

Anwendung von Fotovervielfachern

Teil 1

Dipl.-Ing. JOACHIM KULLMANN
und Ing. HORST HARTIG

Mitteilung aus dem
VEB Werk für Fernsehelektronik Berlin

Da Fotovervielfacher als elektronische Spezialbauelemente nie eine solche Verbreitung wie z. B. Transistoren und Empfängeröhren erfahren haben, sind Veröffentlichungen zusammenfassender Art speziell zur Anwendungstechnik kaum vorhanden. Diese Tatsache machte sich nicht zuletzt auch in einer nun schon über längere Zeit laufenden Beratung von Anwendern durch den Röhrenhersteller bemerkbar, weshalb sich das Applikationslabor des VEB Werk für Fernsehelektronik Berlin veranlaßt sah, diesen dreiteiligen Beitrag zu erarbeiten. Dem Schaltungs- bzw. Geräteentwickler, der sich erstmalig mit der Anwendung von Fotovervielfachern beschäftigen muß, sollen die nun folgenden Ausführungen einige grundlegende Hinweise zur Auswahl der richtigen Röhren sowie zu deren Anwendungstechnik aus technischer und theoretischer Sicht geben. Damit ist der Anwender einerseits vor Fehlmessungen und andererseits auch vor ökonomischen Verlusten wegen des relativ hohen Preises dieser Spezialbauelemente bewahrt. Darüber hinaus kann auch der Nichtelektroniker, der mit Fotovervielfachern arbeitende Geräte und Anlagen bedient, diesen Informationen Aussagen entnehmen, welche zum besseren Verständnis und zur Verhaltensweise dieser Anlagen sowie zu richtiger Interpretation der gewonnenen Meßergebnisse beitragen. Dieser Beitrag beschreibt u. a. auch Verhaltensweisen von Fotovervielfachern, die in Form von Parametern nicht publiziert

Die gegenwärtige technische Entwicklung ist durch das Vordringen der Elektronik in fast alle Gebiete gekennzeichnet. Oft wird sie durch diese erst ermöglicht. Dabei kommt es auch zum zunehmenden Einsatz von Fotovervielfachern. Neben wenigen, schon langjährigen Hauptanwendern treten in steigendem Maße Einzelanwender auf, die mit der Anwendungstechnik und den Eigenschaften von Fotovervielfachern nicht oder nur wenig vertraut sind. Ihnen soll mit diesem Beitrag geholfen werden, Fotovervielfacher richtig und sinnvoll anzuwenden.

werden. Es sei in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, daß Anforderforderungen hieraus nicht ableitbar sind; verbindlich sind die TGL-Angaben des Röhrenherstellers. Weiterhin ist das jeweils gültige Fertigungsprogramm zu berücksichtigen, und Änderungen im Sinne der technischen Weiterentwicklung sind vorbehalten. Schaltungsangaben und weitere Hinweise erfolgen ohne Berücksichtigung der Schutzrechtslage und sind unverbindlich sowie keine haftungs- und schaltungsbezüglichen Empfehlungen.

1. Einleitung

Fotovervielfacher sind elektronische Vakuumbauelemente, die grundsätzlich dazu dienen, Lichtsignale bei gleichzeitiger Verstärkung in elektrische Signale umzuwandeln, wobei die zu realisierenden Empfindlichkeitswerte gegenwärtig von keinem anderen opto- oder fotoelektronischen Bauelement in Festkörper- oder Vakuumtechnik erreicht werden.

Typische Anwendungsbeispiele haben Fotovervielfacher in Geräten der Fotometrie (z. B. Lichtmengen- und Lichtstärkemessung), der Spektroskopie (Spektroskopie im optischen Bereich sowie Röntgen- und Kernspektroskopie), in der Colorimetrie (Farbmessung) und in der Densitometrie (Untersuchung von Transparenz und Trübung).

Weitere Einsatzgebiete sind die elektrische Nachrichtentechnik (Signalübertragung mit

Lichtwellen, Lichtpunktastaster in der Farb- und Schwarzweiß-Fernsehetechnik), Kurzzeitmessung bis in den Subnanosekundenbereich, Lasertechnik, spezielle Lichtschranken sowie diverse Meßprobleme auf den verschiedensten Gebieten, wo Licht nur mittelbar Anwendung findet.

2. Aufbau und Funktion

Die im VEB Werk für Fernsehelektronik gefertigten Fotovervielfacher enthalten in einem Vakuumgefäß aus Glas als Hauptkomponenten die Fotokatode, das elektronenoptische Eingangssystem, den Sekundärelektronenvervielfacher und die Anode. Von den bekannten Elektronenemissionsarten werden die Fotoemission und die Sekundäremission bewußt ausgenutzt, während die thermische Emission und die Feldemission in diesem Zusammenhang als unerwünschte Störkomponenten auftreten. Die prinzipielle konstruktive Anordnung der eben genannten Hauptkomponenten im fertigen Bauelement zeigt Bild 1.

2.1. Fotokatode

Die Fotokatode ist entsprechend dem Bild 1 auf der Innenseite des Glaskolbens aufgedampft. Es handelt sich um eine für Licht halbdurchlässige Schicht aus im allgemeinen mehreren Komponenten von Alkalimetallen und Antimon (Sb), die sich durch eine niedrige Elektronenaustrittsarbeit auszeichnen. Das Ziel besteht bei der Nutzung des äußeren fotoelektrischen Effekts in der

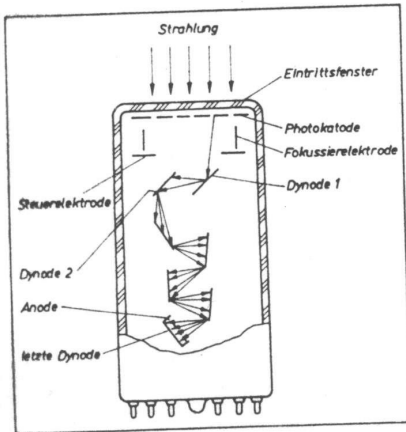


Bild 1: Prinzipieller Aufbau eines Fotovervielfachers

Erreichung eines möglichst hohen Quantenwirkungsgrades, d. h., die Zahl der ausgelösten Elektronen soll im Verhältnis zu den auftretenden Lichtquanten möglichst groß sein, was u. a. bei den eingesetzten Elementen (Sb, Cs, Na, K usw.) der Fall ist. Die unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeitskurven verschiedener Röhrentypen resultieren aus der Wahl entsprechender Katodenmaterialien bei unterschiedlicher technologischer Behandlung im Fertigungsprozeß (z. B. in Verbindung von Ag und O₂) im Zusammenhang mit der spektralen Durchlässigkeit des Kolbenglases.

Alle WF-Fotovervielfacher besitzen eine halbdurchlässige Frontkatode, d. h., die lichtempfindliche Schicht befindet sich auf der Innenseite des Glaskolbens im Dom der Röhre.

2.2. Elektronenoptisches Eingangssystem

Die aus der Katode ausgelösten Fotoelektronen haben normalerweise unterschiedliche Geschwindigkeiten sowie verschiedene Austrittsrichtungen und -orte. Aufgabe des elektronenoptischen Eingangssystems ist es, diese Elektronen zu beschleunigen und möglichst gut am Ort der ersten Dynode des Vervielfachersystems gleichzeitig zu fokussieren.

Erreicht wird dieser Effekt durch die elektrische Linsenwirkung eines zwischen Be-

schleunigungs- und Fokussierelektrode und der Katode aufgebauten elektrischen Feldes.

Dabei ist die Beschleunigungselektrode mit der ersten Dynode des Vervielfachersystems im Röhreninnern galvanisch verbunden (Bezeichnung: d₁ e₂), während sich die Fokussierelektrode (Bezeichnung: e₁) im Raum zwischen der Katode und der Kombination d₁ e₂ befindet.

Mit der Fokussierelektrode e₁ kann erforderlichenfalls der Fotokatodenstrom beeinflusst werden. Normalerweise liegt sie auf dem Potential der Fotokatode, worin die Tatsache begründet ist, daß einige Fotovervielfachertypen keine e₁-Elektrode enthalten, ohne auf die elektronenoptische Wirkung des Eingangssystems verzichten zu müssen.

Verschiedentlich findet man aus obengenannten Gründen für die Fokussierelektrode auch die Bezeichnung Steuerelektrode.

2.3. Sekundärelektronen-Vervielfachersystem

Das Sekundärelektronen-Vervielfachersystem hat die Aufgabe, den aus der Katode freigesetzten Fotoelektronenstrom zu verstärken, wobei der Effekt der Sekundärelektronenemission ausgenutzt wird.

Speziell bestimmte Materialien haben einen Sekundäremissionsfaktor > 1, d. h., ein auftretendes Primärelektron kann mehrere Sekundärelektronen aus dem betreffenden Material herauslösen. Das Verhältnis von Sekundär- zu Primärelektronen ist der Sekundäremissionsfaktor δ . Durch Hintereinanderschaltung mehrerer Sekundäremissionselektroden (Dynoden) entsteht ein von Dynode zu Dynode zunehmender Elektronenstrom, der ursprünglich durch die als Primärelektronen wirkenden Fotoelektronen an der ersten Dynode ausgelöst wurde.

Ist δ der mittlere Sekundäremissionsfaktor einer Dynode, n die Anzahl der hintereinandergeschalteten Dynoden und k die Anzahl der auf die erste Dynode treffenden Fotoelektronen (Primärelektronen), dann beträgt die Zahl K der nach der letzten Dynode auf die Anode gelangenden Elektronen

$$K = k \delta^n \quad (1)$$

In der Praxis ist $\delta \approx 4$ bei Al-Mg-Dynoden, so daß bei zehn bis zwölf Dynoden Verstärkungswerte von 10⁶...10⁷ erreicht werden. Zum Aufbau des Dynodensystems sind mehrere konstruktive Varianten üblich.

Alle WF-Fotovervielfacher enthalten das sogenannte Box-Dynodensystem, dessen praktischer Aufbau aus Bild 2 und Bild 3 hervorgeht.

Die innerhalb der letzten Dynode befindliche Anode (s. Bilder 1 und 2) saugt den verstärkten Strom der Sekundärelektronen schließlich ab; er bildet den Ausgangsstrom des Fotovervielfachers.

In fast allen WF-Fotovervielfachern findet als Sekundäremissionsmaterial eine Aluminium-Magnesium-Legierung Verwendung. Lediglich der M 10 FS 28 besitzt Beryllium-Dynoden, wodurch sich eine gute Anodenstromkonstanz ergibt.

Moderne Typen (z. B. der M 11 FVS 300) sind mit Caesium-Antimon-Sekundäremissionsschichten ausgerüstet (SbCs), woraus garantierte Stabilitätswerte (Einlaufverhalten) und hohe Verstärkung resultieren.

Bild 4 zeigt einige Fotovervielfachertypen aus dem Fertigungsprogramm des VEB WF.

