltungsprinzip für Dreibild- und für Schmierbildbetrieb

3.1 Allgemeines

Drei Aufnahmen hintereinander von einer Entladung sind wegen der vorgegebenen Dimensionen von Kathoden- und Anodenfläche der 4449A und in Bezug auf den elektronischen Aufwand ein sinnvoller Kompromiß. Man muß also impulsmäßig dreimal hintereinander die Röhre öffnen und bei jeder der drei Belichtungen das Bild auf eine andere Schirmstelle verschieben, und zwar ruckweise, so daß das Bild während der Belichtung jeweils zum Stillstand gekommen ist.

Beim Schmierbild-Betrieb wird dagegen das schlitzförmige Bild auf der Photokathode kontinuierlich über den Schirm abgelenkt und während dieser ganzen Zeit wird die Röhre auf Durchlaß gepolt.

Wegen der in 2.3 erwähnten Gründe sollte symmetrisch abgelenkt werden. Bei den von uns gebauten Bildwandlern EL070 wurde bei Schmierbild-Betrieb noch unsymmetrisch gearbeitet. Bei den neuesten Geräten nach EL085 wird auch bei Schmierbild-Betrieb symmetrisch abgelenkt. Es ist jedoch noch zu diskutieren, wie die Ablenkimpulse bzw. Ablenktreppen zweckmäßigerweise aussehen sollen.

Geht man davon aus, daß die 3 Bilder in ihrer zeitlichen Folge nebeneinander auf dem Leuchtschirm stehen sollen und das mittlere Bild im Zentrum, dann gibt es drei einfache Möglichkeiten für die Spannungsformen (Bild 3). Da von symmetrischem Betrieb ausgegangen wurde, sind bloß die Absolutspannungen einer Ablenkelektrode gezeichnet worden. Dabei sind die Öffnungszeitpunkte dick gezeichnet.

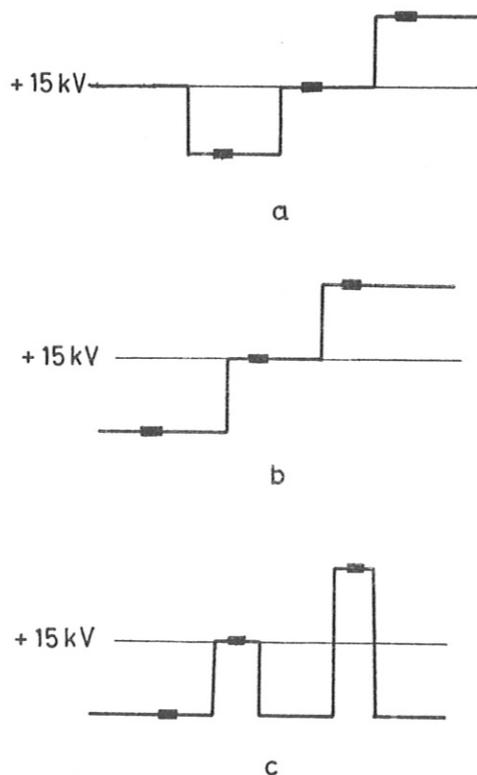


Bild 3.1

Methode a hat den Vorteil, daß keine Ablenkvorspannungen nötig sind. Allerdings ist die Schaltungstechnik für hier verwendete positive und negative Impulse kompliziert. Da auch das erste Bild vor Öffnung abgelenkt werden muß, sind die Verzögerungszeiten zwischen Kameraauslösung und erstem Bild relativ groß (ca. 200 nsec). Dieses Prinzip wurde bei unseren ersten Kameras nach EL045 verwendet (6).

Methode b braucht Ablenkvorspannungen, d.h. gleichspannungsmäßig um einige 100 V im ruhenden Zustand positivere bzw. negativere Ablenkelektroden als die auf + 15 kV liegende Anode. Dafür braucht aber das erste Bild nicht abgelenkt zu werden, was Triggerverzögerungen von nur ca. 50 nsec ergibt.

Ferner müssen nur restliche 2 Treppen erzeugt werden, und zwar nur rein positive (bzw. negative). Dies bringt schaltungstechnisch Vereinfachungen und wurde in den Kameras EL070 und EL085 angewendet. Die benötigten Ablenkvorspannungen lassen sich genügend niederohmig mit Hilfe kapazitätsarmer, hochfrequentgespeister Trenntrafos für 15 kV-Isolation und nachfolgenden Vervierfacher-Schaltungen realisieren.

Methode c, die bis jetzt von uns noch nicht angewandt wurde, hat die Vorteile von b.

Zusätzlich kann man hierbei die Impulse mit Kabelpulsern (siehe 4.2) erzeugen und braucht keine stets mit Induktivitäten behafteten Speicherkondensatoren. Allerdings ist dies nur bei einer Kamera möglich, bei der die Öffnungszeit kleiner als 100 nsec ist.

Da die Ablenkvorspannung in diesem Falle auch erdseitig variiert werden kann, werden auch hier Einbildbetrieb und wählbare Ablenkdistancen ermöglicht. Dies ist wünschenswert, weil man dann die Bildgröße und damit teilweise die gewünschte Auflösung beeinflussen kann und diese Daten extrem lichtstarken Kameras, bei denen ebenfalls wie beim Bildwandler zwischen Auflösung, Bildgröße und Lichtstärke ein Kompromiß geschlossen wird, anpassen kann.

3.2. Das Schaltungsprinzip der Dreibildeinschübe

Es werden 3 Rechteckimpulse für die 3 Öffnungszeiten benötigt. Dazu braucht man 6 Thyratrons, je 3 für die Anstiege, je 3 für die Abfallflanken. Die 3 Öffnungsrechtecke werden addiert.

Für die positive zweistufige Treppenspannung der Ablenkung braucht man 2 Thyratrons, für die negative Treppenspannung 2 weitere. Zwischen den einzelnen Stufen müssen gegebenenfalls Trennstufen eingeschaltet werden und in vielen Fällen Verzögerungsglieder, die den richtigen zeitlichen Impulsablauf sicherstellen.

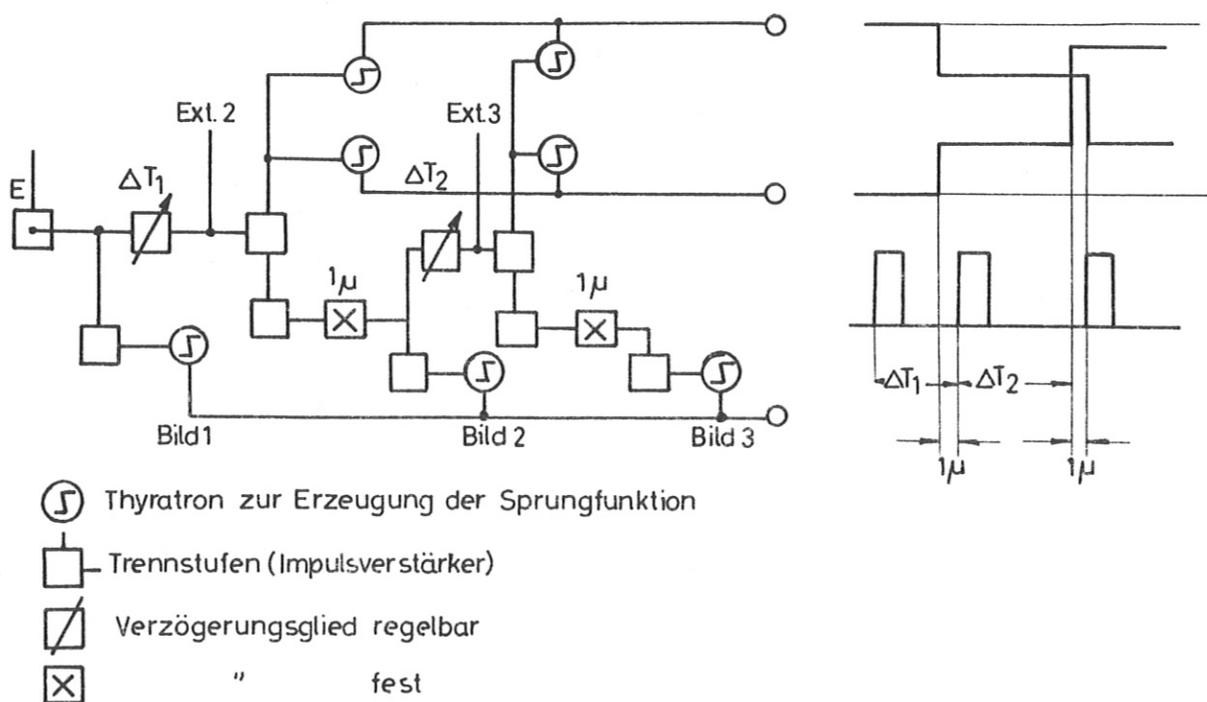


Bild 3.2

Bild 3.2 zeigt das Blockschaltbild eines Dreibildeinschubs für usec-Zeiten.

Die Ansteuer-Impulse für das 2. und 3. Bild sind 1 usec gegenüber den Anstiegen der jeweiligen Ablenkstufen verzögert, da nach dieser Verzögerung

der Einschwingvorgang des Anstiegs vorüber ist. Durch diese bei Änderung des zeitlichen Bildabstandes (über ΔT 1-2 bzw. ΔT 2-3) konstant bleibende Verzögerung zwischen Treppenanstieg und Öffnungszeit wird erreicht, daß eine Kompensation des Ablenktreppensprungs auf exakt waagerechtes Dach für den ganzen Bildabstandsbereich des Einschubs gleichbleiben kann. Da man bei dem Zeitbereich des usec-Einschubs Zündverzögerungen der Thyratrons vernachlässigen kann, betragen also die minimalen Bildabstände ca. 1 usec.

3.3 Schaltungsprinzip des Schmierbildeinschubs

Bild 3.3 zeigt ein Blockschaltbild des Schmierbildeinschubs.

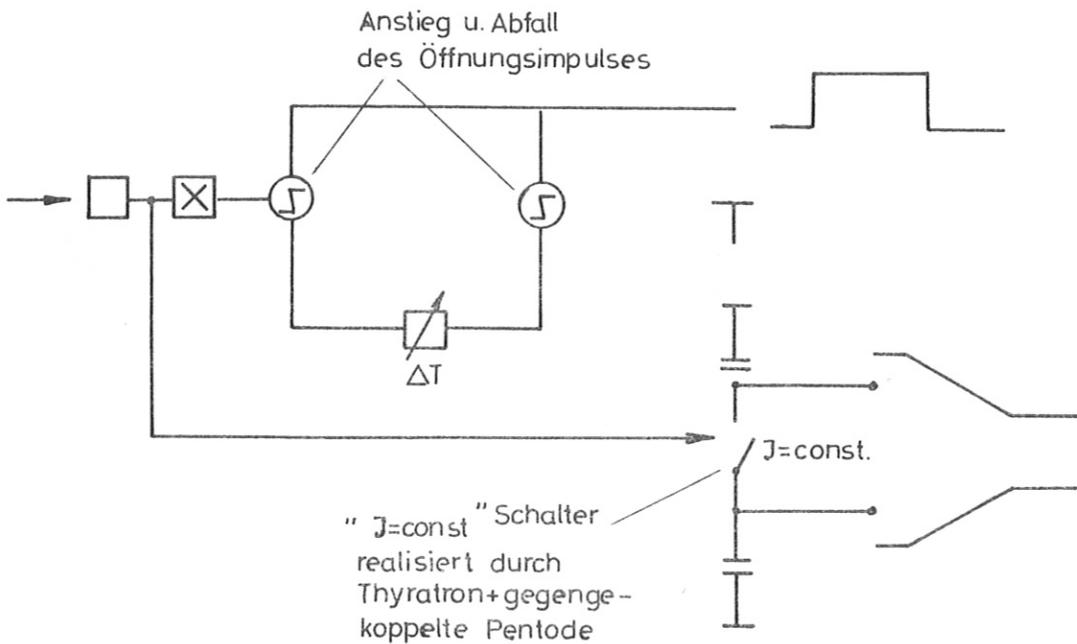


Bild 3.3

RCA-4449A

IMAGE-CONVERTER TUBE

High Resolution
Electrostatic Focus
Electrostatic Deflection

For High-Speed Photographic
Shutter Service

9.93" Max. Length
4.04" Max. Diameter

Initial Data

RCA-4449A is an electrostatic-focus, electrostatic-deflection type of image-converter tube designed specifically for use as a high-speed light shutter in applications requiring the photography of extremely fast events. It has a resolving capability referred to photocathode of better than 25 line-pairs per millimeter and is capable of providing exposure times as short as 10^{-8} second without significant loss in resolution.