3. Erläuterung der Daten

3.1. Allgemeine fotometrische Daten

3.1.1. Katodenempfindlichkeit

Die Katodenempfindlichkeit ist der Quotient aus dem Fotostrom der fotoelektrischen Schicht (Fotokatode) und dem einfallenden Strahlungsfluß unter vorgegebener

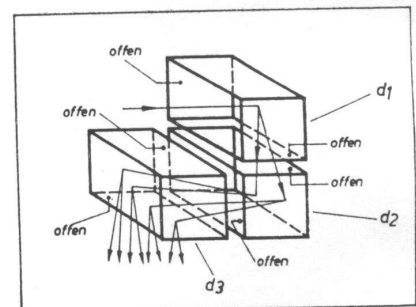


Bild 3: Prinzipielle Konstruktion von Boxdynoden

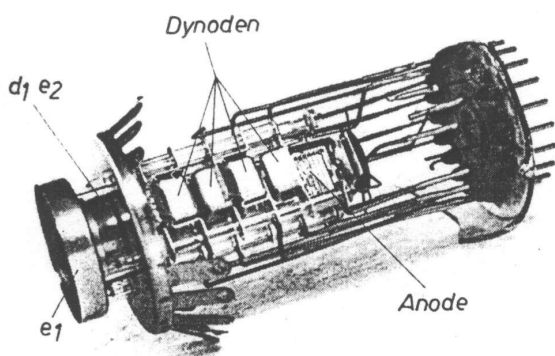


Bild 2: Systemaufbau des Fotovervielfachers M 12 FS 52. Die vorletzte Dynode wurde zur Sichtbarmachung der gitterförmigen Anode demontiert.
Foto: J. Kullmann

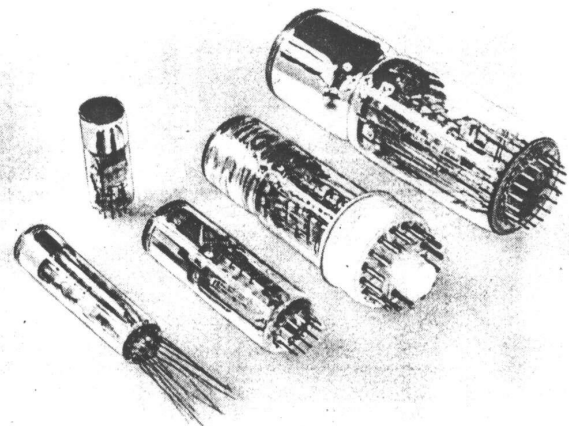


Bild 4: Einige Fotovervielfachertypen aus dem VEB Werk für Fernseh elektronik, Berlin.
Foto: J. Kullmann

nen Betriebsbedingungen:

$$S_k = \frac{I_{ph}}{\Phi} = \frac{I_k - I_{k0}}{\Phi} \quad (2)$$

I_{k0} = Katodendunkelstrom

Die Angabe erfolgt in $\mu A/lm$, wobei mit einem Strahler der Normlichtart A (Wolframfaden-Glühlampe bei einer Farbtemperatur von 2856 K) gemessen wird. Die Messung erfolgt zwischen der Fotokatode und allen übrigen kurzgeschlossenen Elektroden des Systems unter Anlegen einer entsprechend hohen Saugspannung, die den Zustand der Sättigung der d_1 -Dynode gewährleistet. Übliche Empfindlichkeitswerte liegen etwa in der Größenordnung $S_k = 10$ bis $100 \mu A/lm$.

3.1.2. Anodenempfindlichkeit

Die Empfindlichkeit (auch Anodenempfindlichkeit) ist der Quotient aus Anodenfotostrom und dem auf die Fotokatode treffenden Strahlungsfluß, d. h., in diesem Falle ist der Fotovervielfacher voll in Betrieb (z. B. im Gegensatz zur Messung der Katodenempfindlichkeit):

$$S_a = \frac{I_{aph}}{\Phi} = \frac{I_a - I_{a0}}{\Phi} \quad (3)$$

I_{a0} = Anodendunkelstrom

Die Angabe erfolgt in A/lm und die Messung gleichfalls mit der Normlichtart A. Übliche Werte liegen etwa in der Größenordnung $10 \dots 1000 A/lm$.

Bei den Empfindlichkeitsangaben ist zu beachten, daß die Werte auf den Lichtstrom von $1 lm$ extrapoliert sind. Selbstverständlich darf in der Praxis keinesfalls mit derart hohen Lichtströmen gearbeitet werden. Üblich bzw. möglich sind Lichtströme im Bereich von etwa $10^{-11} \dots 10^{-6} lm$ bei anliegender Betriebsspannung.

Der Verstärkungsfaktor ergibt sich schließlich aus dem Verhältnis von Anodenempfindlichkeit zu Katodenempfindlichkeit bzw. aus dem Quotienten zwischen Anoden- und Katodenfotostrom.

3.1.3. Dunkelstrom

Der Dunkelstrom ist der Strom, der ohne Bestrahlung in einer entsprechenden Elektrodenzuleitung fließt.

In den technischen Daten erfolgt die Angabe des Anodendunkelstroms I_{a0} , bezogen auf eine bestimmte festgelegte Verstärkung des Fotovervielfachers.

Übliche Dunkelstromwerte liegen in der Größenordnung von teilweise unter $1 nA$ bis etwa $20 nA$.

Fotovervielfacher mit rot- und infrarotempfindlichen Katoden haben Dunkelströme in der Größenordnung von Mikroampere.

3.1.4. Hellstrom

Teilweise ist auch die Angabe des Hellstromes (z. B. als nicht zu überschreitender Grenzwert) üblich.

Der Hellstrom I_h ist die Summe aus Anodenfotostrom und Anodendunkelstrom.

3.1.5. Impulsanstiegszeit

Für bestimmte Anwendungsfälle ist das Kurzzeitverhalten von Fotovervielfachern wichtig. Ein charakteristischer Parameter ist dafür u. a. die Anstiegszeit der Impulse t_{an} .

Gelangt auf die Fotokatode ein Lichtimpuls (mit theoretisch unendlich steiler Anstiegsflanke), so entsteht wegen Laufzeitstreuungen der Elektronen im elektronenoptischen Eingangssystem und im Dynodensystem niemals ein kongruentes Abbild im Anodenstromimpuls der Röhre.

Bild 5 zeigt in stark vereinfachter Weise die Laufzeitverzögerung t_v und die in der Impulsanstiegszeit t_{an} ausgedrückte Impulsverformung gegenüber dem Primärlichtimpuls. Die Impulsanstiegszeit ist die Zeit, in welcher der Impuls von 0,1 auf 0,9 seiner Amplitude ansteigt.

Obwohl im Fertigungsprogramm des VEB WF keine Kurzzeitvervielfacher enthalten sind, betragen bei vielen Typen die Anstiegszeiten $t_{an} = 10 \dots 15 ns$. Spezielle Kurzzeitvervielfacher haben Anstiegszeiten in der Größenordnung von $3 ns$ und teilweise auch unter $1 ns$.

3.2. Kernspektrometrische Daten

Beim Zerfall radioaktiver Isotope tritt allgemein α -, β - und γ -Strahlung auf, wobei sich entsprechende Elemente des periodischen Systems durch bestimmte Strahlungsarten und genau definierte Strahlungsenergien auszeichnen. Die radioaktive Strahlungsenergie (gemessen in keV) kann mit Hilfe sogenannter Szintillatorkristalle – typisch ist z. B. Natriumjodid mit Thallium $NaJ(Tl)$ – in proportionale Lichtimpulse verwandelt werden.

Neben der Proportionalität zwischen Lichtimpulsamplitude und keV-Wert liegt Proportionalität zwischen der Konzentration des jeweiligen Isotops und der Impulshäufigkeit vor.

Die Kombination beider Tatsachen ist die Grundlage für die Wirkungsweise kernspektrometrischer Meßplätze, wo mit Hilfe einer Impulsamplitudenanalyse und Impulszählung entsprechende Untersuchungen qualitativer und quantitativer Art mit radioaktiven Isotopen möglich sind. Die vom Szintillatorkristall abgegebenen Lichtimpulse werden mit Fotovervielfachern weiterverarbeitet.

Bild 6 zeigt das an einem Meßplatz aufgenommene Spektrogramm mit einem Präparat des Caesium-Isotops $Cs 137$ (Szintillator $NaJ(Tl)$, Fotovervielfacher M 10 FS 29), wobei die Abszisse in Kiloelektronenvolt geeicht ist und die Ordinate die Impulshäufigkeit angibt.

3.2.1. Kernspektrometrisches Auflösungsvermögen

Die schon erwähnten Laufzeiteffekte der Elektronen im Fotovervielfacher, verbunden mit der statistisch verteilten Quantelung der radioaktiven Strahlung und der Lichtemission des Szintillators, ergeben eine verwaschene Verbreiterung der entstehenden Spektrallinien (s. Bild 6). Je geringer die Breite der Spektrallinie ist, desto besser ist das kernspektrometrische Auflösungsvermögen, d. h., es können noch eng benachbart liegende Linien voneinander getrennt werden.

Das Auflösungsvermögen ist definiert als Verhältnis der Linienbreite ΔE in halber Höhe $1/2 H$ der Impulshäufigkeit H zur Gesamtenergie E :

$$h = \frac{\Delta E}{E} \quad (4)$$

Typische Werte für WF-Fotovervielfacher liegen bei $h = 8 \dots 11 \%$ bei den dazu geeigneten Röhren (Messung mit Caesium 137, $E = 662 keV$).

3.2.2. Energieäquivalent der Dunkelimpulse

Jede Fotokatode zeigt eine unerwünschte thermische Emission. Die austretenden Elektronen bilden den Dunkelstrom der Fotokatode, wobei seine statistisch verteilten Unregelmäßigkeiten das Dunkelstromrauschen darstellen. Dieses wiederum besteht aus einzelnen Impulsen, den Dunkelimpulsen. Die aus dem Fotokatodenmaterial austretenden, den Dunkelstrom bildenden Elektronen haben eine thermische Stoßenergie erhalten, welche die in der Größenordnung von einigen Volt liegende Austrittsarbeit der Katode überwindet. Entsprechend den statistisch verteilten Wahrscheinlichkeiten existieren auch zufällig einige thermisch beschleunigte Elektronen, die noch eine Beschleunigung in der Größenordnung von Kiloelektronenvolt haben

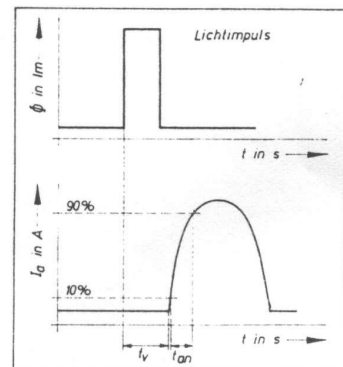


Bild 5: Schematische Darstellung des Impulsverhaltens von Fotovervielfachern

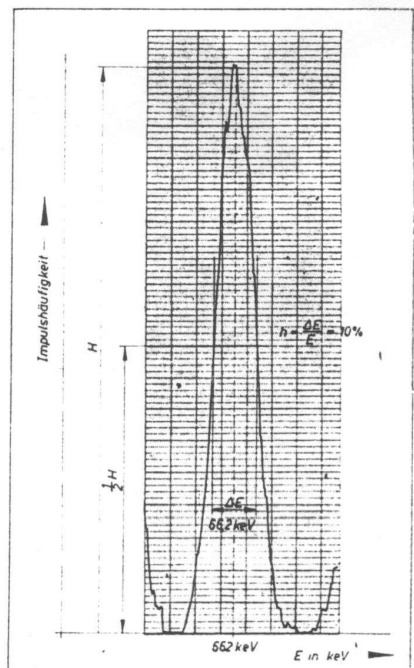


Bild 6: Kernspektrogramm des Caesium-Isotops $Cs 137$, aufgenommen durch einen Fotovervielfacher M 10 FS 29

und damit im Bereich kernspektrometrischer Energien liegen.

Daraus ergibt sich, daß bei quantitativer Darstellung (s. Bild 7) die Impulshäufigkeit zu höheren Energien hin laufend abnehmen muß.

Entsprechend den Prinzipien eines kernspektrometrischen Meßplatzes wird eine Impulsrate von 10 Impulsen je Sekunde definitionsgemäß festgelegt und die dazugehörige Energie abgelesen. Dieser Wert wird als Energieäquivalent E_{10} der Dunkelimpulse bezeichnet und repräsentiert als garantierter Parameter das Dunkelimpulsverhalten eines für die Kernspektrometrie geeigneten Fotovervielfachers. Das Dunkelimpulsverhalten eines Fotovervielfachers ist desto besser, je kleiner E_{10} ist. Das wiederum bedingt in der Kernspektrometrie den Nachweis von Elementen mit niedrigenergetischer Strahlung, ohne daß die bei diesen Energiewerten liegenden Spektrallinien schon durch die ansteigende Flanke des Dunkelimpulsrauschens beeinflusst werden. Das Energieäquivalent der Dunkelimpulse bei für Kernspektrometrie geeigneten WF-Fotovervielfachern beträgt $E_{10} = 4...11$ keV je nach Röhrentyp. Das heißt, es treten durchschnittlich 10 Impulse je Sekunde mit einer Energie von 4...11 keV auf.

3.3. Fotokatoden und Spektralkurven

Der Quotient aus Fotostrom und Strahlungsfluß in einem bestimmten Wellenlängenbereich $\Delta\lambda$ ist die spektrale Empfindlichkeit der Fotokatode. Beim normalen Fotoeffekt nimmt mit steigender Wellenlänge die Empfindlichkeit ab. Treten Maxima in der Empfindlichkeitskurve auf, liegt der selektive Fotoeffekt vor, der für alle Fotovervielfacherkatoden üblich ist.

3.3.1. SbCs-Katode

Eine universale Fotovervielfacher-Katode ist die Antimon-Caesium-Katode (SbCs). In der WF-Typenbezeichnung durch den Buchstaben S dargestellt, ist international (unabhängig von herstellergebundenen Typenbezeichnungen) die allgemeine Bezeichnung S 11 üblich.

Das Maximum der spektralen Empfindlichkeit liegt bei einer Lichtwellenlänge von etwa 450 nm, der Gesamtbereich der relativen Spektralempfindlichkeit liegt bei 320 bis 600 nm (Bild 8). Der Bereich der spektralen Empfindlichkeit ist der Wellenlängenbereich, in dem die relative spektrale Empfindlichkeit 10% des maximalen Wertes übersteigt.

Die Empfindlichkeitsbegrenzung zu kurzen Wellenlängen hin ist in der Ultraviolett-Absorption des normalen Kolbenglasses zu suchen.

3.3.2. SbCs-Quarz-Katode

Die erwähnte UV-Absorption wird verringert, wenn die SbCs-Katode auf ein Quarzglasfenster aufgedampft ist; in der WF-Typenbezeichnung durch QS gekennzeichnet (international S 13).

In diesem Fall ist die spektrale Empfindlichkeit 180...600 nm (Bild 9). Das Maximum der Empfindlichkeit liegt auf Grund der Eigenschaften des SbCs-Materials wieder bei etwa 450 nm. Zur Erzielung entsprechender UV-Empfindlichkeit ist auch die

Anwendung von synthetischem Kieselglas (SQ1 von VEB Schott & Gen., Jena) möglich. Es erfolgt eine Empfindlichkeitserweiterung im UV-Bereich gegenüber Quarzglas auf 160...170 nm; sie wird in der Typenbezeichnung mit V gekennzeichnet.

3.3.3. SbCs- V_1 -Katode

Die Kombination einer SbCs-Katode auf normalem Kolbenglas in Verbindung mit einer außen auf dem Kolben aufgetragenen Filterkombinationsschicht gestattet in der relativen spektralen Empfindlichkeit in Annäherung die Nachbildung der Empfindlichkeitskurve des hell adaptierten menschlichen Auges (V_1 -Verteilung). Mit diesem Fotovervielfacher (M 10 FS 29 V_1) erfolgen Messungen in der Fotometrie bzw. Lichttechnik, bei denen an Stelle des menschlichen Auges als objektive Strahlungsempfänger eine Röhre Anwendung findet.

Das Empfindlichkeitsmaximum liegt bei etwa 560 nm (gelbgrün) innerhalb eines Spektralbereiches von 510...620 nm (Bild 10).

3.3.4. AgCsO-Katode

Die Realisierung rot- und infrarotempfindlicher Fotokatoden verlangt auf Grund der physikalischen Gesetzmäßigkeit des allgemeinen Fotoeffektes Katodenmaterialien mit niedriger Austrittsarbeit, wobei der An-

teil dunkelstrombildender thermisch emittierter Elektronen zwangsläufig relativ groß wird.

Die Kombination von Silber und Caesium mit Sauerstoff ergibt die im Bild 11 dargestellte Spektralverteilung mit einem Empfindlichkeitsmaximum bei 800 nm und einer spektralen Bandbreite von 320...1000 nm. Gekennzeichnet wird diese Fotokatode international mit S1, in der WF-Nomenklatur erscheint der Buchstabe D.

3.3.5. SbKNaCs-Katode

Diese auch als Trialkali-Fotokatode bekannte Variante (Alkalimetalle K, Na und Cs) zeichnet sich durch hohe Quantenausbeute und damit hohe Empfindlichkeit, niedrigen Dunkelstrom und erhöhte Rotempfindlichkeit aus. Das Empfindlichkeitsmaximum liegt bei etwa 420 nm, und der insgesamt erfaßte Spektralbereich (Bild 12) liegt zwischen 320 und 760 nm.

Diese Katode wird vom VEB WF mit C, international mit S 20 bezeichnet.

3.3.6. SbKNaCs-Quarz-Katode

Durch Einsatz eines Quarzfensters erfährt die Trialkali-Katode eine Erweiterung ihres Empfindlichkeitsbereiches ins UV-Gebiet. Das Maximum liegt bei etwa 420 nm, der Gesamtbereich erstreckt sich von 180 bis 760 nm (Bild 13).

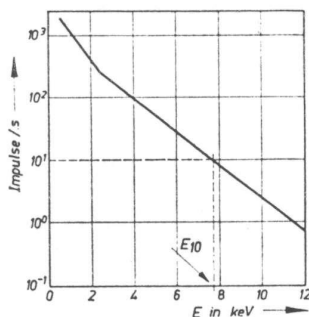


Bild 7: Impuls-Amplituden-Verteilung von Dunkelimpulsen eines Fotovervielfachers

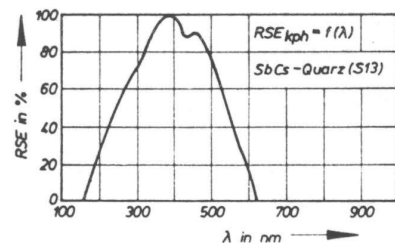


Bild 9: Relative Spektralempfindlichkeit einer SbCs-Quarz-Katode

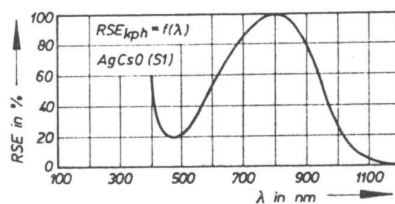


Bild 11: Relative Spektralempfindlichkeit einer AgCsO-Katode

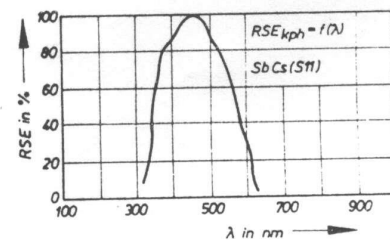


Bild 8: Relative Spektralempfindlichkeit einer SbCs-Katode

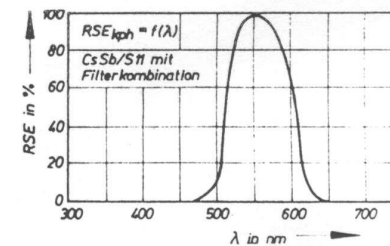


Bild 10: Relative Spektralempfindlichkeit des M 10 FS 29 V_1

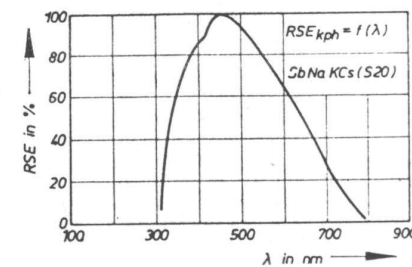


Bild 12: Relative Spektralempfindlichkeit einer Trialkali-Fotokatode

Die Kennzeichnung ist QS, international ist die Bezeichnung S 20 Q üblich. Bei Verwendung des schon erwähnten synthetischen Kieselglases (Typenbezeichnung VS (z. B. M 12 FVS 51)) wird die UV-Empfindlichkeit etwas erweitert (Bild 14). Als abschließender praktischer Hinweis zu diesem Kapitel sollen einige Aussagen zur äußerlichen Erkennbarkeit der einzelnen Fotokathodenarten erfolgen. Sämtliche Kathodenarten von WF-Fotovervielfachern sind durchscheinend, wobei folgende Farbtöne auftreten:

| | |
|--------------------------|----------------------------|
| SbCs-Katode (S, S 11) | rötlich-braun |
| AgCsO-Katode (D, S 1) | bläulich-violett |
| SbKNaCs-Katode (C, S 20) | gelb-braun, goldfarben. |

Röhren mit Quarzfenster (Q-Typen) sind äußerlich bei den sonst gleichen obengenannten Kathodenfarben an der aus mehreren Wülsten bestehenden Übergangszone zwischen normalem Kolbenglas und dem Quarzfenster erkennbar (bis auf AgCsO-Katode; wird nicht mit Quarzfenster geliefert).

Eine zusammenfassende Darstellung von Spektralkurven zeigt Bild 15 mit Angabe der absoluten Strahlungsempfindlichkeit in mA/W.

3.4. Angegebene Grenzwerte

Die angegebenen Grenzwerte sind absolute Werte. Sie dürfen auf keinen Fall überschritten werden, auch dann nicht, wenn einer der Grenzwerte nicht erreicht wird. Die Grenzwerte dürfen auch bei Netzspannungsschwankungen, durch Bauelementtoleranzen und Belastungsänderungen nicht überschritten werden, sonst erlischt jeder Garantieanspruch.

Als nicht zu überschreitende Grenzwerte werden üblicherweise die maximale Betriebsspannung $U_{b,max}$, die Arbeitstemperaturbereichsgrenzen (ϑ_{amb}) und bei einigen Typen der maximal zulässige Hellstrom $I_{h,max}$ angegeben.

Bei Röhren mit hoher Verstärkung (z. B. M 11 FVS 300) kann auch die Limitierung einer nicht zu überschreitenden Empfindlichkeit erfolgen. In diesem Fall darf dann die maximal zulässige Betriebsspannung bei Röhrenexemplaren mit hoher Verstärkung nicht voll ausgenutzt werden.

3.5. Nomenklatur der Typenbezeichnung

Der Typenschlüssel für Fotovervielfacher des VEB WF enthält Informationen über das Anwendungsgebiet, die Zahl der Dynoden, den Kathodentyp und den äußeren Durchmesser.