The 4449A utilizes a spherical photocathode having high electrical conductivity and can provide large peak cathode currents without undesirable defocusing effects. The spherical photocathode window minimizes curvature

of the image field and pin-cushion distortion. The minimum useful diameter of the photocathode is 1.37 inches. The spectral response of the 4449A covers the range from about 3000 to 6500 angstroms. Maximum response occurs in the blue region of the visible spectrum.

The 4449A is also provided with a fine-grain, aluminized P11 phosphor screen which emits high-intensity actinic blue fluorescence and has medium-short persistence. The minimum useful diameter of the phosphor screen is 2.8 inches.

Other features of the 4449A include a maximum anode voltage rating of 15 kilovolts, a deflection factor of 1050 to 1250 volts per inch, a peak-to-peak gating (control-grid) voltage requirement of only 200 to 260 volts.

DATA

General:

Spectral Response S-11
Wavelength of Maximum Response. 4400 ± 500 angstroms
Photocathode, Semitransparent:
Shape Spherical, Circular
Window:
Area 9.52 sq. cm (1.48 sq. in.)
Minimum diameter. 3.48 cm (1.37 in.)
Index of refraction 1.48
Fluorescent Screen:
Shape Flat, Circular
Phosphor. P11, Aluminized
Fluorescence. Blue
Phosphorescence Blue
Persistence Medium Short

Window:

Useful deflection area (Approx.). 18 sq. cm (2.8 sq. in.)
Minimum diameter. 7.1 cm (2.8 in.)
Index of refraction 1.48

Direct Interelectrode Capacitances (Approx.):

Grid No. 1 to all other electrodes 20 pf
Deflecting electrode DJ1 to deflecting electrode DJ2. 1 pf
Deflecting electrode DJ1 to all other electrodes. 6 pf
Deflecting electrode DJ2 to all other electrodes. 6 pf
Focusing Method Electrostatic
Deflection Method Electrostatic
Overall Length. $9.87'' \pm 0.06''$
Diameter. $3.97'' \pm 0.07''$
Terminals See *Dimensional Outline*
Operating Position. Any
Weight (Approx.). 28 oz

Maximum Ratings, Absolute-Maximum Values:^a

DC Anode Voltage^b 15000 max. volts
DC Grid-No. 2 Voltage^b 2200 max. volts
Grid-No. 1 Voltage^b 190 max. volts
Deflecting Electrode Voltage:
DJ1 and DJ2^c ± 1500 max. volts
Peak Photocathode Current^d 0.02 max. ampere
Photocathode Current Density:
Peak^d 0.002 max. amp/cm²
Average^e 0.1 max. $\mu\text{a}/\text{cm}^2$

Typical Operating Values:

Anode Voltage^b 15000 volts
Grid-No. 2 Voltage^{b,f} 1500 to 1900 volts
Grid-No. 1 Voltage^b
Operating (Minimum)^f 110 to 170 volts
Cut off (Maximum) -90 volts
Deflection Factor 1050 to 1250 volts/in.



4449A

Characteristics:

With conditions shown under Typical Operating Values and at an ambient temperature of 25° C

	Min.	Typical	Max.	
Photocathode Sensitivity:				
Radiant, at 4400 angstroms	-	0.04	-	amp/watt
Luminous, at 0 cps ^g	2x10 ⁻⁵	5x10 ⁻⁵	-	amp/lumen
Paraxial Image Magnification (Cmx)h ^j	0.69	-	0.78	
Distortionhk	-	-	0.03	
Paraxial Resolutionbm	25	-	-	line-pairs/mm
Edge Resolutionbmn	15	-	-	line-pairs/mm
Radiant Power Gain ^p	50	-	-	
Equivalent Background Screen Brightness Input ^q	-	-	5 x 10 ⁻¹²	watts/sq.cm
Screen Uniformity Factor ^r	-	-	1.3	
Alignment	-	-	(s)	

a The maximum ratings in the tabulated data are established in accordance with the following definition of the Absolute-Maximum Rating System for rating electron devices.

Absolute-Maximum ratings are limiting values of operating and environmental conditions applicable to any electron device of a specified type as defined by its published data, and should not be exceeded under the worst probable conditions.

The device manufacturer chooses these values to provide acceptable serviceability of the device, taking no responsibility for equipment variations, environment variations, and the effects of changes in operating conditions due to variations in device characteristics.

The equipment manufacturer should design so that initially and throughout life no Absolute-Maximum value for the intended service is exceeded with any device under the worst probable operating conditions with respect to supply-voltage variation, equipment component variation, equipment control adjustment, load variation, signal variation, environmental conditions, and variations in device characteristics.

b Referred to photocathode.

c Referred to anode.

d Over an interval not exceeding 1 microsecond.

e Averaged over any interval of 8 minutes maximum.

f Adjusted to minimize shadowing effects in the displayed image caused by the wires of grid No.1.

g For conditions where the light source is a tungsten-filament lamp having a lime glass envelope (Corning Glass Code No.0080, or equivalent). The lamp is operated at a color temperature of 2870° K. A light input of 0.01 lumen is used to irradiate a centered 1/2-inch diameter of the photocathode.

h Defined as the ratio of the separation of two diametrically opposite image points on the screen to the separation of the corresponding image points on the photocathode.

j Determined as follows: The image incident on the photocathode is perpendicular to the grid-No.1 wires and consists of 2 parallel lines on a bright background approximately 0.16" in length and separated by a distance of 0.160" ± 0.002". The image on the

photocathode is focused and positioned so that the separation between the image lines is an equal distance on both sides of the geometric center of the photocathode. The line spacing on the screen is measured adjacent to the faint image of the center grid-No.1 wire.

k A second magnification value (Emx) is measured under the conditions established in (j) except that the lines are separated by a distance of 1.00" ± 0.01". Distortion (D) is defined by the equation:

$$D = \frac{Emx}{Cmx} - 1$$

m Determined with a resolution pattern consisting of horizontal and vertical bars. The limiting resolution value is measured adjacent to the faint image of the center grid-No.1 wire and applies to both vertical and horizontal resolution.

n Measured at the edge of a 1-inch diameter circle positioned concentric with the geometric center of the photocathode under the same conditions established in (m).

p Under the following conditions: Light incident on the photocathode is transmitted through a blue filter (Corning C. S. No.5-58 filter from Melt No.511² polished to 1/2 stock thickness — Manufactured by the Corning Glass Works, Corning, New York) from a tungsten-filament lamp having a lime glass envelope. The lamp is operated at a color temperature of 2870° K. A 1/2-inch diameter of the photocathode is irradiated and the value of light flux incident on the filter is 0.1 lumen. A calibrated receiver having S-11 spectral response and masked to have a 1/2-inch-diameter aperture is positioned 12 inches from the screen of the 4449A. The output current (I₁) of the receiver is noted. The same receiver is then positioned to receive the radiant flux originally incident on the photocathode and its output current (I₂) is noted. Radiant power gain (G) is defined by the equation:

$$G = 2000 \times \frac{I_1}{I_2}$$

The coefficient 2000 is derived by assuming that the integrated light radiated by the screen is 79 per cent of that value that would be obtained if the light emitted by the screen has a cosine distribution.

q Defined as that value of incident radiation required to cause an increase in screen brightness equal to the screen background brightness.

r The ratio of the luminance values of the brightest area to the darkest area of the screen with the entire photocathode uniformly illuminated. The value of incident illumination on the photocathode is 1 foot-candle and the light spot on the screen has a diameter of 0.10" ± 0.01".

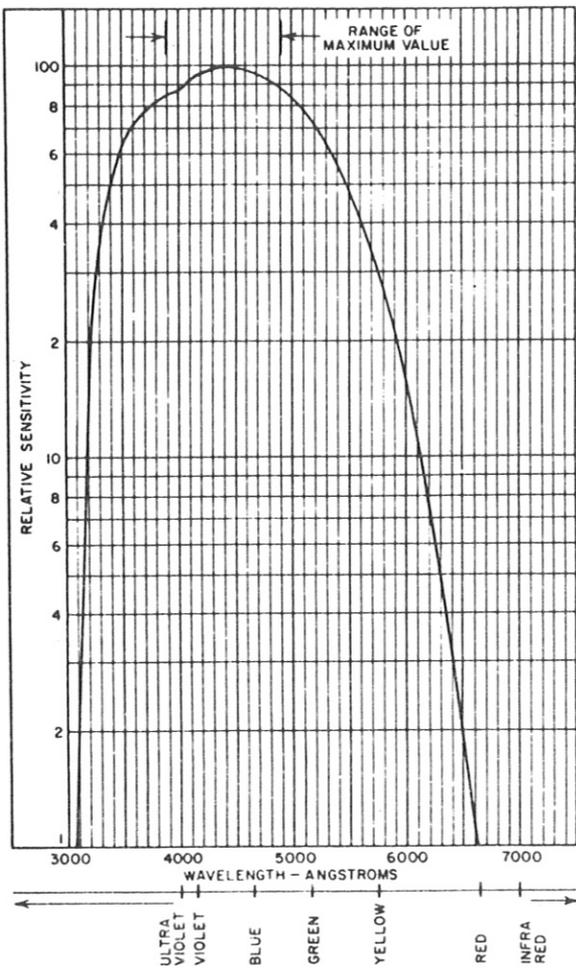
s A trace produced on the screen, when the center of the photocathode is irradiated with a 0.025-inch diameter light spot and an ac voltage is applied to the deflecting electrodes, will not deviate more than 4° from the plane passing through the center of the recessed ball cap of grid No.1 and the major axis of the tube. The angle produced by the trace and the faint images of the grid wires, that are observed when the photocathode is uniformly illuminated, will be 90° ± 3°.

GENERAL CONSIDERATIONS

An image to be viewed is focused by means of an objective lens on the semitransparent photocathode, as shown in Fig.1. Grid No.1, grid No.2, and the anode comprise an electrostatic converging lens which produces on the phosphor screen an electron image of the photocathode illumination

4449A

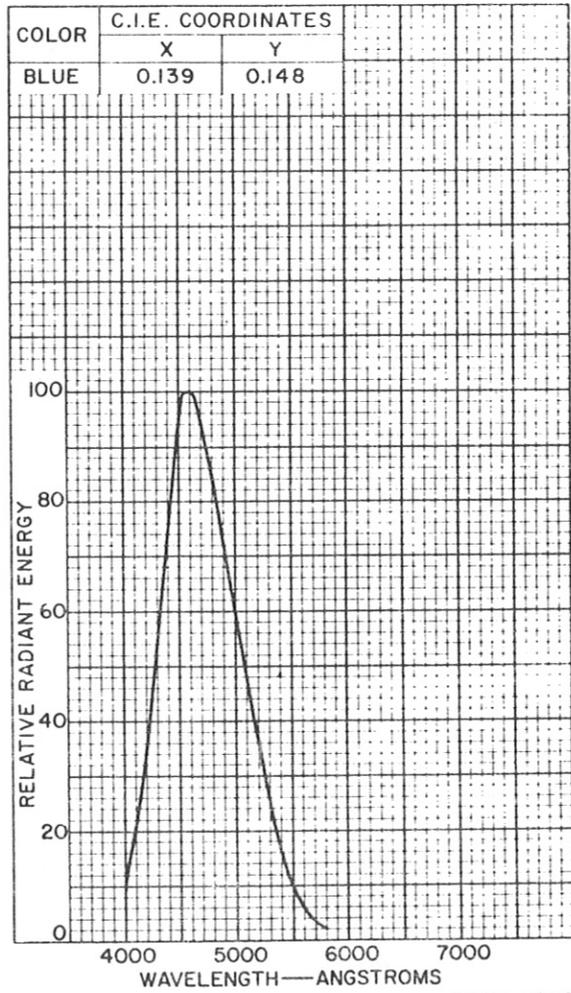
SEMI-LOGARITHMIC PRESENTATION OF S-11 RESPONSE



92CM-10662

Fig.2

SPECTRAL-ENERGY EMISSION CHARACTERISTIC OF PHOSPHOR No. 11



92CM-11268

Fig.3

Der Öffnungsrechteckimpuls wird mit 2 Thyratrons erzeugt, die nacheinander gezündet werden. Kurz vor dem Zündimpuls der Öffnungsimpuls-Stufe wird über einen Trenntrafo eine Pentode aufgetastet. Wegen einer Gegenkopplung über Kathodenwiderstand werden die an Anoden- und an Kathodenseite der Pentode liegenden aufgeladenen Kapazitäten mit konstantem Strom entladen, so daß an diesen Schaltungspunkten Sägezahnspannungen entstehen.

4. Schaltungstechnik mit Thyratrons und Verzögerungselementen

Bei sehr kleinen Wiederholfräquenzen oder einmaligen Impulsen ("single shot", "monopulse" - Betrieb) sind für die Erzeugung leistungsstarker Impulse sehr gut Thyratrons brauchbar. Sie bieten nämlich, im Vergleich zu Elektronenröhren den Vorteil, bei gleicher Größe und Heizleistung eine sehr viel größere Impulsleistung abgeben zu können. Aufgrund der hohen zulässigen Spitzenströme von z.B. 10A für die Typen 2D21, PL21, GE502A, 5727 ist in vielen Fällen die Anstiegszeit der erzeugten Impulse mehr durch die Aufbauzeit der Gasentladung als durch RC-Zeitkonstanten gegeben. Vorteilhaft ist auch das Schaltverhalten, das ähnlich wie bei Sekundäremissionsröhren positive Ausgangsimpulse im Arbeitsstrom-Betrieb ermöglicht.

4.1. Schaltungen für Sprungfunktionen

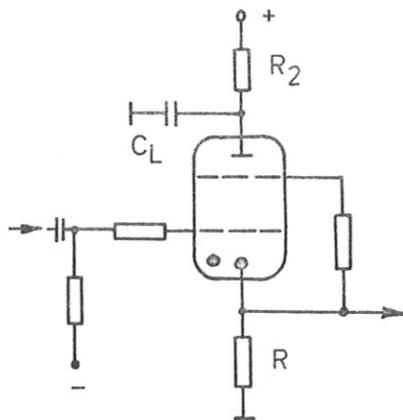


Bild 4.1 a

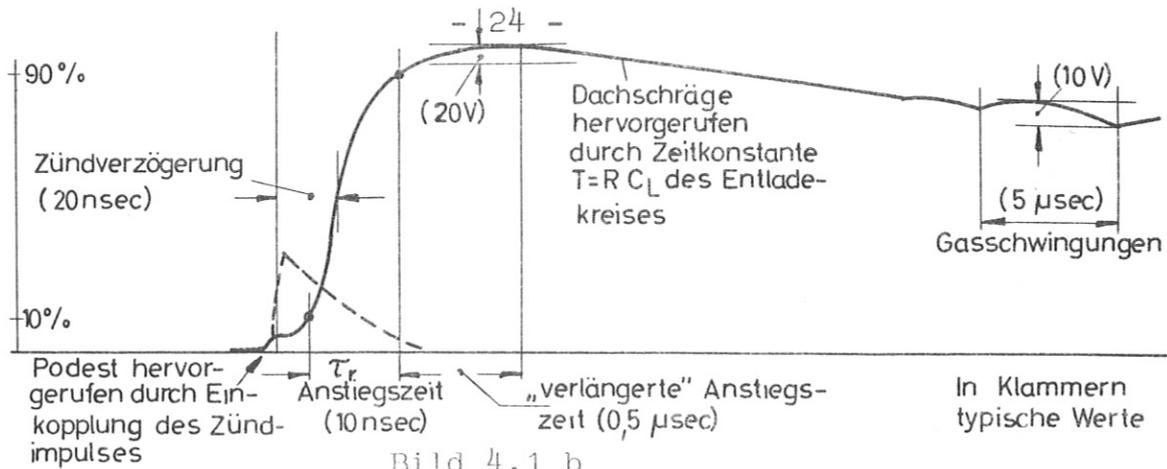


Bild 4.1 b

Bild 4.1a,b zeigt eine Grundschialtung zusammen mit Ein- und Ausgangsimpulsen. Die Zündverzögerung und die Anstiegszeit des Ausgangsimpulses hängen von der Höhe der positiven Anodenspannung und dem positiven Zündimpuls ab. Da während des Zündens ein hoher Gitterstrom fließt, erfolgt die Zündung nicht leistungslos. Die wirksame Zündspannung ist dann vom Generator-Innenwiderstand der Eingangs-Impuls-Quelle abhängig. Mit einigen Hundert Volt Überspannung relativ zur minimalen Zündspannung und einer Anodenspannung, die gerade noch nicht zum Selbstzünden führt, erreicht man Zündverzögerungen unter 20 nsec und Anstiegszeiten bis zu 3 nsec herunter. Die zeitliche Schwankung des Zündmoments ("Jitter") liegt dann - konstantgehaltene Versorgungsspannungen vorausgesetzt - auch bei einigen nsec, ist also vernachlässigbar.

Nach unseren Erfahrungen liegt bei Spitzenströmen von 10 A und einer geschalteten Energie im Bereich von mWsec die Lebensdauer noch bei 10^6 Entladungen.

Wegen der geringen Bogenspannung der Klein-Edelgas-Thyratrons von 8 - 25 V je nach Strom, bekommt man Impulse annähernd von der Größe der Ladespannung. Die Ausgangsimpulse haben die typische Form von Bild 4.1 b, d.h. sie kommen bei Impulshöhen von 500 V und Impulslängen von einigen usec idealen Sprungfunktionen sehr nahe. Bei kürzeren Impulsen muß man im Gebiet der "verlängerten Anstiegszeit" durch Kompensation mit passiven Bauelementen eine Dacheinebnung zu erreichen suchen. Bei sehr kurzen Impulsen setzt dann die Anstiegszeit eine

Grenze.

Aber nur bei mittleren und großen Impulslängen könnte man, allerdings mit erheblich größerem Aufwand, mit Elektronenröhren gleiche oder bessere Ergebnisse als mit Thyratrons erzielen.

In Bezug auf die bei einigen 10 usec störenden Gas-schwingungen sei erwähnt, daß diese durch Schaltungsmaßnahmen nur wenig beeinflusbar sind. Man kann kleine Verbesserungen erreichen durch hohe Impedanz des Schirmgitterkreises und dadurch, daß im Moment des Ausgangsimpulses die Augenblickswerte des U_{g2k} - Potentials möglichst negativ ist.

4.11 Kompensationsschaltung zur Dachebnung

Die im Bild 4.1 b gezeigte Dachverschleifung ist stromabhängig und ist zu einem kleinen Teil die Folge von induktiven Komponenten im Speicherkondensator. Deshalb lohnt es sich nicht, die Kompensationsschaltung exakt durchzurechnen. Es genügt, wenn man sich anhand einer Näherungsrechnung einen Überblick verschafft. Die genaue Größe der Widerstände und Kondensatoren muß man doch experimentell bestimmen.

Bild 4.11 a zeigt ein Ersatzschaltbild für die im Bildwandler nach ELO70E⁴ verwendete Dachkompensation.

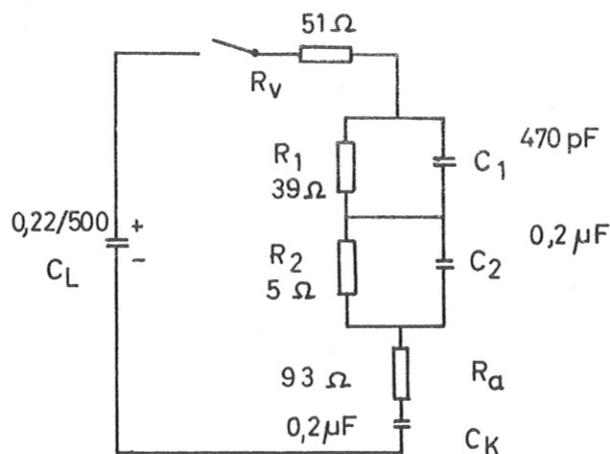


Bild 4.11 a

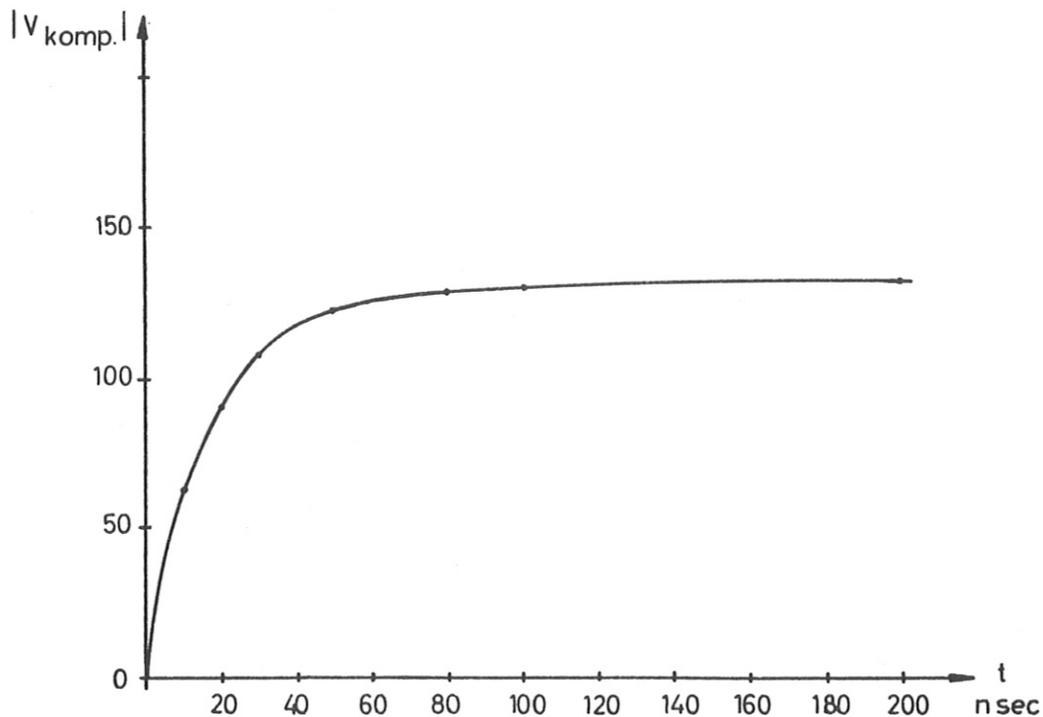


Bild 4.11 b

Näherungsweise ist es zulässig, die Dachanhebung im Bereich der ersten 100 nsec und die Dachschrägenkompensation getrennt zu betrachten.