1. Element: Anwendungsgebiet
M = allgemeine Meßprobleme
S = Kerntechnik
P = Fotometrie
2. Element: Zahl der Dynoden
3. Element: Anordnung der Fotokathode
F = Frontkathode
4. Element: Strahlungseintrittsfenster
Q = Quarzglas
V = synthetisches Kieselglas
Normalglas ist nicht gekennzeichnet
5. Element: Kathodentyp
S = SbCs (S 11)
C = SbKNaCs (S 20)
D = AgCsO (S 1)

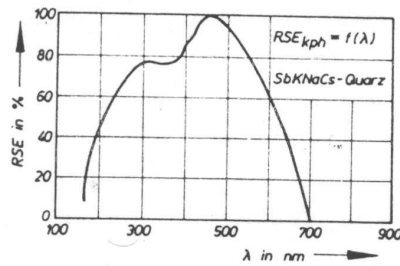


Bild 13: Relative Spektralempfindlichkeit einer SbKNaCs-Quarz-Katode

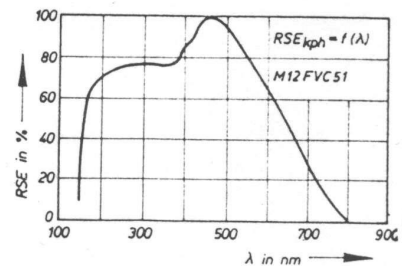


Bild 14: Relative Spektralempfindlichkeit des M 12 FVC 51

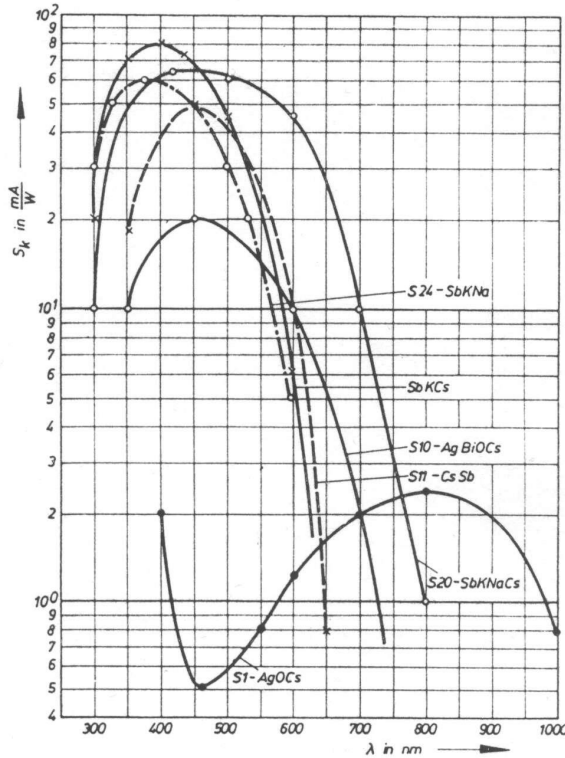


Bild 15: Absolute Strahlungsempfindlichkeit verschiedener Fotokathodenarten

6. Element: Äußerer Kolbendurchmesser in mm

Beispiel: M 12 F Q S 35

Seit 1976 folgt für neu- und weiterentwickelte Erzeugnisse nach der Bezeichnung des Fotokathodentyps eine dreistellige Zahl, deren erste zwei Ziffern den äußeren Kolbendurchmesser in mm angeben. Die

3. Stelle ist eine laufende Nummer (z. B. M 10 FS 300 oder M 11 FVS 300). Bei den Röhrentypen M 12 F 35 und M 10 F 29 ist aus der Nomenklatur die Kathodenart nicht ersichtlich. Bei diesen Röhren handelt es sich jeweils um Typen mit D-Katode, die jedoch geringere Empfindlichkeiten aufweisen als die Typen M 12 FD 35 und M 10 FD 29. *Wird fortgesetzt*

Aus unserem Fachbuchangebot

H. Töpfer und W. Kriesel

Funktionseinheiten der Automatisierungstechnik

540 Seiten, 446 Bilder, Leinen 40,- Mark, Bestellnummer 552 494 0

Im Buch wird die Gesamtheit der gerätetechnischen Mittel behandelt, die zur Lösung von Automatisierungsaufgaben erforderlich sind. Dazu wird die verwirrende industrielle Gerätevielfalt auf typische und wiederkehrende Funktionseinheiten zurückgeführt, die streng systematisch dargestellt werden.

Im einzelnen sind dies Funktionseinheiten für die Meßtechnik, die Informationsverarbeitung, die Stelltechnik sowie zur Kommunikation Mensch-Automat einschließlich der zugehörigen Hilfsenergieversorgung und Gefäßsysteme. Für diese Einheiten werden elektrische, pneumatische, hydraulische und mechanische Realisierungen mit analogen und diskreten/digitalen Signalen behandelt. Zugleich werden dabei Funktionseinheiten verschiedener Niveaus

(in Umfang und Kompliziertheit) erfaßt, die von Baugruppen (Bausteinen) für einfache Geräte bis hin zu solchen für Prozeßrechner und Mikroprozessoren reichen. Somit wird eine breite Palette überdeckt, auf deren Basis Automatisierungslösungen für die Klein-, Mittel- und Großautomatisierung möglich werden.

Den in der Praxis tätigen Ingenieuren, Entwicklern, Projektierungs- und Rationalisierungsfachleuten werden ausführliche Hinweise für die fachgerechte Instrumentierung, die Beurteilung angebotener Gerätetechniken bis hin zu Grundlagen für die Entwicklung von Automatisierungsgeräten gegeben. Für Lehrende und Studierende bietet die systematisierende Darstellung den direkten Anschluß an die bekannten Theorien der Automatisierungstechnik und somit lernökonomische Vorteile bei gleichzeitiger Integration von Steuerungstheorie und zugehöriger Gerätetechnik. Durch zahlreiche Bildtafeln wird zugleich der Charakter eines Nachschlagewerkes erreicht.

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Dipl.-Ing. JOACHIM KULLMANN
und Ing. HORST HARTIG

Mitteilung aus dem
VEB Werk für Fernsehelektronik Berlin

4. Schaltungstechnik

4.1. Stromversorgung

Um den von Dynode zu Dynode zunehmenden Elektronenstrom absaugen zu können, ist ein ständig steigendes Potential erforderlich, das aus einem parallel zu den Dynodenanschlüssen geschalteten Spannungsteiler gewonnen wird. Dieser selbst liegt normalerweise an einer einzigen, die Betriebsspannung U_b liefernden Stromversorgungseinheit.

Die Empfindlichkeit s_a eines Fotovervielfachers ist stark von der Betriebsspannung U_b abhängig (s. Bild 16).

Für einen n-stufigen Vervielfacher gilt für aus Betriebsschwankungen resultierenden Verstärkungsänderungen

$$\frac{dV}{V} = n \frac{dU_b}{U_b} \quad (5)$$

Wird demnach z. B. eine Verstärkungsschwankung von 10% zugelassen, darf bei einem zehnstufigen Vervielfacher die Betriebsspannung maximal nur 10% schwanken.

Aus dieser Tatsache leitet sich grundsätzlich der Einsatz elektronisch stabilisierter Netzgeräte ab. Entsprechend den Daten der WF-Fotovervielfacher muß die maximale Ausgangsspannung dieser Geräte 1,5 bis 2,0 kV bei einem Strom von etwa 3 bis 10 mA betragen. Zur Einstellung unterschiedlicher Anodenempfindlichkeiten bzw. zum Ausgleich von Exemplarstreuungen eines Röhrentyps sollte die Betriebsspannung regelbar sein.

Geeignet hierfür sind die Netzgeräte vom VEB Statron, z. B. TG 1006 (200...1000 V, 6 mA, 0,01% Instabilität), TG 2003 (400 bis 2000 V, 3 mA, 0,01% Instabilität), Gleichspannungsregler 0,25 - 2/0,1 (250...2000 V, 100 mA, 0,05%).

Die Wahl des Massepunktes der Betriebsspannung U_b kann normalerweise beliebig erfolgen. Aus schaltungstechnisch-praktischen Gründen wird aber der Pluspol der Betriebsspannung an Masse gelegt, so daß die Katode des Fotovervielfachers „hoch“

liegt. In diesem Falle erscheint am Ausgang der Röhre kein gegenüber Masse hohes Potential, was eine gefahrlose Bedienung angeschlossener Meßgeräte zur Folge hat, und es werden an die Spannungsfestigkeit der Eingänge anzuschließender Nachfolgeelektroniken keine hohen Ansprüche gestellt.

Andererseits liegt aber nun zwischen der Katode des Vervielfachers und allen an Masse geschalteten Teilen des Gesamtaufbaus ein hohes Potential, was zur Entstehung von Mikroüberschlägen führen kann, so daß ein zusätzlicher Störpegel am Fotovervielfacherausgang entsteht (Dunkelimpulse). Eine sorgfältig überprüfte Isolation (Kriechströme, Spitzenwirkung!) ist daher erforderlich.

4.2. Spannungsteilerdimensionierung

4.2.1. Teilströme im Spannungsteiler

Die für den Betrieb eines Fotovervielfachers erforderlichen Stufenspannungen werden, wie schon erwähnt, einem parallel zur Röhre liegenden Spannungsteiler (s. Bild 17) entnommen. Für den Verlauf der einzelnen Teilströme (technische Stromflußrichtung) gelten dabei folgende Überlegungen:

Die durch Belichtung aus der Katode K freigesetzten Elektronen fliegen zur ersten Dynode d_1 . Demzufolge fließt der Fotokathodenstrom I_k von d_1 nach K. Entsprechend dem mittleren Sekundäremissionsfaktor δ der Dynoden wird an d_1 der Strom δI_k ausgelöst, an d_2 der Strom $\delta^2 I_k$ usw. An der vorletzten Dynode d_{n-1} beträgt der Wert $\delta^{n-1} I_k$, und der Anodenstrom ist schließlich $\delta^n I_k$. Für die außerhalb der Röhre in den Dynodenzuleitungen meßbaren Ströme gilt dann:

$$\left. \begin{aligned} I_{d1} &= I_k(\delta - 1) \\ I_{d2} &= I_k(\delta - 1)\delta \\ I_{d3} &= I_k(\delta - 1)\delta^2 \\ I_{dn-1} &= I_k(\delta - 1)\delta^{n-2} \\ I_{dn} &= I_k(\delta - 1)\delta^{n-1} \\ I_a &= I_k\delta^n \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Bei sich ändernden Beleuchtungsstärken auf der Fotokathode verändern sich in gleichem Maße die einzelnen Dynodenströme und damit die Teilspannungsabfälle über den Widerständen R_1 bis R_{n+1} des Spannungsteilers trotz der stabilisierten Betriebsspannung, was zu entsprechenden Schwankungen der Dynodenpotentiale führt. Für ein stabiles und lichtproportionales Arbeiten des Vervielfachers sind aber möglichst konstante Dynodenpotentiale unbedingte Voraussetzung.

Praktisch erreicht wird diese Forderung, indem der bei unbelichteter Röhre in den Spannungsteiler fließende Querstrom etwa 50- bis 100mal größer als der auftretende Ausgangsstrom (Anodenstrom) des Vervielfachers gewählt wird. Dann sind die bei sich ändernden I_d -Werten auftretenden zusätzlichen Potentialschwankungen vernachlässigbar klein. Mit diesen Tatsachen liegen erste angenäherte Dimensionierungsregeln für den Spannungsteiler vor. Ist z. B. $U_b = 1000$ V, $I_a = 5 \mu A$, beträgt der Gesamtwiderstand des Spannungsteilers 2 M Ω . In erster Annäherung entfallen somit z. B. bei einem zehnstufigen Vervielfacher je Teilwiderstand $R \approx 200$ k Ω .

4.2.2. Wahl der Dynodenteilspannungen

Die eben genannten Größen sind nicht unbedingt einzuhaltende Werte. Gewisse Grenzen dürfen jedoch nicht überschritten werden. In diesem Zusammenhang ist das Sättigungsverhalten zwischen den Elektroden des Vervielfachers zu beachten.

Bild 18 zeigt den Verlauf des an der 11. Dynode gemessenen Hellstromes $I_{h(d11)}$ in Abhängigkeit von den zwischen den Dynoden 10 und 11 liegenden Teilspannungen bei dem Vervielfacher M 12 FS 35 (Parameter sind unterschiedliche Lichtströme). Dem Funktionsverlauf ist entnehmbar, daß die zwischen zwei Dynoden liegende Teilspannung etwa 90...120 V betragen sollte. In diesem Bereich wirken sich geringe Spannungsschwankungen auf die Proportionalität von Licht- und Signalstrom kaum aus. Der Bereich unter 90 V außerhalb des Sättigungsbereiches muß vermieden werden, da es wegen der abfallenden Dynodenkennlinien zu erheblichen Verzerrungen des zu übertragenden Signals kommt.