1. Impulshöhe, Dachschräge

Nach Abklingen der Einschwingvorgänge von R_1, C_1 und R_2, C_2 entsteht an R_a ein Ausgangsimpuls von 500 V

$\frac{.93}{188} = 250 V_{SS}$. Ohne C_k hätte dieser Impuls eine Zeitkonstante von $C_L \Sigma R = 0,22 \mu F \times 188 \Omega = 41,5 \text{ usec}$. Bei einer Dachlänge von 1 usec wäre also ein Abfall von ca. 2,5 % vorhanden.

Wie man sich leicht überzeugen kann, wird mit Hilfe von C_k aber im Falle $C_L (R_v + R_1 + R_2) = C_k R_a$ die Dachschräge gleich Null (dualer Fall zu einem kompensierten Oszillografen-Tastteiler).

2. Für den Impulsanfang sind die RC-Glieder R_1, C_1 und R_2, C_2 wirksam. Näherungsweise kann man wegen $R_a + R_v$ groß gegen $R_1 + R_2$ so rechnen, wie wenn diese RC-Glieder mit eingepprägtem Strom gespeist würden. Sie liefern

dann einen Spannungsanteil

$$-J = [R_1(1-e^{-t/\tau_1}) + R_2(1-e^{-t/\tau_2})] \quad \text{mit} \quad \begin{matrix} \tau = R_1 C_1 \\ \tau = R_2 C_2 \end{matrix}$$

Dieser Spannungsanteil ist im Bild 4.11 b für $J \approx 3A$ als $f(t)$ dargestellt.

Wie man sieht, liefert während der ersten 100 nsec die Kompensationsschaltung einen beträchtlichen Spannungsanteil oder anders gesagt, ohne Kompensation würde man bei Öffnungszeiten von 100 nsec und 50 nsec keine exakten Rechteckimpulse erhalten. Ähnliche Kompensationsmaßnahmen zur Dachanhebung bzw. Dachschrägenkompensation werden auch in den Schaltungsteilen für die Treppenspannungen verwendet.

Die Ablenktreppen werden je durch 2 überlagerte Sprungfunktionen erzeugt, d.h. also durch je ein Paar von Thyratrons, die zeitlich verschoben gezündet werden.

Die Treppenspannungen müssen maximal 400 V pro Stufe betragen, dann wird die maximale Ablenkung von $16 + 16$ mm entsprechend total ca. $1600 V_{SS}$ bei der Ablenkempfindlichkeit der BW-Röhre von ca. 50 V/mm. Bei den Stufen für die positive Treppe werden die beiden Sprungfunktionen an der Kathode der 1. Röhre über einen Spannungsteiler von der 2. Röhre her addiert, um zu verhindern, daß durch die erste Treppe die Kathode der 2. Röhre stark positiv wird.

Die Kompensation auf waagerechtes Dach während der Öffnungszeiten muß sehr sorgfältig durchgeführt werden, und zwar so genau wie es der vorhandene Oszillograf es zuläßt.

4.2 Zeitverzögerungen

Um den im Blockschaltbild, Bild 3.2, gezeigten zeitlichen Ablauf der Impulsfolge zu erhalten, braucht man im allgemeinen passive Bauelemente (für Verzögerungen um einige 10 nsec genügt allerdings die Zündverzögerung der Thyratrons). Dafür benötigt man

1. Diskriminatoren, die bei Erreichung einer bestimmten Spannung schalten. Thyratrons sind dafür geeignet, aber der Zündeinsatz bzw. die Zündschwelle schwankt ("Jitter") auch bei Festhaltung aller elektrischen Betriebsbedingungen; am wenigsten bei Edelgas-Thyratrons, die von der Umgebungs-Temperatur unabhängig sind und nur Strahlungseinflüssen (Licht, kosmische Strahlung) unterliegen.

2. Ebenso braucht man passive Bauelemente, die eine Sprungfunktion in einem langsam oder verzögert ansteigenden Spannungsverlauf umformen. Die einfachsten Elemente sind RC-Glieder, die aber im Zusammenhang mit Thyratrons bei höheren Ansprüchen nicht gut genug sind. Je mehr Scheinwiderstände benutzt werden, desto besser ist das Verhältnis Halbwertsverzögerungszeit zu Anstiegszeit.

Für Genauigkeiten im 1%-Bereich reichen 2 bis 6 Bauelemente.

Beispielsweise werden 1 Induktivität und 2 Kapazitäten, also 3 Impedanzen, in den Zeitverzögerungsgeräten des IPP verwendet. Für Verzögerungszeiten im 100-nsec-Bereich kann man bequem Laufzeitkabel einsetzen.

4.3 Pulser

Werden Rechteckimpulse benötigt, sind 2 Schaltungsarten mit Thyratrons möglich.

4.31 2-Röhrenpulser (5,6)

Das erste Thyratron erzeugt den Anstiegssprung, ein zweites erzeugt den Abfallsprung, die Rückflanke. Das kann dadurch erreicht werden, daß das 2. Thyratron dem 1. die Anodenspannung abschaltet, oder daß das 2. Thyratron die am Kathodenwiderstand der 1. entstehenden Ausgangsspannung kurzschließt (letzteres ist nur bei Einbildimpulsen zulässig). In jedem Fall muß das 2. Thyratron einen viel höheren Strom als das erste schalten.

Kabelpulser

Die Rückflanke kann auch durch Reflexion der Vorderflanke am offenen Ende eines Laufzeitkabels erzeugt werden. Man hat dann folgende Eigenschaften: Es wird nur 1 Thyatron benötigt. Man erzielt halbe Ladespannung.

Der Anstieg ist nur durch den maximalen Anodenstrom begrenzt und nicht durch Eigenschaften des Speicherkondensators. Bei kurzen Zeiten unter 100 nsec kann man niederohmige homogene Koaxialkabel verwenden und erhält einen praktisch dem Anstieg gleichkommenden Abfall und ein sehr sauberes Impulsdach mit dieser wenig aufwendigen Schaltung. Bei längeren Impulsen, wo man den Laufzeitkabel durch Wendelleisten oder Laufzeitketten darstellen müßte, ist die erste Schaltung zweckmäßiger.

Zur Erzielung der Folge der 3 Öffnungsimpulse muß man in beiden Fällen 3 Einzelaggregate (3 bzw. 6 Thyatrons) verwenden, die nacheinander auf eine gemeinsame Last geschaltet werden.

5. Netzgerät

1. Allgemeines

Wegen der Verwendung von Thyatrons brauchen die benötigten Mittel- und Hochspannungsnetzgeräte nur geringe Ströme liefern. Die benötigte Ladezeit ist nämlich durch den zulässigen Ladestrom-Löschstrom der Thyatrons bedingt, der zusammen mit den Speicherkondensatoren auf Bereitschaftszeiten im Bereich von 10 sec führt. Dies stört nicht, da die Ladezeiten der Plasmaerzeugungsbatterien und die nötige Zeit zum Filmtransport größer sind.

Die benötigte Konstanz und Genauigkeit des Netzgerätes ergibt sich aus den Ausführungen in 2.32. zu 0,5%, damit ein totaler relativer Fehler 1% nicht übersteigt. Dies sind erträgliche Forderungen, die von Stabilisator-Schaltungen und geregelten HS-Netz-

Geräten erfüllt werden.

Die Heizwechselspannungen sollen auch stabilisiert sein, weil ein Unterheizen bei Thyratrons verlängerte Anstiegs- und Zündvorgangs-Zeiten und kürzere Lebensdauer zur Folge hat.

Die Heiz-, Mittel- und Hochspannungen sollen getrennt einschaltbar sein und außerdem so verriegelt, daß erst einige 10 sec nach Anschaltung der Heizung die Mittelspannungen kommen, damit die Thyratrons nicht ungeheizt Anodenspannung bekommen, was die Kathoden schädigt. Die Hochspannung verzögert man noch weiter. Bei Wiedereinschaltung sollte die Einschaltverzögerung kleiner sein, entsprechend der Abkühlzeitkonstante der Thyratrons.

2. Versorgung der Bildwandler-Elektroden

Anode und Ablenkelektroden

Die Anode braucht +15 kV, die Ablenkelektroden brauchen symmetrisch darum gruppierte Spannungen +15 kV \pm ca. 0 bis 750 V stufenweise einstellbar. Wie schon in 2.31 erörtert wurde, ist ein wichtiger Dimensionierungsgesichtspunkt die Strombegrenzung des BW-Röhrenstroms, da eine Überbelichtung der Kathoden im normalen Experimentierbetrieb nie ausgeschlossen werden kann und die BW-Röhre das teuerste Bauelement der Kamera ist.

Deshalb muß der Ladewiderstand der BW-Röhre im Bereich 30 - 300 M Ω liegen und die Ablenkvorspannungen, die aus Stabilitätsgründen aus dem gleichen HS-Netzgerät bezogen werden, müssen auch sehr hochohmig gegen Erde zugeführt werden. Bei auf 15 kV hochliegenden Schaltungspunkten ist nun immer ein gewisser, schwankender Ableitwiderstand im G Ω Bereich auf Grund von Kriechströmen und Sprühercheinungen vorhanden. Da aber die Ablenkplattendifferenzspannung auf einige 10 V auch im stationären Betrieb konstant sein muß, kann man sie schlecht aus einem dem Ladestrom der Anode führenden Spannungsteiler

gewinnen, sondern braucht eine sehr viel niederohmigere Spannungsquelle. Deshalb ist es zweckmäßig, über einen die 15 kV trennenden Isoliertrafo und nachfolgende Gleichrichtung (Spannungsvervierfachung) diese Ablenkvorspannungen der 15 kV-Anodenspannung aufzustocken. Diesen Trafo kann man kapazitätsarm und mit genügender Leistung herstellen, wenn man Hochfrequenz benützt. Dabei erzeugt eine Transistorzerhackerschaltung eine Frequenz von ca. 200 kHz mit einer von der Betriebs-Gleichspannung abhängigen Amplitude. Auf diese Weise gewinnt man auch den Vorteil, die Ablenkvorspannungen niederspannungsseitig ändern zu können.