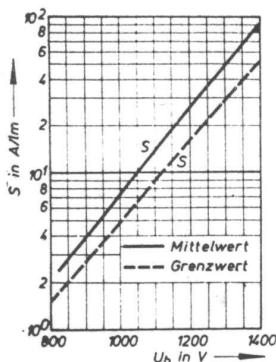
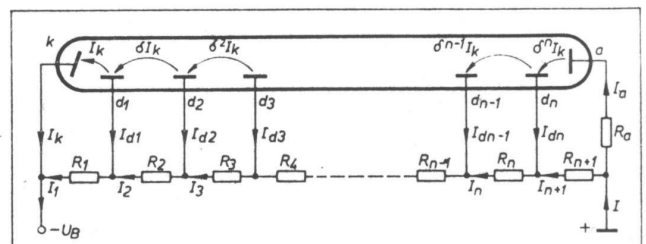


Bild 16: Abhängigkeit der Anodenempfindlichkeit (Verstärkung) des S 12 FS 35 von der Betriebsspannung

Bild 17: Spannungsteiler mit den auftretenden Teilströmen



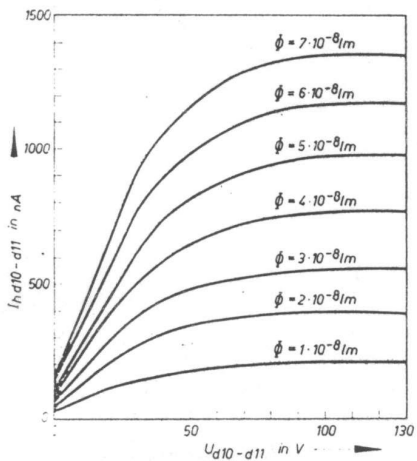


Bild 18: Sättigungsverhalten zwischen den Dynoden d_{10} und d_{11} eines M 12 FS 35

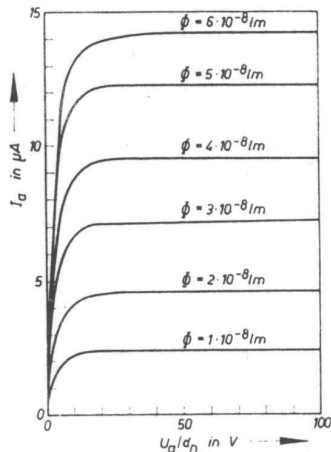


Bild 19: Sättigungsverhalten zwischen Anode und letzter Dynode eines M 12 FS 35

Beachtenswert ist in diesem Zusammenhang auch das in Bild 19 dargestellte Sättigungsverhalten zwischen der Anode und der letzten Dynode eines Vervielfachers (gemessen an einem M 12 FS 35). Wird mit einem Anodenwiderstand R_a (s. Bild 17) gearbeitet, darf der durch den Anodenstrom des Vervielfachers an diesem entstehende Spannungsabfall nicht so groß sein, daß die Sättigungsspannung zwischen Anode und letzter Dynode unterschritten wird. Nach Bild 19 beträgt diese Sättigungsspannung für die dargestellten Lichtstromwerte etwa 20...30 V. Bei höheren Anodenströmen (nahe Grenzwertbetrieb) verschiebt sich die Sättigungsspannung zu höheren Werten hin, so daß man bei $U_a - d_n = 40...50$ V mit Sicherheit in der Sättigung liegt. Dimensionierungsregeln für die Ausgangsgrößen des Vervielfachers (Höhe der Ausgangsspannung bzw. des Ausgangsstromes, Größe von R_a) sind damit gegeben.

4.2.3. Maximale Verstärkung im Gleichlichtbetrieb

Den allgemein üblichen Aufbau eines Spannungsteilers für einen Vervielfacher mit separater Steuerelektrode e_1 zeigt Bild 20, wobei es üblich ist, die an e_1 und d_1, e_2 liegenden Potentiale durch veränderliche Widerstände dem jeweiligen Röhrenexemplar optimal anzupassen.

Zur Darstellung der Wirkung des e_1 -Potentials liegt Bild 21 zugrunde. Mit kleiner werdendem Teilwiderstand R_1' steigt der Signalstrom I_s an und erreicht zwischen $R_1' = 0$ und $0,2 R$ sein Maximum.

Parallel dazu muß der im Bild 22 dargestellte Dunkelstromverlauf betrachtet werden, der bei etwa $R_1' = 0,6 R$ ein ausgeprägtes Maximum zeigt.

Im Interesse eines maximalen Signal-Dunkelstrom-Abstandes muß demnach das Gebiet zwischen etwa $R_1' = 0,4 R$ und $1,0 R$ gemieden werden. Zusammenfassend ergibt sich als günstigster Wert $R_1' \approx 0$ bis $0,2 R$. Der Gesamtwert des an e_1 liegenden Potentiometers ist $2R$, wobei zur Ermittlung der Funktionen in den Bildern 21 und 22 im gesamten Spannungsteiler $R = 100 \text{ k}\Omega$ war. Der hier angegebene Wert von R_1' ändert sich praktisch nicht bei Streuungen der einzelnen Röhrenexemplare.

Das an der Kombination d_1, e_2 liegende Potentiometer $R_2 = 2R$ wird bei jedem Röh-

renexemplar auf maximale Verstärkung der Röhre eingestellt. Im Gegensatz zum Potentiometer R_1 ergeben sich je nach Röhrenexemplar merkbar unterschiedliche Einstellwerte, so daß ein Richtwert bzw. -bereich nicht empfohlen werden kann.

Die Dimensionierung der weiteren Teilwiderstände des Spannungsteilers ist dem Bild 23 entnehmbar.

Die ermittelte Abstufung gilt für maximale Verstärkung im Gleichlichtbetrieb und weicht von den bisher veröffentlichten Daten über WF-Fotovervielfacher etwas ab (s. Bild 20). Die für diesen Fall bisher publizierten Werte (Festwiderstände mit $1,0 R$) können selbstverständlich unter Berücksichtigung eines geringen Verstärkungsverlustes auch benutzt werden.

4.2.4. Wechsellichtbetrieb

Wird die Fotokatode des Vervielfachers impulsförmigen Belichtungsvorgängen ausgesetzt, treten in den Dynodenzuleitungen der Röhre proportionale Stromimpulse auf, die besonders in den letzten Stufen so hoch sein können, daß die Dynodenpotentiale im gleichen Maße erheblich schwanken. Damit ist die Forderung nach möglichst guter Konstanz der Stufenspannungen nicht mehr erfüllt. Eine entsprechende Erhöhung des Spannungsteilerquerstromes ist wegen des dann unverhältnismäßig wachsenden Aufwandes bei den Hochspannungsnetzgeräten äußerst unwirtschaftlich.

Die einfachste Lösung liegt in der Überbrückung der drei bis vier letzten Stufen des Vervielfachers mit Kondensatoren (s. Bild 23). Die gespeicherte Kondensatorladung liefert die geforderten Ströme während der Impulsdauer. Je höhere Ströme nötig sind, um so größer muß der Kapazitätswert sein, wobei folgende Dimensionierungsrichtlinie gilt:

$$C_n \geq 2 \cdot 10^{-7} I_a \quad (7)$$

C_n = Kapazität in F
 I_a = Anodenstrom im A

In den vorhergehenden Stufen können demzufolge die parallel liegenden Kapazitätswerte jeweils entsprechend dem Ausdrück

$$C_{n-1} \geq \frac{C_n}{\delta} \quad (8)$$

kleiner werden.

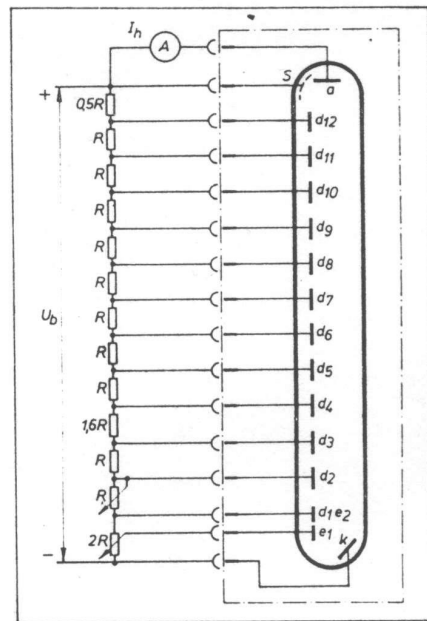


Bild 20: Spannungsteiler für einen Fotovervielfacher mit separater Steuerelektrode e_1

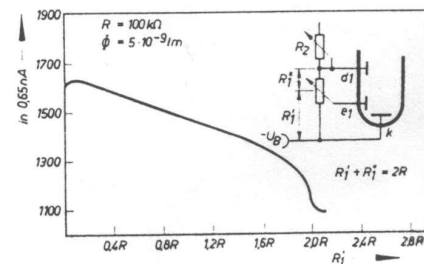


Bild 21: Einfluß des e_1 -Potentials auf den Verlauf des Signalstromes I_s

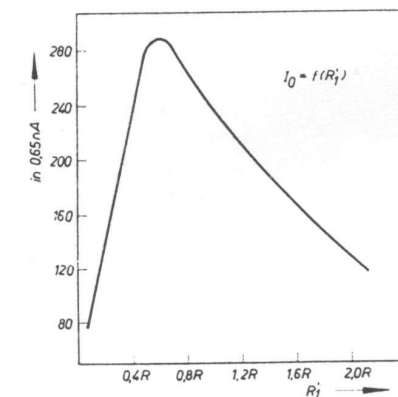


Bild 22: Einfluß des e_1 -Potentials auf den Verlauf des Dunkelstromes I_d

In Gl. (8) ist δ der mittlere Sekundäremissionsfaktor der Dynoden. Für das in WF-Röhren vorwiegend eingesetzte Al-Mg-Dynodenmaterial gilt $\delta \approx 4$.

Allerdings muß die bei den kapazitiv überbrückten Spannungsteilerwiderständen entstehende Zeitkonstante des gebildeten RC-Gliedes Beachtung finden, welche dann der maximal verarbeitbaren Impulsfrequenz eine Grenze setzt. Allgemein gültige Werte sind nicht angebar, Kompromißlösungen müssen je nach Erfordernissen im jeweiligen Fall gefunden werden. Die erforderlichen Kapazitätswerte liegen zwischen 100 pF und einigen Nanofarad.

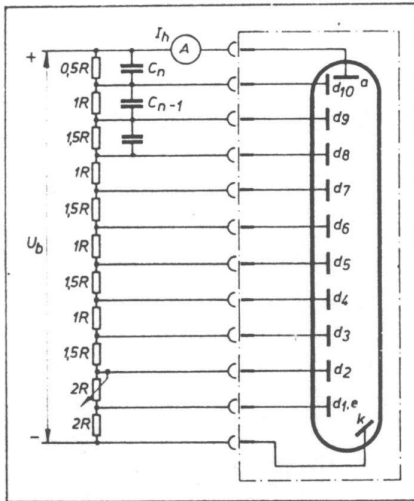


Bild 23: Spannungsteiler für Impulsbetrieb

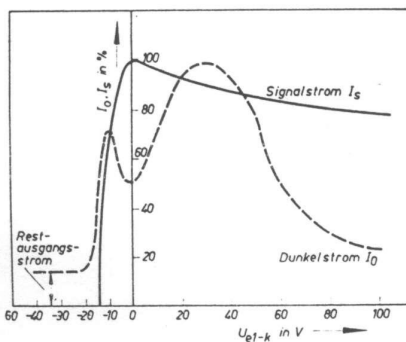


Bild 24: Signal- und Dunkelstromverlauf in Abhängigkeit von der U_{e1}/k -Spannung

Der Spannungsteiler kann neben den bisher geschilderten Möglichkeiten auch nach anderen Gesichtspunkten optimiert werden, z. B. Kurzzeitverhalten und Erweiterung des Proportionalitäts- bzw. Linearitätsbereiches zu hohen Strömen. Da aber das WF-Fertigungsprogramm Röhren mit ausgeprägtem Kurzzeitverhalten und mit hoher Impulsbelastbarkeit nicht enthält, erfolgen hierzu keine weiteren Betrachtungen.

4.2.5. Einfluß der Steuerelektrode e_1

Die Steuer- oder Fokussierelektrode wurde schon erwähnt, wobei nicht alle Fotovervielfacher eine solche Elektrode enthalten (mit e_1 -Elektrode sind ausgerüstet: M 12 FS 52 A, S 12 FS 52 A, P 12 FS 52 A, M 12 FC 51, M 12 FQC 51, M 12 FVC 51, P 12 FQ 51, M 12 FQ 51, M 12 FS 35, S 12 FS 35, M 12 FQS 35, M 12 FD 35 und M 12 F 35). Weiterhin ist auch schon auf die Einstellung des e_1 -Potentials im normal üblichen Fotovervielfacherbetrieb eingegangen worden.

Darüber hinaus kann mit der e_1 -Elektrode das Röhrensystem gesperrt oder auch getastet werden, und weiterhin ist eine elektronenoptische Ausblendung nicht genutzter Katodenrandgebiete zur Vergrößerung des Signal-Dunkelstrom-Abstandes in speziellen Fällen möglich.

Sperrung des Röhrensystems

Durch Anlegen eines gegenüber der Kathode negativen Potentials an die Elektrode e_1 kann das Röhrensystem gesperrt werden.

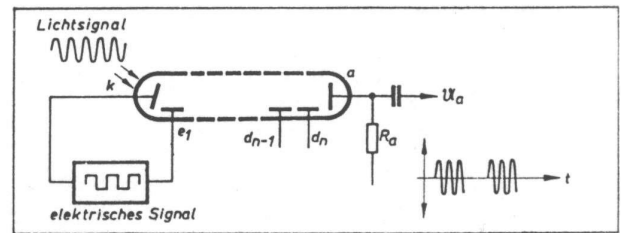


Bild 25: UND-Verknüpfung zweier Signale mit einem Fotovervielfacher

Entsprechend der Darstellung im Bild 24 ist dazu im untersuchten Beispiel (M 12 FS 52) eine Spannung von etwa 15 V negativer Polarität gegenüber der Kathode erforderlich. Diese Spannung kann einer separaten Spannungsquelle entnommen werden. Selbstverständlich ist in diesem Fall nur der auf der Kathode ausgelöste Signalstrom mit dem Katoden-Dunkelstromanteil null, während die Dunkelstromanteile aller hinter e_1 liegenden Dynoden sowie andere Dunkelstromkomponenten einen nicht vermeidbaren Restausgangsstrom bilden. Aus der Tatsache der Sperrung des Röhrensystems ist die Möglichkeit der Tastung bzw. die Überlagerung von zwei Signalen mit einem Fotovervielfacher ableitbar. Eine für besondere Anwendungsfälle erforderliche UND-Schaltung ist nach Bild 25 denkbar, wobei optische und elektrische Informationen verknüpfbar sind.

Am Ausgang des Vervielfachers entsteht nur dann ein Signal, wenn das Licht auf der Kathode und ein Tastsignal entsprechender Höhe und Polarität an e_1 gleichzeitig auftreten. Bild 26 zeigt eine Schaltung zur Erzeugung gegenüber der Kathode positiver und negativer e_1 -Potentiale ohne zusätzliche Spannungsquelle durch Einfügung eines Katodenwiderstandes R_k in die Katodenleitung des Fotovervielfachers, wie es von üblichen Elektronenröhrenschaltungen her bekannt ist.

Dunkelstromausblendung nicht genutzter Katodenrandgebiete

Es gibt Anwendungen, bei denen nicht die gesamte nutzbare Fläche der Fotovervielfacher-Kathode vom Lichtstrom getroffen wird. In diesem Fall treten aus den nichtbelichteten Katodengebieten trotzdem weiterhin thermisch beschleunigte Elektronen aus, die durch das Röhrensystem vervielfacht werden und damit zum Ausgangsdunkelstrom beitragen.

Durch Beeinflussung des elektronenoptischen Eingangssystems mit Hilfe der Steuerelektrode e_1 ist es möglich, die Dunkelstromemission der nicht ausgenutzten Randgebiete der Fotokathode zu reduzieren, wodurch sich der Signal-Dunkelstrom-Abstand am Röhrenaussgang verbessert. Wegen des rotationssymmetrischen Aufbaus des Eingangssystems ist der Ausblendeffekt nur wirksam nutzbar, wenn der auf die Kathode treffende Lichtfleck symmetrisch auf der Katodenfläche liegt. Weiterhin ergaben Untersuchungen, daß wegen nicht vermeidlicher Übersprecheffekte im elektronenoptischen Eingangssystem der Effekt der Dunkelstromabstandsvergrößerung nur bei Lichtfleckgrößen $< 10\%$ der Gesamtkathodenfläche auftritt. Andernfalls zeigt sich bei Änderung des e_1 -Potentials außer der Dunkelstromabsenkung auch schon eine spürbare und unerwünschte Signalstromverkleinerung.

Konkrete Untersuchungen erfolgten an einem Exemplar des M 12 FS 52, der mit einem nutzbaren Fotokatodendurchmesser von 42 mm propagiert wird.

Bild 27 zeigt in Abhängigkeit von der Spannung zwischen der Steuerelektrode e_1 und der Kathode des Fotovervielfachers den Verlauf von Signal- und Dunkelstrom, wobei die Fotokathode auf einer zentrisch liegenden kreisförmigen Fläche von 10 mm Durchmesser beleuchtet wird (entspricht etwa 6% der maximal nutzbaren Fotokatodenfläche). Deutlich ist erkennbar, daß bei Potentialen $e_1 - k > 130$ V der Signal-Dunkelstromabstand günstiger als bei der sonst üblichen Einstellung von $e_1 \approx 0$ V wird. Der Signal-Dunkelstromabstand kann um fast das Doppelte verbessert werden. Eine Untersuchung zu negativen e_1/k -Werten erfolgte nicht, da hier Signal- und Dunkelstrom sehr schnell auf Null absinken (s. a. Bild 24).

Die Ausnutzung dieser Tatsache ist, nur sinnvoll, wenn der Signalstrom in der Größenordnung des Dunkelstromes liegt; andernfalls macht sich der Effekt kaum noch bemerkbar. Gleichfalls wurde festgestellt, daß mit kleiner werdender Betriebsspannung und größer werdendem Flächenanteil des bestrahlten Katodengebietes oder bei höher gewähltem Lichtstrom der Effekt der Dunkelstromausblendung nicht genutzter Katodenrandgebiete immer schwächer ausgeprägt ist. Daher erscheint es empfehlenswert, im erforderlichen Fall die Einstellbedingungen empirisch zu optimieren.

4.2.6. Praktische Hinweise zum Aufbau des Spannungsteilers

Es ist empfehlenswert, die Widerstände unmittelbar an der Röhrenfassung freitragend zu verlöten. Eine Anordnung auf Platinen oder Lötösenleisten sollte vermieden werden, da sonst die sehr hohen Isolationswiderstände des für die Röhrenfassungen verwendeten Spezialmaterials unausgenutzt bleiben. Andernfalls steigt der Dunkelstrom durch die Isolationsstromkomponente unerwünscht an. Aus diesem Grunde sind auch Lötmitelreste von der Röhrenfassungsoberfläche sorgfältig zu entfernen (Abwaschen mit reinem Alkohol). Für den Spannungsteiler sind Widerstände hoher Qualität bezüglich Langzeittoleranz zu wählen. Für hohe Ansprüche sollten Metallschichtwiderstände angewendet werden, die sich gegenüber Kohleschichtwiderständen vorteilhaft auch durch einen niedrigen Rauschpegel auszeichnen.

Die durch Verlustleistung im Spannungsteiler entstehende Wärme muß ggf. Beachtung finden, wenn dabei besonders die Katodenfläche zusätzlich erwärmt wird. Dadurch steigt die thermische Komponente des Dunkelstromes unerwünscht. Ein insgesamt sorgfältiger und sauberer Aufbau des Spannungsteilers ist erforderlich, um Dun-

kelstromspitzen und -schwankungen durch Kriechströme, Mikroüberschläge und Spitzenwirkung insbesondere auch bei hohen Luftfeuchtwerten und beim Betrieb in der Nähe der Spannungsgrenzwerte ($U_{b,max}$) zu vermeiden.

4.3. Dunkelstrom

Der Dunkelstrom I_0 eines Fotovervielfachers ist definiert als die Gleichstromkomponente des Störstromes, die bei unbelichteter Fotokatode und bei einer bestimmten Betriebsspannung an der Anode des Vervielfachers nachweisbar ist. Für die sich an die Anode anschließenden Nachfolge- bzw. Auswerteschaltungen können die Gleichstromkompo-

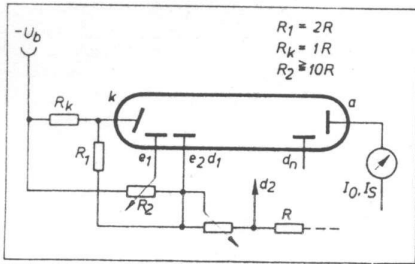


Bild 26: Erzeugung eines gegenüber der Katode negativen e_1 -Potentials mit einem Katodenwiderstand R_k

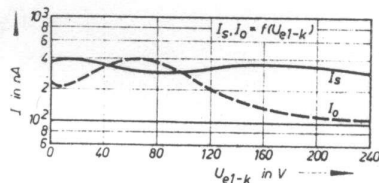


Bild 27: Signal-Dunkelstrom-Abstand in Abhängigkeit von der Spannung U_{e1-k}

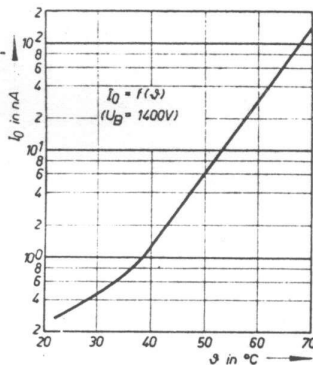


Bild 28: Temperaturabhängigkeit des Dunkelstromes bei einem Exemplar des M 12 FC 51

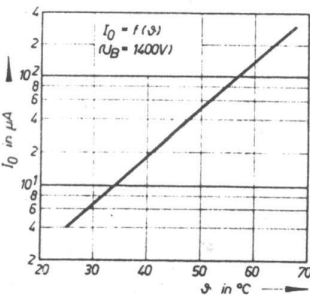


Bild 29: Temperaturabhängigkeit des Dunkelstromes bei einem Exemplar des M 12 FD 35

nente, der Rauschanteil oder einzeln herausragende Impulse des Dunkelstromes (Dunkelstrompeaks) von störender Bedeutung sein.

In den folgenden Punkten werden die einzelnen Dunkelstromursachen näher behandelt.

4.3.1. Thermische Emission

Der größte Teil des Dunkelstromes entsteht durch die unerwünschte thermische Emission der Fotokatode und einen vergleichsweise dazu geringen Teil der thermischen Emission der Dynoden. Wegen der Emissionsursache liegt eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit vor, deren funktioneller Verlauf z. B. den Bildern 28 und 29 entnehmbar ist. Bild 28 zeigt die Temperaturabhängigkeit des Dunkelstromes an einem Exemplar des M 12 FC 51 bei Temperaturen über $+20^\circ\text{C}$ (S-20-Katode).

Den naturgemäß wesentlich höheren Dunkelstrom von S-1-Katoden und seine Temperaturfunktion zeigt Bild 29, ermittelt an einer Röhre M 12 FD 35.

Bedingt durch den physikalischen Mechanismus der Thermoemission ist die Temperaturabhängigkeit des Dunkelstromes unbeeinflusst von der Katodenart. Diese Tatsache kommt in einer normierten Darstellung

$$\frac{I_0}{I_0(20^\circ\text{C})} = f(\theta)$$

nach Bild 30 zum Ausdruck.

Aus dieser Funktion ist die wichtige praktische Feststellung entnehmbar, daß bei einer Temperaturerhöhung von 10 K der thermische Dunkelstrom unabhängig von der Katodenart um das Drei- bis Vierfache ansteigt.