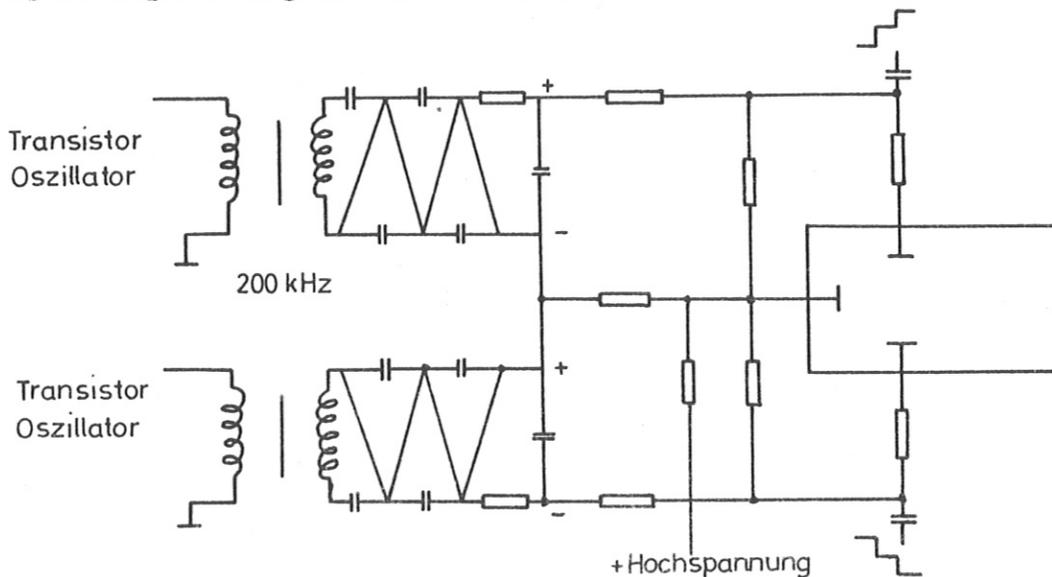


Bild 5.2
Ablenkplattenverschaltung

Für die Erzeugung der 15 kV Hochspannung wurde ein Gerät der Firma Brandenburg verwendet. Da das Gerät überhaupt nicht temperaturstabilisiert war, wurde die benötigte Konstanz von $\pm 0,5\%$ erst mit Hilfe einer ausgeklügelten Temperaturkompensation erhalten. Umentwicklung wurde von Herrn Dipl.-Ing. Urbas durchgeführt.

Den Netzteileinschub für die Mittelspannungen von + 3 kV, + 1,5 kV, + 1,2 kV und + 800 V hat Herr Reinhardt entwickelt.

Das ganze Netzteil besteht aus 4 Einschüben, die in einem fahrbaren Rack untergebracht sind, das auch die

jeweils nicht benötigten übrigen 2 Einschübe aufnimmt. Die Konstruktion dieses Racks wurde im wesentlichen von der Gruppe Konstruktion übernommen.

6. Konstruktion der Kamera

Zweckmäßigerweise macht man die eigentliche BW-Kamera räumlich klein, damit sie nicht am Experiment im Weg umgeht und leicht schwenkbar ist. Jedoch kann man nur das Netzgerät, aber nicht die Impulserzeugung vor der Kamera trennen, weil man anderenfalls alle Impulsspannungen sehr niederohmig mit Kabeln zuführen müßte und auch Einstreuungen in die Zuleitungen bei Experimenten mit starken Störfeldern befürchten müßte.

Am besten sieht man einen alle Gleichspannungen enthaltenden Rahmen und leicht auswechselbare Einschübe für die Impulserzeugung vor, dann gewinnt man folgende Vorteile:

1. Für die verschiedenen Zeitbereiche bzw. Sweepbetriebe hat man jeweils einen Einschub, der zwar nur einen kleinen Zeitbereich überstreicht, aber in diesem Bereich die bestmögliche Schaltungstechnik ohne Raumsorgen aufweist. Dann wird die Kamera mit Dreibild- und Schmierbild-Betrieb zur Universalkamera.

2. Man kann Einschübe auf Vorrat halten und damit eine Reparatur der Kamera durch Ersatz des Einschubs schnell erledigen. Selten benutzte Einschübe brauchen nur in einem Exemplar für mehrere Rahmen vorhanden sein.

3. Mit großer Wahrscheinlichkeit braucht bei neu auftretenden Wünschen nur ein neuer Einschub entwickelt und gebaut zu werden.

Bei der Detailkonstruktion muß für das Herz der Kamera, die BW-Röhre, eine geeignete, präzise, federnde Haltung gefunden werden, die auch alle Ansprüche in Bezug auf HS-Isolation, magnetische und elektrische Abschirmung und Zuführung der Betriebsspannungen, erfüllt und die Röhrenmontage nicht zu kompliziert macht. Am Rahmen selbst, der die Röhrenhalterung enthält, werden im allgemeinen die Front- und Kamera-Objektive angeflanscht.

Deshalb ist eine sehr präzise Ausführung, wie bei optischen Geräten, wichtig. Gleichzeitig soll aber auch die Möglichkeit vorhanden sein, sehr große Spezialoptiken zu verwenden. Deshalb müssen Kathode und Anode der BW-Röhre offen zugänglich sein, gleichzeitig aber der Rahmen so fest sein, daß mittelschwere Objektive noch am Rahmen selbst befestigt werden können. Zwischen Rahmen und Einschub bestehen sehr viele Steckverbindungen. Deshalb braucht man einen speziellen Mechanismus, der den Einschub ausklingt bzw. hereinzieht, ohne daß Verkanten möglich ist. Es wird hier stets vom Einschub gesprochen, weil dies das gebräuchlichste Wort ist. In Bezug auf die wirkliche räumliche Lage ist es aber ein Aufsatz.

7. Technische Daten der Kamera mit Einschüben und Auflösungsresultate

7.1 Technische Daten

7.11 Triggerung

Die Triggerung, d.h. elektrische Auslösung der drei Einschübe EL085E7, E8 und E9 und auch der Vorläuferkammeras EL070 ist gleich und soll deshalb gemeinsam beschrieben werden.

Die ersten Thyatron-Stufen aller Einschübe sind steuergitterseitig mit -90 V vorgespannt. Zur Auslösung ist deshalb ein positiver Impuls von mindestens 100 V_{SS} nötig, der am hochohmigen Eingang von ca. $50\text{ k} // 40\text{pF}$ erzeugt werden muß. Die Auslöseverzögerung bis zum 1. Öffnungsimpuls bzw. zum Loslaufen des Schmierbilds ist von der Höhe der Überspannung gegenüber den gerade zur Zündung benötigten 100 V_{SS} abhängig. Außerdem fließt bei Thyratrons während des Zündvorgangs Gitterstrom, der nur durch einen etwa 1 k betragenden Gitterwiderstand begrenzt wird.

Brauchbare Auslöseverzögerungen der Kamera - die Eingangsstufe liefert den wesentlichen An-

teil - erreicht man erst mit größeren Eingangsimpulsamplituden. Beispielsweise werden für die Kamera EL085 für Triggerimpulse von + 500 V_{SS}, Anstiegszeit < 10 nsec und R_i = 100 Ω folgende totale Auslöseverzögerungen angegeben:

Schmierbildeinschub E7 ≅ 150 nsec
usec-Dreibildeinschub E8 ≅ 50 nsec
nsec-Dreibildeinschub E9 ≅ 30 nsec

In Fällen, wo diese Werte noch nicht reichen, sind Triggerimpulse bis zu + 1 kV_{SS} mit einer Halbwertsbreite ≲ 50 nsec zugelassen, die noch eine kleine Verbesserung der Trigger-Verzögerung bringen. Bei den Dreibild-Einschüben ist in Stellung "extern" der Bildabstands-Schalter ΔT 1-2 und ΔT 2-3 die Auslösung des 2. und 3. Bildes über die Eingänge E2 und E3 möglich. In Bezug auf die benötigten Triggerimpulse gilt das oben gesagte. Bei externer Auslösung darf der zeitliche Abstand zwischen 2. und 3. Bild beim nsec-Einschub 100 nsec - 2usec und beim usec-Einschub 1 - 100 usec betragen. Der Abstand des 2. zum 1. Bildes ist nach oben unbegrenzt. Werden ohne angeschlossene Triggerimpulse der Schalter ΔT 2-3 oder noch zusätzlich der Schalter ΔT 1-2 auf "extern" gestellt, dann ist Zwei- bzw. Einbildbetrieb möglich.

7.12 Bildgröße

Aufgrund der Einschubdaten von 8, 12, 16 mm Ablenkung für die Moment-Einschübe und 50 mm Ablenkung für Schmierbetrieb ist die Anodenbildbreite festgelegt.

Die leuchtschirmseitige Optik muß also bei größter Ablenkung ein ca. 50 mm breites Bild abbilden.

Die Bildhöhe ist maximal 25 mm, bedingt durch die ausnutzbare Kathodenfläche. Bei Einbildbetrieb mit voll ausgenützter Kathodenfläche kann das Kathodenbild ungefähr 35 mm Ø haben, d.h. etwa Klein-

bildformat.

Durch die am Kamera-Rahmen einstellbare Vorablenkung wird das Anodenbild (3,2 oder 1-Bild) jeweils in die Mitte gerückt.

7.13 Daten des Schmierbild-Einschubs EL085E7

Die Schmierbild-Öffnungszeiten sind 0,5; 1; 2; 5; 10 und 20 usec. Demnach beträgt die auf die Anode bezogene Schmiergeschwindigkeit wegen der Schmierbild-Länge von 50 mm also 100, 50, 25, 10, 5 und 2,5 mm pro usec. Die Wieder-Bereitschaftszeit beträgt 20 sec. Zwei Kontrollausgänge liefern Rechteckimpulse (Gote") von $+4 V_{SS}$ an 50Ω und $-30 V_{SS}$ an 150Ω . Die Konstanz der Schmiergeschwindigkeit über die Bildbreite konnte nicht gemessen werden. Diese Messung der anodenseitigen Ablenkgeschwindigkeit ist so kompliziert, daß sie ihrerseits mit zu großen Meßfehlern behaftet ist. Da bei der verwendeten symmetrischen Ablenkung der Tangensfehler der Bildwandlerröhre jedoch sehr klein ist, d.h. die Ablenkempfindlichkeit konstant, ist die Ablenkgeschwindigkeit im wesentlichen durch die oszillografisch meßbare Linearität und Reproduzierbarkeit des Ablenk-Sägezahns gegeben. Deshalb können $\pm 5 \%$ angegeben werden.

7.14 Daten des usec-Dreibild-Einschubs E8

Die für jedes der drei Bilder getrennt wählbaren Öffnungszeiten betragen 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 und 1usec. Die einstellbaren zeitlichen Bildabstände sind 2, 5, 10, 20 und 50 usec. Daß ferner externe Bildauslösung und 8, 12, 16 mm-Bilddistanz möglich sind, ist schon vorher gesagt worden. Die Wiederbereitschaftszeit ist 15 sec. Während der Öffnungszeiten erscheinen positive und negative Kontrollimpulse an zwei Ausgängen wie beim Schmierbild-Einschub.

7.15 Daten des nsec-Dreibild-Einschubs

Die Öffnungszeiten werden durch aussen anschließbare

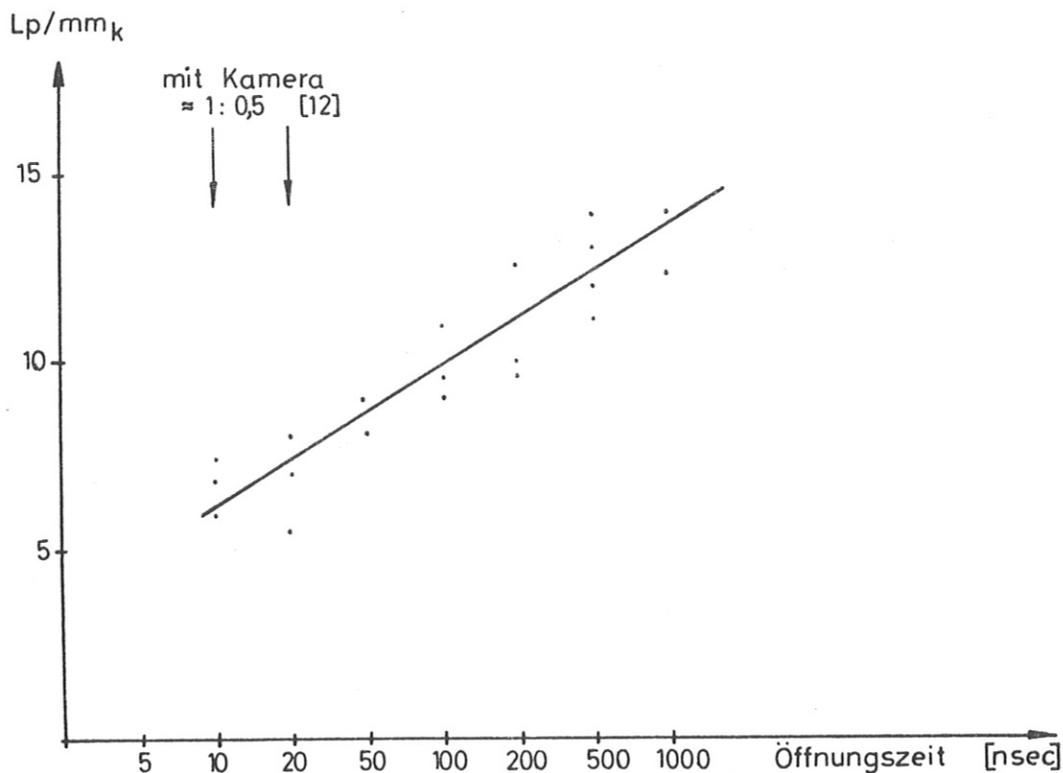
Ladekabel festgelegt. Es sind 10, 20 und 50 nsec-Kabel vorgesehen worden. Die einstellbaren zeitlichen Bildabstände betragen 50, 100, 200, 500 und 1000 nsec. Die Wiederbereitschaftszeit ist 10 sec. Ein Kontrollausgang liefert Rechteckimpulse von $+4 V_{SS}$ während der Öffnungszeiten.

7.2 Auflösungsergebnisse

Beim Schmierbild-Einschub ist die Schärfe vor allem durch die gewählte Schlitzbreite gegeben. Wie eng der Schlitz gemacht werden kann, ist eine Frage der vorhandenen Experiment-Leuchtdichte. Wegen der kleinen zulässigen Kathodenstromdichte von 2 mA/cm^2 wird in den meisten Fällen eine Schlitzbreite von 0,2 bis 0,5 mm nicht unterschritten werden können.

Die Auflösung bei Momentaufnahmen wurde mit Testdias, die in horizontaler und vertikaler Richtung Strichraster wechselnder Dichte enthalten, gemessen. Als Beleuchtungsquelle für die Testdias wurde ein handelsüblicher Elektronenblitz mit zwischengeschalteter Streuscheibe aus Überfangglas benützt. Das Blitzgerät hatte die Leitzahl 28 (für Schwarzweißfilm 17/10 DIN), Farbtemperatur 5600° K , Leuchtwinkel 55° , Blitzdauer $T_{1/2} = 450 \text{ usec}$. In Bild 7.2 sind die Ergebnisse, abhängig von der Öffnungszeit für die nsec-Einschübe ELO70E3 und ELO85E9 und für die usec-Einschübe ELO70E4 und ELO85E8, eingetragen worden.

Die Ergebnisse mit der Kamera ELO70 wurden mit einer Bildwandler-Röhre 4449, die Ergebnisse von ELO85 mit einer Röhre 4449A (mit gekrümmter Kathode und vorge-setzter Korrekturlinse) erhalten.



Auflösungsergebnisse

Bild 7.2

Die Auflösung ist absichtlich auf die Kathode bezogen, ebenso wie die Daten der stationären Auflösung des RCA-Datenblattes. Das Frontobjektiv war ein Leitz-Summicron 1:2/90 mm. Zur Abbildung auf den Film wurden verschiedene Kameras verwendet:

- A. Abgewandelte Oszillografenkamera "Oszillophat" von Steinheil, 1:1,9/75 mm, 1:1,5 vergrößernd auf Polaroid-3000 ASA-Film
- B. Abgewandelte Oszillografenkamera "C 19" von Tektro-nix, 1:1,5/85 mm, 1:1 abbildend auf Agfa-Record-Film
- C. Im IPP von Herrn Steinhausen entwickelte Kamera (12) mit Oude Delft Objektiven, Lichtstärke ca. 1:0,5, 1:1 abbildend auf Polaroidfilm 3000 ASA oder Agfa-Record-Film.

Gemessen wurde die Auflösung in Zentrumshöhe des mittleren Bildes im Dreibildbetrieb mit 12 oder 16 mm Ab-

lenkung, um Randunschärfe der Objektive auszuschalten. Es sind absichtlich viele Ergebnisse zusammengetragen, um zu zeigen, daß wegen wechselnder Güte der fotografischen Abbildung, des Filmes und seiner Planlage in der Kamera und der elektronenoptischen Bildwandler-Röhren-Fokussierung (Stabilität der Versorgungsspannungen) die Ergebnisse streuen.

Aufgrund der Kontrastverschlechterung, die bei der Reproduktion eintritt, kann die Auflösung nicht anhand von Abbildungen beurteilt werden. Deshalb wurde von einer Wiedergabe der Testaufnahmen abgesehen.

7.21 Diskussion der Kurzzeitschärfe der Momentaufnahmen

Testaufnahmen zeigen, daß beim usec-Einschub die Ablenkunschärfe bei Dreibildbetrieb nicht eindeutig den nichtidealen Ablenkimpulsen zuzuordnen ist, weil nämlich das erste, also unabgelenkte Bild wesentlich besser als das 3., also am stärksten abgelenkte Bild sein müßte. Vielmehr wird die Schärfe der Randbilder bei langen Öffnungszeiten durch die Randunschärfe der Kameraoptik überdeckt. Zu kurzen Öffnungszeiten hin wiederum ist der hier immer stärker werdende Kurzzeitschärfe-Abfall der größere Anteil, der auch im Einbildbetrieb vorhanden ist. Jedoch ist eine Ablenkunschärfe des 3. Bildes hier deutlich erkennbar.

Beim nsec-Einschub kann man nämlich die Ablenkimpulse nicht genau genug auf waagerechtes Dach kompensieren, weil die benötigten Oszillografen sehr kurzer Anstiegszeit (z.B. Tektronix Typ 519) nur kleine Y-Amplituden schreiben, so daß nicht genau genug gemessen werden kann.

Daß der aus Bild 7.2 ersichtliche Kurzzeit-Schärfeabfall nicht allein die Folge nichtidealer Öffnungsimpulse ist, zeigt ein Experiment im Einbildbetrieb und einer konstanten Öffnungszeit von 100 nsec, also im Gebiet sehr genau rechteckiger Öffnungsimpulse. Wenn man nämlich hier von einer Einstellung von Frontblende und Kamerablende, die gute scharfe Bilder

ergibt, ausgeht und stufenweise die Frontblende weiter öffnet bei gleichzeitigem Verkleinern der Kamerablende, so daß also der Film gleichbleibend geschwärzt wird, aber die BW-Kathode stufenweise stärker belichtet wird, so zeigt sich eine allmähliche Schärfeabnahme und schließlich bei totaler Unschärfe eine starke kissenförmige Verzeichnung mit starken Einschnürungen des Bildes an Stellen hoher Leuchtdichte, d.h. zum Unschärfebeitrag der Kameraoptik bei offener Blende hinzu, liefert die BW-Röhre bei Übersteuerung ein unscharfes und schließlich verzerrtes Bild.

Über diese kissenförmige Verzeichnung ist schon in (14) von Nesterikhi berichtet worden. Dieser russische Autor führt den Effekt auf zu hochohmige Kathode zurück. Die Firma RCA andererseits führt den Effekt auf Raumladung in Kathodennähe zurück.

Da bei den auftretenden Elektronenstromdichten von $2\text{mA}/\text{cm}^2$ und den Elektronengeschwindigkeiten von einigen eV in Kathodennähe eher eine elektrostatische Abstoßung als eine magnetische Anziehung benachbarter Elektronenbahnen auftreten müßte, ist es naheliegend, daß entweder die Kathodenhochohmigkeit allein schuld ist oder die Raumladung vor der Kathode in Wechselwirkung mit auf der Kathode entstehenden Spannungen und Strömen tritt. Die auftretenden Ströme von 10 - 20 mA erzeugen tatsächlich - wie man aufgrund der Geometrie der Bildwandler-Röhre errechnen kann - eine nicht vernachlässigbare Raumladung.

Eine weitere Möglichkeit für unschärfer werdende Bilder bei großen Elektronenströmen = großer Leuchtschirmhelligkeit ist eventuell eine Überstrahlung des Leuchtschirms.

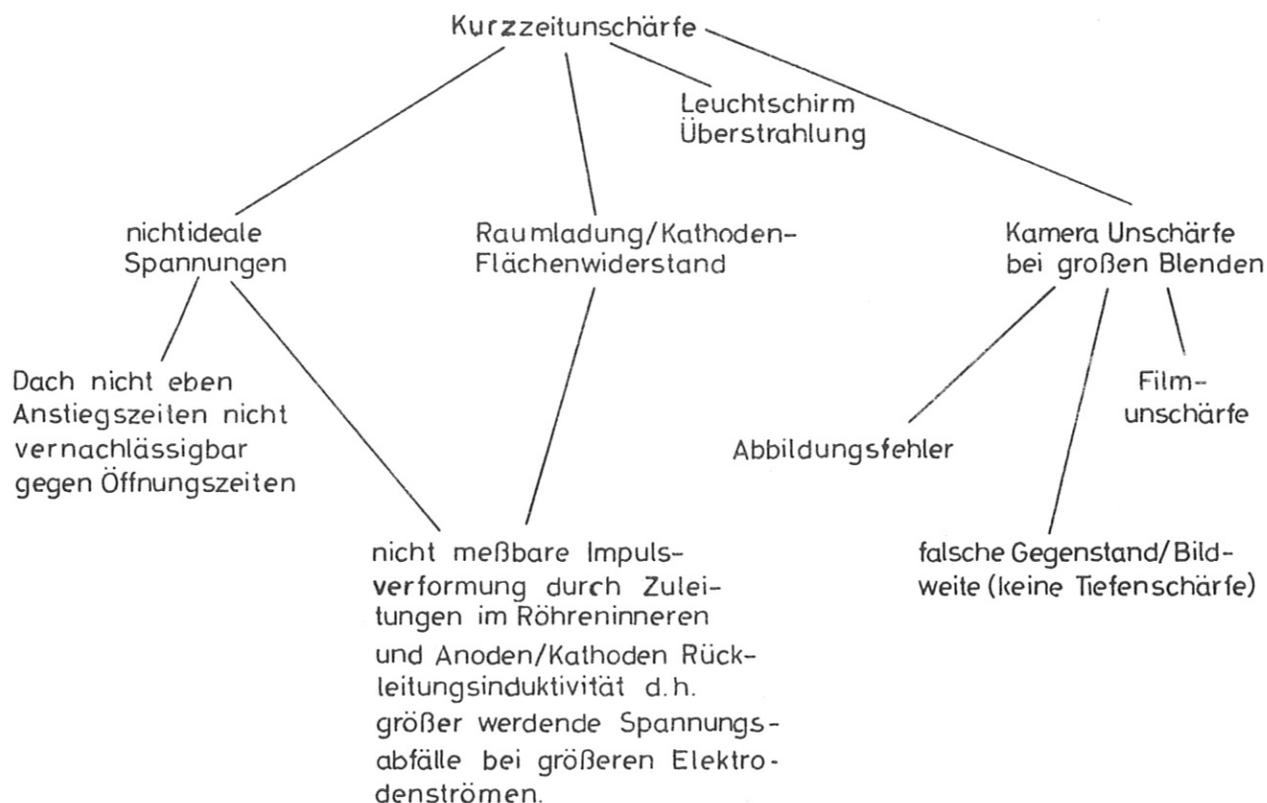


Bild 7.21

Bild 7.21 stellt die vermutlichen Einflüsse nebeneinander.