Da die von der Katode emittierte thermische Dunkelstromkomponente im Vervielfachersystem verstärkt wird, ist ihre Spannungsabhängigkeit besonders groß. Allgemein bedeutet eine zehnpromzentige Betriebsspannungserhöhung etwa eine Verdoppelung des Dunkelstromes. Aus diesem Grunde sollte die Betriebsspannung nur so hoch wie nötig gewählt werden (vergleichsweise steigt der durch Isolationsströme verursachte Dunkelstromanteil mit der Betriebsspannung nur proportional an).

Im Bild 31 ist am Beispiel des M 12 FS 52 A dieser Verlauf dargestellt (ausgezogene Kurve \triangleq typischer Mittelwert; gestrichelte Kurve \triangleq maximaler Grenzwert, der bei der Auslieferung nicht überschritten wird).

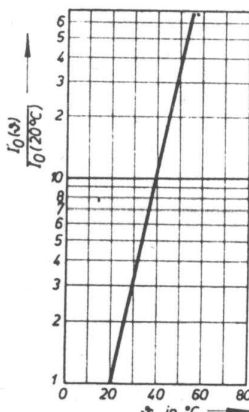


Bild 30: Normierte Dunkelstrom-Temperaturfunktion

Bild 31: Abhängigkeit des Dunkelstromes des M 12 FS 52 A von der Betriebsspannung

Ist in speziellen Fällen ein möglichst großer Signal-Dunkelstromabstand erforderlich, kann die Fotokatode mit festem Kohlendioxid gekühlt werden, was insbesondere bei Röhren mit S-1-Katoden und ihrem naturgemäß hohen Dunkelstrom erforderlich ist.

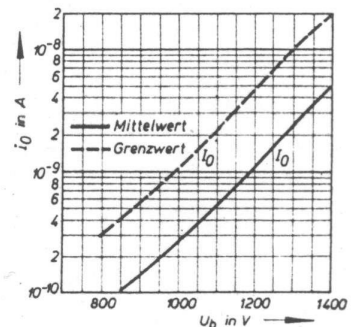
Aus diesem Grunde werden auf besondere Bestellung als Röhrenzubehör spezielle Kühlköpfe geliefert. Sie nehmen eine Patrone aus festem Kohlendioxid (Trockeneis) auf, die in einem dazugehörigen Stampfgefäß hergestellt wird. Die durch Verdampfung des Kohlendioxides sich verkleinernde CO_2 -Masse wird durch eine Feder ständig in Richtung Fotokatode weitergeschoben und gewährleistet dadurch eine etwa zwei-stündige Kühlung der Fotokatode. Beim Arbeiten an offener Atmosphäre tritt jedoch allgemein nach kurzer Zeit durch Kondensation der Luftfeuchtigkeit ein Beschlagen des Katodenfensters auf, und der Wasserniederschlag an der Röhre kann zu unerwünschten Kriechströmen führen. Ein Betrieb im abgeschlossenen Raum mit entsprechend getrockneter Luft macht sich dann erforderlich. Der damit insgesamt hohe Aufwand dürfte nur in einzelnen Sonderfällen gerechtfertigt sein.

Dem Bild 32 ist der konstruktive Aufbau des Kühlkopfes entnehmbar. In zwei Ausführungen ist er zur Aufnahme von Fotovervielfachern bis zu maximal 35 mm Durchmesser geeignet. Weiterhin ist eine Kühlung der Fotokatode mit entsprechenden Peltier-Elementen oder auch mit verflüssigten Gasen möglich.

4.3.2. Isolationsströme

Einen weiteren merklichen Anteil am Dunkelstrom bilden die Isolationsströme, wobei von der Anwendungstechnik her die außerhalb des Fotovervielfachers entstehenden Isolationsstromkomponenten beeinflussbar sind.

Entsprechende Fertigungstechnologien und ein geeigneter konstruktiver Aufbau des Röhrensystems stellen hohe Anforderungen zur Einhaltung möglichst niedriger Isolationsstromanteile innerhalb der Röhre, da von den verwendeten Alkalimetallen insbesondere das Caesium schon bei erhöhten Umgebungstemperaturen stärker zu verdampfen beginnt und leitende Verbindungen zwischen den Röhrenelektroden herstellt. Bei unbelichteter und nicht an Betriebsspannung liegender Röhre betragen die inneren Isolationswiderstände etwa 10^{10} bis $10^{12} \Omega$.



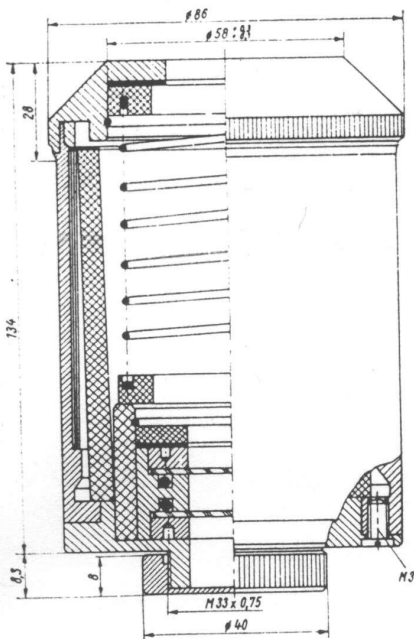


Bild 32: Konstruktion des Kühlkopfes

Bild 33: Anodenstrom-Einlaufverhalten an einem Exemplar M 12 FS 35

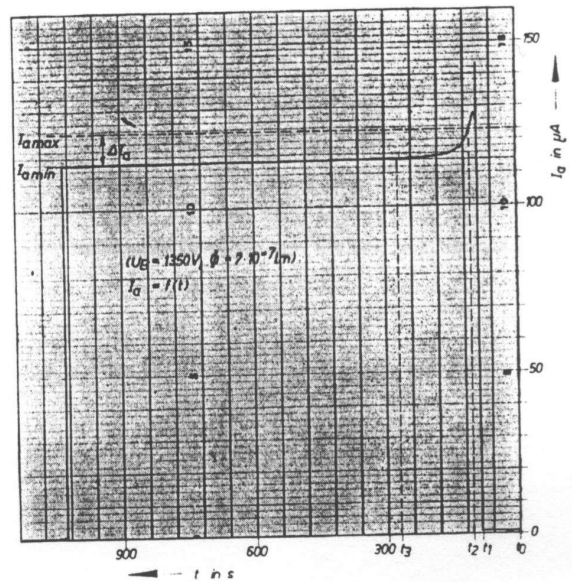


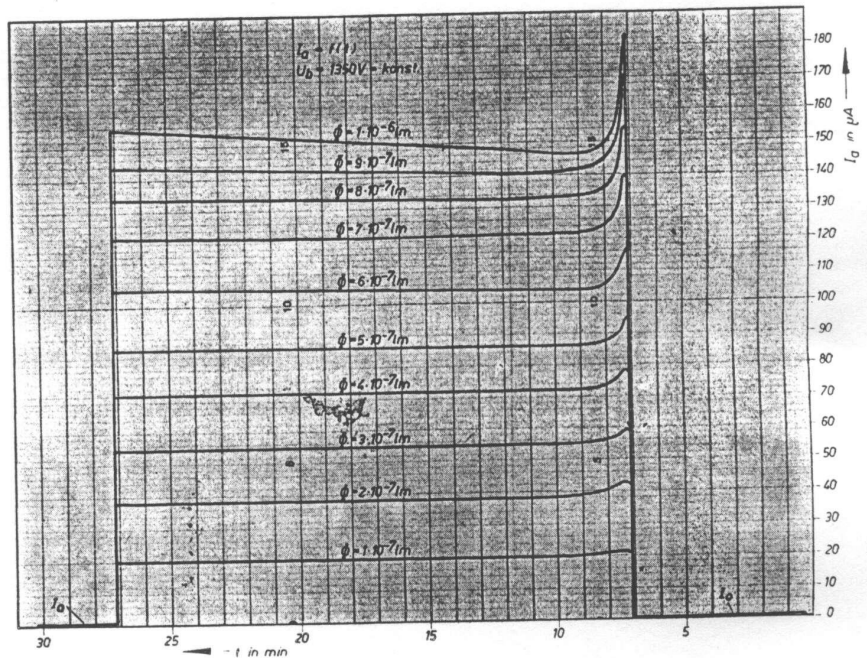
Bild 34: Anodenstrom-Einlaufverhalten in Abhängigkeit von der Dynodenbelastung

Damit ist ein Maßstab für die außerhalb der Röhre nicht zu unterschreitenden Isolationswiderstände gesetzt, wenn auf minimal möglichen Dunkelstrom Wert gelegt wird.

Die Verwendung entsprechender Spezialfassungen und deren Reinigung (insbesondere nach Lötarbeiten) wurde schon erwähnt. Bei höheren Anforderungen ist auch eine Säuberung des Röhrenfußes im Gebiet der Elektrodendurchführungen mit reinem Alkohol nötig. Selbst geringste Feuchtigkeitniederschläge können den Isolationsstrom – und damit den Dunkelstrom – spürbar erhöhen. Daher ist bei hohen relativen Feuchtewerten der Umgebungsluft ein Anblasen von Fassung und Röhrenfuß mit vorgewärmter Luft in machen Fällen empfehlenswert. Röhren, die zeitweise oder ständig bei hoher relativer Luftfeuchte betrieben werden müssen, sind am Fuß mit einer wasserabweisenden Schicht (Hydrophobierung) versehen (z. B. M 10 FS 300). Da der Isolationsstrom von der Verstärkung der Röhre unabhängig ist, liegt nur Proportionalität zur Betriebsspannung vor.

4.3.3. Ionenstrom

Da jedes elektronische Vakuumbauelement (also auch Fotovervielfacher) unvermeidliche Restgasmoleküle enthält, kommt es bei Überschreitung der entsprechenden Ionisationsspannungen zur Ionisierung dieser Restgasmoleküle. Die dann vorhandenen positiven und negativen Ionen wandern zu den Elektroden entsprechender Polarität und lösen bei ihrer Rekombination dort zusätzliche unerwünschte Ströme aus. Bei hohen Spannungen ist die kinetische Energie der Ionen so groß, daß aus den getroffenen Elektroden außerdem zusätzliche Elektronen freigesetzt werden können. Diese Ladungsträgerbewegungen sind eine weitere, nicht vernachlässigbare Dunkelstromkomponente, die sich insbesondere beim Betrieb des Fotovervielfachers in der Nähe der maximal zulässigen Betriebsspannung bemerkbar macht. In ungünstigen Fällen (Überschreitung von $U_{b,max}$, Verschlechterung des Restvakuums



durch unsachgemäße Röhrenbehandlung) kann es durch lawinenartiges Ansteigen parasitärer Ladungsträger im Inneren der Röhre zum sogenannten „Durchzünden“ kommen (impulsartiger Anstieg des Ausgangsstromes auf sehr hohe Werte). Im Extremfall ist die Röhre dann unbrauchbar, oder es ist nur noch ein Betrieb bei reduzierter Spannung mit einem solchen Röhrenexemplar möglich.

4.3.4. Weitere Dunkelstromursachen

Zwei weitere Dunkelstromursachen sind die natürliche Radioaktivität des Kolbenglases und die Lichtrückkopplung durch parasitäre Szintillationen.

Obwohl beide Komponenten äußerst geringe Dunkelstromanteile liefern und nur durch die Röhrenkonstruktion – also nicht vom Anwender – beeinflussbar sind, sollen sie erwähnt werden. Das für die Röhren verwendete Kolbenglas enthält Kaliuman-

teile, die zu etwa 0,01% aus dem radioaktiven Kaliumisotop K 40 bestehen. Die beim Zerfall dieses Isotops freiwerdende äußerst geringe Dosis an β - und γ -Strahlung ist schon ausreichend, die Zahl der Dunkelimpulse nachweisbar zu erhöhen. Wie sorgfältig die Fertigungsüberwachung bei der Herstellung von Fotovervielfachern u. a. vorgehen muß, kommt in der Tatsache zum Ausdruck, daß unter Umständen bestimmte Glas-Chargen wegen eines zu hohen Anteils natürlicher Radioaktivität verworfen werden müssen.