7.22 Abschätzung der einzelnen Unschärfe-Einflüsse

Die Trennung der einzelnen Einflüsse ist nicht exakt möglich. Doch man kann durch Überlegung und Experiment schon die ungefähre anteilige Zusammensetzung des Kurzzeitschärfe-Abfalls ermitteln.

Leider darf man die Röhre im stationären Betrieb nicht mit zur Übersteuerung führenden Kathodenströmen belasten; denn dies würde sehr wahrscheinlich die Röhre zerstören. Dieses Experiment scheidet aus.

Man kann nun weiter die Übersteuerung der Röhre kleiner machen durch Mehrfachbelichtung. Bei sehr kurzen Öffnungszeiten (10^{-8} sec) führt dies zu einer kleinen Verbesserung, bei 50 nsec nicht.

Weiter kann man probeweise einen sehr gut rechteckigen Öffnungsimpuls über einen Quecksilberschalter erzeugen.

Dies bringt bei 50 nsec keine Verbesserung der Auflösung. Bei 10 nsec wurde es aus Zeitmangel nicht versucht, weil es nur dann sinnvoll ist, wenn man diesen Impuls direkt am Röhren-Steuergitter einspeist.

Bild 7.22 zeigt eine Gegenüberstellung von Kurzzeit-Ergebnissen verschiedener Autoren für verschiedene einstufige Bildwandler-Röhrentypen.

Bildwandler Röhrenart	U [UV]	Typ	Kamera-Erbauer bzw. Autor	Zentral-schärfe in Lp/mm a. Kathode bezogen	Öffnungs-zeit [nsec]	Licht-stärke d. Optik	Abb. Maßstab	auf 1:1 umgerechnete Lichtstärk.	Filmtyp
elektrostatisch	10	-(AEI)	Chippendale [3] (AWRE)	5	15	f/1	1:4	ca f/0,6	FP 3
"	16		Butslov, u.a. [14] Nesterikhin	?	15	f/1,5	?	?	?
magnetisch	25	ME 1201 AA (Mullard)	Grover (AWRE) [10]	4	10	—	1:4	?	5691 Ilford
elektrostatisch	15	4449-RCA	STL Modell 1C	5 (4,2)	10 (5)	f/1,5	3:5	f/1,2	?
"	15	4449A-RCA	STL Modell 1D	6,7	10	f/1,2	1:1	f/1,2	?
"	15	4449-RCA	EL070/IPP	7,5	10	f/0,5	1:1	f/0,5	Agfa Record
"	15	4449A-RCA	EL085/IPP	6	10	f/0,5	1:1	f/0,5	Fbl.3000ASA

Bild 7.22

Ergebnisse, die durch Mehrfachbelichtung entstanden sind, sind hier nicht berücksichtigt worden, da in der Praxis später dann doch keine Mehrfachbelichtung möglich ist. Die Ergebnisse liegen für 10 nsec Öffnungszeit alle zwischen 4 und 7 Lp/mm.

Übersteuerung der Bildwandlerröhre und gleichzeitiges Ausschalten der Unschärfe bei der optischen Abbildung kann durch Nachschalten eines Bildverstärkers vermieden werden, wenn auf diesen zweiten Bildwandler mit kleiner Lichtstärke vergrößert abgebildet wird (11 und 12).

Aufgrund dieser Überlegungen kann man von einer Bildwand-

ler-Röhre nach dem SEV-Prinzip (Astrakon und P829 der English Electric Co) auch trotz der hohen Verstärkungsziffern hier bessere Kurzzeit-Schärfe als bei einstufigen Röhren erwarten, da keine Zwischen-Speicherung vorliegt. Dagegen müßten zweistufige Bildwandlerrohren mit direkter Koppelung des 1. Leuchtschirms zur 2. Kathode bessere Resultate liefern (z.B. eine uns 1962 von der RCA angebotene, allerdings sehr teure Röhre).

Ausblick

Der vorliegende Bericht sollte die mit den Bildwandlerkameras EL070 und EL085 erreichten Ergebnisse, aber auch die Nachteile von Bildwandlerkameras bei sehr kurzen Belichtungszeiten aufzeigen.

Ein gewisser Mangel ist speziell bei den beschriebenen RCA-Bildwandler-Röhren das Auftreten von Strichen im Bild, die vom Steuergitter herrühren. Diese Striche beobachtet man auch schon im stationären Betrieb. Sie treten verstärkt bei der 4449A auf, weil hier das Gitter genauso wie die Kathode gekrümmt ist, so daß noch leichter als bei der 4449 durch eine Fehllage des Gitters im elektronenoptischen System dieser Effekt entstehen kann. Im Kurzzeitbetrieb stören sie insbesondere dann, wenn die Stellen, wo die Gitterstriche liegen, mit Stellen hoher Leuchtdichte des Objekts zusammenfallen.

In dieser Hinsicht ist die in (13) und (14) beschriebene Röhrenkonstruktion eine Verbesserung. Zusätzlich hat sie X - Y - Ablenkplatten. Diese Röhre ist jedoch auch jetzt, 1964, noch nicht ausgereift, da die Justierung große Schwierigkeiten bereitet und ist z.Z. noch nicht käuflich. Die Möglichkeit, X-Y-Ablenkung machen zu können, sollte jedoch nicht überbewertet werden, da bei größerer Bildzahl die Elektronik schnell sehr aufwendig wird und auch die Handhabung einer solchen Kamera schwierig ist, da bei vielen Bildern und einem großen Zeitbereich die ersten Aufnahmen über und die letzten unterbelichtet werden können bzw. umgekehrt. Weit wichtiger erscheint die Verbesserung der Kathoden- bzw. falls dies nicht

möglich ist, eine bis an die Grenzen der Röhrentechnologie gehende Anodenspannung von vielleicht 30 kV für eine Stufe, die evtl. gepulst werden müßte.

Das bestehende Kamerasystem EL085 könnte noch durch weitere Einschübe, vielleicht einen noch langsameren Schmierbildeinschub und einen usec-Einschub für 7 sehr schmale Bilder der Größe 5 x 25 mm für spektrografische Anwendungen erweitert werden.

An der Entwicklung, deren Ausgangspunkt eine von Herrn Steinhausen bis 1961 in Jülich entwickelte Kamera war [6], beteiligten sich zahlreiche Mitarbeiter aus der Gruppe Elektronik und den Elektro- und Elektronik-Werkstätten. Die mechanische Konstruktion führte die Gruppe Konstruktion aus. Der Koaxialkondensator wurde von der Gruppe Hochspannungstechnik gebaut. Unter den vielen Mitarbeitern verdienen die Herren Asenkerschbaumer, Fazekas, Hecht, Reinhardt, Simon und Urbas sowie Frau Kiesel wegen ihres großen Anteils an der Entwicklung und Ausführung besondere Erwähnung.

Herrn Steinhausen sei für die zahlreichen anregenden und zur Klärung beitragenden Diskussionen gedankt.

9. Anhang

9.1 Auflösungsverminderung durch nichtideale Ablenkimpulse

Falls während der Öffnungszeiten das Bild nicht exakt stillsteht, wird es verwischt, d.h. die Auflösung für einen Strichraster senkrecht zur Ablenkrichtung wird verringert.

Unter der Annahme einer gleichförmigen Bildablenkung, d.h. einer Dachschräge des Ablenkimpulses, kann man den Unschärfe-Einfluß ziemlich genau abschätzen.

Die Kontrast-Funktion des stehenden Bildes sei als sinusförmig angenommen. Dann ist K längs des Bildes in Ablenkrichtung S.

$$K = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}} = 1 + \sin(2\pi \cdot s \cdot A) \text{ mit } \frac{1}{A} [\text{mm}] = \text{Linienpaarbreite}$$

Am Ende der Öffnungszeit sei das Bild in Ablenkrichtung um Δs verschoben. Die resultierende Kontrast-Funktion als Summe der n infinitesimalen um $\frac{\Delta s}{n}$ verschobenen Einzelbilder lautet dann

$$K_{\leftrightarrow} = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m \left[1 + \sin\left(2\pi s \cdot A - \frac{n \cdot \Delta s}{m}\right) \right]$$

Eine Summe von Sinuskurven gleicher Frequenz ergibt wieder eine Sinuskurve. Es genügt also zur Bestimmung dieser Kurve die Berechnung ihrer Maxima und Minima. Die ersten Maxima und Minima liegen, wie am Bild ersichtlich, um $\frac{\Delta s}{2}$ gegenüber denen von K verschoben, also bei

$$s = \frac{1}{4A} + \frac{\Delta s}{4A\pi} \text{ Max.} \quad \text{bzw.} \quad s = \frac{3}{4A} + \frac{\Delta s}{4A\pi} \text{ Minimum}$$

Mittels der trigonometrischen Additionstheoreme und dem Grenzwert

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^m \sin \frac{n\varphi}{m} = \frac{m}{\varphi} \int_0^{\varphi} \sin x dx = \frac{m}{\varphi} (1 - \cos \varphi)$$

mit $\varphi = 2\pi A \cdot \Delta s$

bekommt man schließlich

$$\frac{K_{\min}}{K_{\max}} = \frac{1 - \frac{2}{\varphi} \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \varphi}{1 + \frac{2}{\varphi} \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \varphi}$$

Für sehr kleine φ gilt die Näherung $\frac{\sin \frac{\varphi}{2}}{\frac{\varphi}{2}} \approx 1$
 damit ergibt sich $\frac{K_{\min}}{K_{\max}} \approx \frac{1 - \cos \varphi}{1 + \cos \varphi} = \operatorname{tg}^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)$

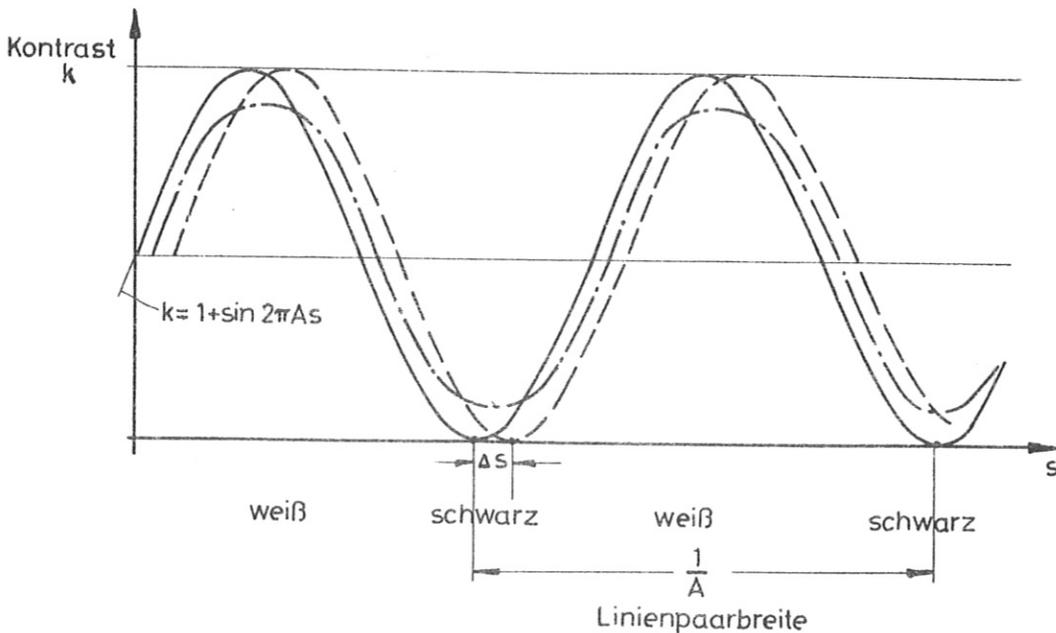
Eine Halbierung des Kontrasts erfolgt also z.B. bei

$$\operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2} = \frac{1}{2} \quad \text{also} \quad \frac{\varphi}{2} = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{1/2} = \pi A \cdot \Delta s$$

woraus folgt $\Delta s \approx 0,2 \frac{1}{A}$

d.h. bei einer Schwankung des Bildes um 0,2 Linienpaarbreiten erfolgt schon eine Halbierung des Kontrasts.

Bild 9.1



- Kontrast längs eines ruhenden Bildes
- Kontrast des um Δs verschobenen m -ten Teilbildes, dazwischen alle Teilbilder
- . resultierendes weniger scharfes Bild

9.2 Optimalisierung der optischen Abbildung vom Leuchtschirm auf den Film

Bei langen Belichtungszeiten ist die Auflösung der BW-Röhre selbst so gut, daß bei voll offener Kamera-Optik die optische Unschärfe bei Dreibild-Betrieb einen wesentlichen Anteil der Unschärfe trägt.

Andererseits ist bei sehr kurzen Belichtungszeiten eine sehr lichtstarke Kamera-Optik notwendig, um die BW-Röhre nicht zu übersteuern.

Deshalb ist ein Überblick über die Zusammenhänge zwischen Leuchtdichte auf dem Film und der Leuchtdichte des Leuchtschirmbildes bei verschiedenem Vergrößerungsmaßstab notwendig. Für eine optimale Auflösung wählt man dann bei gegebenem Objektiv und Film die Vergrößerung oder Verkleinerung so, daß die 3 Kontrast-Übertragungsfunktionen (KÜF) von BW-Röhre, Kamera-Objektiv und Film in der gleichen Größenordnung liegen oder vereinfacht ausgedrückt, daß die drei Grenzauflösungen dieselben sind. Der von einem Leuchtschirmpunkt ausgehende Lichtstrom wird je nach Öffnungsverhältnis der Optik zu einem gewissen Bruchteil auf den Film fokussiert. Unter der Annahme, daß der Leuchtschirm näherungsweise nach dem Lambertschen Gesetz abstrahlt, ergibt sich dieses Verhältnis zu

$$\rho = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{ges}}} = k \sin^2 \alpha$$

wobei k die Lichtabsorption und Reflexion des Linsensystems berücksichtigt und α der in die Ebene projizierte Winkel des Lichtbündels ist. Man kann jetzt weiter das Öffnungsverhältnis = Durchmesser : Brennweite des Objektivs einführen und außerdem die Gegenstandsweite g .

Unter Zuhilfenahme der Abbildungsgleichungen

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{g} = \frac{1}{f} \quad \text{und} \quad m = \frac{D}{G} = \frac{b}{g}$$

ergibt sich dann unter Berücksichtigung der Tatsache, daß die Beleuchtungsstärke eines Flächenelements des

Gegenstandes bei Abbildung mit dem Abbildungsmaßstab m bei einem invarianten Lichtstrom ein Filmbild der Helligkeit $\frac{1}{m^2}$ liefert.

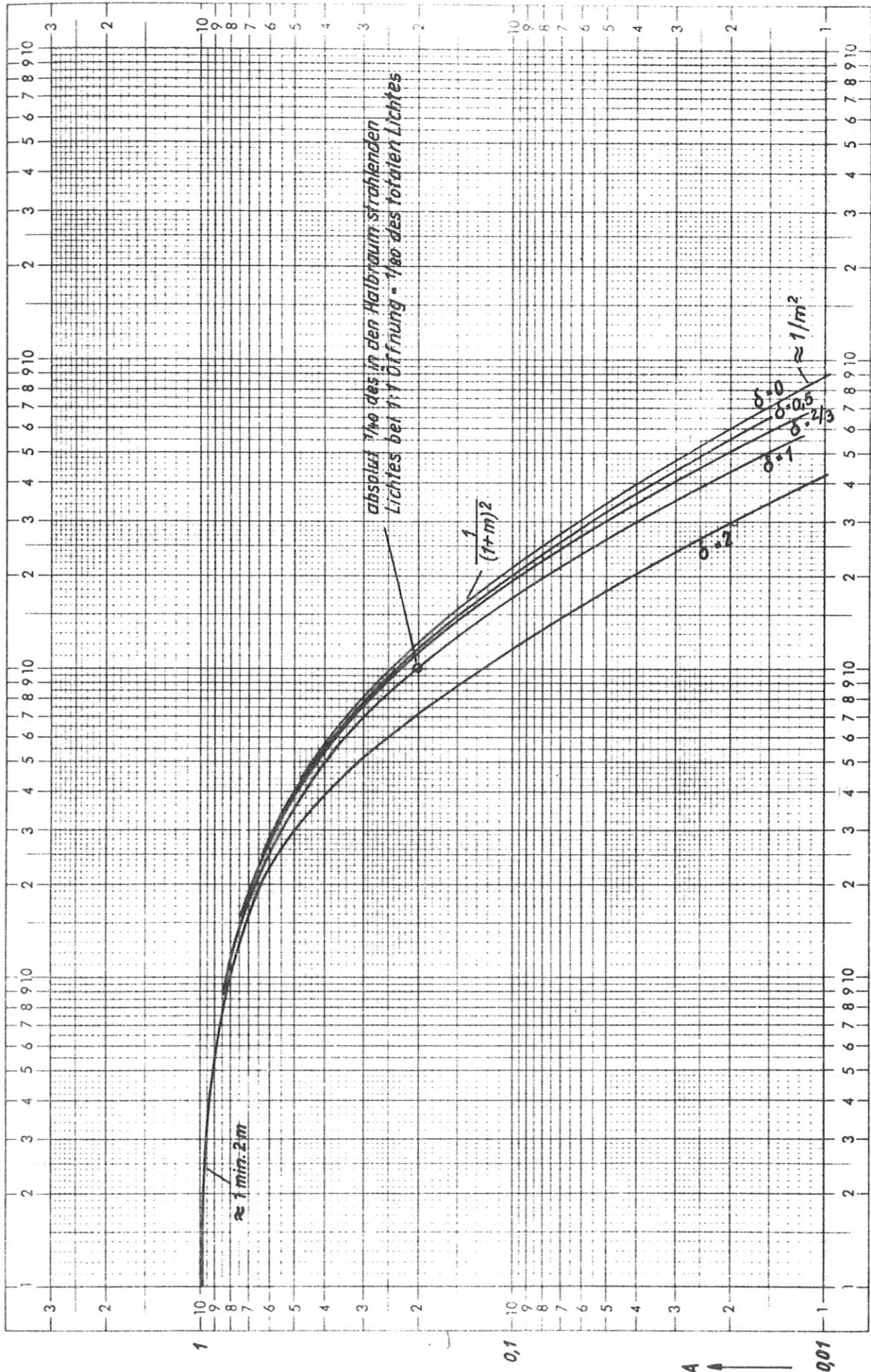
$$A(\delta, m) = \frac{\delta^2}{(1+m)^2 + \delta^2 m^2} \quad \text{wobei } k=1 \quad \text{gesetzt wurde.}$$

Diese Gleichung kann man folgendermaßen interpretieren:

1. Für kleine δ z.B. $\delta = 1 : 3,5$ $\delta^2 = 0,1$ und m sehr groß (Projektion) wird $A \approx \frac{1}{m^2}$.
2. Für m klein (allgemeine Photographie) ist die Filmbeleuchtungsstärke unabhängig von der Entfernung des Gegenstandes. Bei Nahaufnahmen, z.B. aus 0,5 cm Entfernung mit einem Objektiv $1 : 2/50$ cm bekommt man jedoch eine Lichteinbuße von 20 %.
3. Für mittlere und große δ und beliebige m sind die Verhältnisse in Bild 9.2 zusammengestellt.

Für kleine δ ist gut die Näherung $A = \frac{1}{(1+m)^2}$ brauchbar, z.B. bei allen gebräuchlichen Oszillografen-Kameras. Bei Abbildungsmaßstäben in der Nähe von $1 : 1$ ist also die Leuchtdichte annähernd $\frac{1}{m}$ (und nicht etwa $\frac{1}{m^2}$) proportional. Jedoch ist es für verschiedene Filme mit vorgegebenem gleichem Produkt von Auflösung \times Lichtstärke günstiger zu vergrößern als zu verkleinern, wenn nicht die mangelnde Randauflösung des Objektivs im Falle des vergrößerten Bildes eine Grenze setzt. Es ist ein großer Mangel, daß es bei Objektiven nicht ähnlich wie bei Elektronenröhren kommerzielle Typen mit angegebenen und engtolerierten Eigenschaften gibt.

Eine 1:1-Abbildung ist in jedem Fall ungünstig, da der empfindlichste Feinkornfilm noch 40 Lp/mm auflöst, also einen Faktor 2 mehr als die BW-Röhre und der übliche Polaroid-Film 3000 ASA wiederum nur 10 Lp/mm auflöst.



Beide Achsen logar. geteilt von 1 bis 10000 und 1 bis 300 Einheit 62,5 mm

$m = \frac{\text{Bildgröße}}{\text{Gegenst. Größe}}$

Literaturverzeichnis

- 1 Stoudenheimer, Morr:
An Image Converter Tube For High-Speed Photographic Shutter Service
RCA-Review (Sept. 57) Vol. XVIII, No. 3
- 2 Clark:
An Electronic Framing Camera For Millimicrosecond Photography
IRE Wescon Conference (Aug. 58)
- 3 Stoudenheimer:
Advances in Electronics and Electron Physics
(1960) Vol. XII S. 41
- 4 Datenblätter der RCA-Röhren (73435B, 4449, 4449A)
- 5 Steinhausen:
Light Amplification Of High-Speed Images
Proc. VI Conf. Ion.-Phen.-Gas. Paris (1963)
- 6 Steinhausen:
Bildwandler für Kurzzeitphotographie bei selbstleuchtenden Vorgängen
Zeitschrift für Kinotechnik 9 (1961) S. 249
- 7 Appel, Fünfer:
Firing Delay and Build-Up Time in Thyratrons
Zeitschrift für angewandte Physik 8 (1956) S. 322
- 8 Rüppel:
Physikalische Verhandlungen 8 (1957) S. 230
- 9 Product Specification Sheet No.3 der STL-Kamera
Deutscher Vertrieb Frügel GmbH, Hamburg
- 10 Grover:
Very high speed dual purpose Image Converter Camera (AMRE)
J. Sc. Instr. (3-1961) S. 86
- 11 Tanasescu:
Fortschritte bei Bildwandler-Röhren
Experimentelle Technik der Physik 2 (1963) S. 98
- 12 Steinhausen:
Lichtstarke Kameras und Kaskaden-Bildverstärker
Institutsbericht IPP/4/7 (1963)

- 13 Walters, Chippendale, Brown:
A Time Resolving Image Converter
Proc. 6th Int. Congress on High Speed
Photography (1962)
- 14 Butslov u.a.
Proc. of the 5th Int. Congress on High Speed
Photography (1958) S. 230, S. 243