Je nach konstruktivem Aufbau der Röhre können einige Elektronen das Vervielfachersystem ungewollt verlassen und auf die Innenwand des Glaskolbens treffen, wo sie parasitäre Szintillationen auslösen. Gelangen die dabei entstehenden Lichtquanten auf die Fotokathode, entstehen zusätzliche, unerwünschte Signale, die einerseits als Dunkelstrombeitrag aufzufassen sind und

andererseits bei Kurzzeitimpulsanwendungen zu störenden Nachimpulsen im Ausgangssignal führen können.

In diesem Zusammenhang soll die als unerwünscht auftretende Komponente der Feldemission nicht unerwähnt bleiben. Der dadurch ausgelöste Dunkelstromanteil ist praktisch vernachlässigbar klein, muß aber bei der Röhrenkonstruktion Berücksichtigung finden, indem Spitzen oder scharfe Kanten im Systemaufbau der Röhre vermieden werden (erhöhte Feldstärke durch Spitzenwirkung!).

4.4. Stabilitätsverhalten von Fotovervielfachern

Insbesondere bei Gleichlichtbetrieb und analoger Signalverarbeitung ist das Stabilitätsverhalten der Röhren im Zusammenhang mit der Auswertung der erzielten Meßergebnisse unbedingt zu beachten. Mit Instabilitäten sind naturgemäß mehrere Parameter von Fotovervielfachern behaftet, die im folgenden näher dargestellt werden.

4.4.1. Einlaufverhalten des Anodenstromes

Bei Beaufschlagung eines Fotovervielfachers mit einem Lichtsignal nach einer Dunkelpause ist allgemein feststellbar, daß der Anodenstrom, ausgehend von einem etwas höheren Anfangswert, sich erst asymptotisch nach gewisser Zeit auf einen stabilen Endwert einstellt (unter Voraussetzung konstanten Lichtstromes).

Die Ursache dafür liegt in nicht vermeidbaren temporären Veränderungen von Oberflächeneigenschaften der Dynoden, wobei die Stromdichte und das Dynodenmaterial für die Stärke dieses Einlaufeffektes ausschlaggebende Parameter darstellen.

Bild 33 zeigt dieses Verhalten, gemessen unter entsprechenden Bedingungen an einem Exemplar M 12 FS 35. Nach der Dunkelpause t_0 bis t_1 wird die Fotokatode vom Zeitpunkt t_1 an konstant beleuchtet, und der Anodenstrom hat zum Zeitpunkt t_3 erst seinen stabilen Endwert erreicht.

Da, wie schon erwähnt, dieser Effekt stark von der Elektronendichte auf den Dynodenoberflächen abhängt, ist eine Verminderung des Einlaufverhaltens durch den Betrieb der Röhre mit möglichst niedrigen Strömen möglich. Ein mehr oder minder vernachlässigbares Einlaufen liegt allgemein vor, wenn bei Fotovervielfachern mit Boxdynoden auf Al-Mg-Basis mit Anodenströmen unter $5 \cdot 10^{-7}$ A gearbeitet wird. Das daraus ableitbare verstärkte Auftreten des Einlaufeffektes mit zunehmender Dynodenbelastung ist an einem Beispiel im Bild 34 unter Auswertung entsprechender Messungen dargestellt. (Die verschiedenen Strombelastungen der Dynoden wurden bei konstanter Betriebsspannung durch unterschiedliche Lichtströme im Bereich von $1,0 \cdot 10^{-7}$... $1,0 \cdot 10^{-6}$ Im realisiert.)

Neben der anwendungstechnischen Beeinflussung des Einlaufverhaltens ist dieser Effekt auch von der Röhrentechnologie bzw. -konstruktion wesentlich abhängig, weshalb das Dynodenmaterial und der Dynodenaufbau von ausschlaggebender Bedeutung sind. Bezüglich des Dynodenmaterials zeigt gegenüber den universell eingesetzten AlMg-Dynoden der M 10 FS 28 mit Berylliumdynoden eine vergleichsweise ver-

besserte Anodenstromkonstanz. Im Rahmen der weiteren Entwicklung ist der neue Fotovervielfacher M 11 FVS 300 mit SbCs-Sekundäremissionsschichten versehen, die durch noch bessere Stabilitätseigenschaften gekennzeichnet sind. Dadurch ist es erstmalig möglich, diesen Fotovervielfachertyp mit garantierten Werten bezüglich des Einlaufverhaltens zu liefern.

Die quantitative Erfassung des Anodenstromeinlaufverhaltens kann unter Berücksichtigung des Bildes 33 nach Gl. (9) erfolgen:

$$s = \frac{I_{a \max} - I_{a \min}}{I_{a \max} + I_{a \min}} 100 \text{ (in \%)} \quad (9)$$

Auf der Basis der in den Bildern 33 und 34 dargestellten Funktionsverläufe legt man im Zusammenhang mit Gl. (9) den Zeitraum t_1 bis t_2 ($\rightarrow I_{a \max}$) in die Größenordnung einiger Sekunden, und der Zeitpunkt t_3 ($I_{a \min}$) bewegt sich im Bereich von etwa zwei Minuten. Innerhalb dieser Bedingungen liegen beim M 11 FVS 300 die nach Gl. (9) ermittelten Werte unter 1,5 %.

4.4.2. Einlaufverhalten des Dunkelstromes

Fotovervielfacher, die vor der Inbetriebnahme dem Tageslicht oder vergleichbaren anderen Beleuchtungsstärken ausgesetzt waren, zeigen nach dem Einschalten einen stark erhöhten Dunkelstrom, der durch das Vorhandensein angeregter Zustände in der Atom- bzw. Molekularstruktur des Fotokathodenmaterials verursacht wird. In dem Maße, wie diese angeregten Zustände bei Lichtabschluß bzw. Stromfluß abgebaut werden, nähert sich der Dunkelstrom abfallend asymptotisch einem stabilen Endwert, der auch üblicherweise der Nennwert des jeweiligen Röhrenexemplars ist.

Bild 35 zeigt eine solche Dunkelstromeinlaufkurve, gemessen an einem Exemplar des Typs M 12 FS 35. Aus diesem Verhalten leitet sich die Forderung ab, Fotovervielfacher vor der eigentlichen Inbetriebnahme mindestens 15 Minuten im Dunkeln bei etwa 75 % der Betriebsspannung „einzubrennen“.

Das Dunkelstromeinlaufverhalten ist exemplarisch erheblichen Schwankungen unterworfen. Es kann durchaus möglich sein, daß insbesondere bei sehr starker Vorbelichtung im Einzelfall Einlaufzeiten bis zu 24 Stunden auftreten. Demzufolge ist es auch empfehlenswert, Fotovervielfacher möglichst unter Lichtabschluß zu lagern.

Das Dunkelstromeinlaufverhalten tritt nicht auf, wenn sich die Röhre vor dem Einschalten ausreichend lange im Dunkeln befunden hat. Bild 36 zeigt diesen Sachverhalt. Ein M 12 FS 35 wurde nach 15 h Lichtabschluß wieder eingeschaltet. Die auf der Fotokathode möglichen bzw. üblichen Lichtströme von etwa 10^{-11} ... 10^{-6} Im beeinflussen den Dunkelstrom in dieser Hinsicht praktisch nicht.

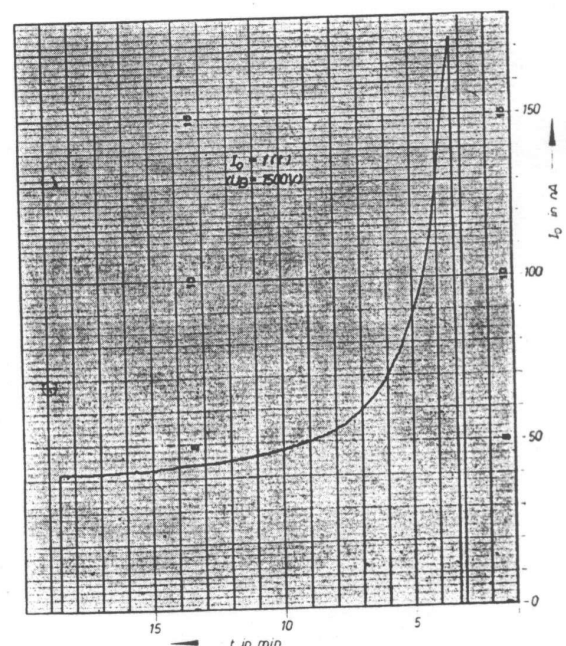
Die nicht vermeidbare Tatsache des Dunkelstromeinlaufverhaltens muß besonders bei sehr geringen Signalströmen Beachtung finden, weil es sonst wegen des hohen Dunkelstromanteiles im gesamt gemessenen Hellstrom in der ersten Betriebszeit der Röhre zu Fehleinschätzungen des Meßergebnisses kommt. (Die nicht übliche Darstellung der Bilder 33 bis 36 mit rechtsseitigem Nullpunkt resultiert aus der Arbeitsweise des Motorkompensationsschreibers, mit dem die Funktionen aufgenommen wurden.)

4.4.3. Reversible und irreversible Veränderungen

Das in den vorhergehenden Punkten geschilderte Einlaufverhalten von Anoden- und Dunkelstrom ist eine reversible Eigenschaft von Fotovervielfachern, d. h., die ursprünglichen Stromwerte werden trotz zeitlich vorübergehender Veränderung immer wieder erreicht. Für eine derartige Verhaltensweise ist auch die Bezeichnung Ermüdung üblich.

Im Gegensatz dazu kann man das Auftreten irreversibler Parameteränderungen als Alterung bezeichnen. Abgesehen von Spontanausfällen tritt bei jedem elektronischen Bauelement während seiner Betriebsdauer

Bild 35: Dunkelstrom-Einlaufverhalten bei einem Exemplar M 12 FS 35



eine Alterung auf, die um so schneller verläuft, je höher das Bauelement belastet wird. Normalerweise kann man während der Lebensdauer von Fotovervielfachern u. a. mit einer Empfindlichkeitsabnahme und einem Dunkelstromanstieg rechnen. Der zeitlich-quantitative Verlauf ist dabei stark von den Betriebsbedingungen abhängig. So zeigt z. B. Bild 37 die Grenze reversiblen und irreversiblen Dunkelstromverhaltens in Abhängigkeit von der Röhrentemperatur, ermittelt an einem Exemplar des M 12 FS 52. In der gewählten dreidimensionalen Darstellung wird der bei $+30^\circ\text{C}$ gemessene Katodendunkelstrom $I_{K0(30)}$ von $2,3 \cdot 10^{-11}\text{A}$ zugrunde gelegt. Dann erfolgte in Schritten von 5K Aufheizung mit jeweiligen Wiederabkühlungen auf die Ausgangstemperatur von $+30^\circ\text{C}$. Die Ebene I_{K0}/ϑ zeigt den üblichen Dunkelstromanstieg bis zu Temperaturen von $+90^\circ\text{C}$. Aus der Ebene $\vartheta/I_{K0(30)}$ ist das Verhalten des Ausgangsdunkelstromes bei $+30^\circ\text{C}$ nach vorheriger Erwärmung entnehmbar: Bei Temperaturen unter 54°C wird nach vorangegangener Erwärmung der Ausgangswert des ursprünglichen Dunkelstromes immer wieder erreicht. Waren die Temperaturerhöhungen größer als 54°C , stellte sich nach der Abkühlung auf $+30^\circ\text{C}$ nicht mehr der Anfangswert, sondern ein niedrigerer Wert ein. Die funktionelle Abhängigkeit ist der Ebene $\vartheta/I_{K0(30)}$ entnehmbar. Aus dem vorliegenden Beispiel ist ableitbar, daß bis zu einer Temperatur von $+54^\circ\text{C}$ das Dunkelstromverhalten reversibel ist (Ermüdung), während bei Temperaturen über 54°C irreversibles Verhalten auftritt.

Unter Berücksichtigung von zulässigen Röhrenexemplarstreuungen und einer Sicherheitsreserve leitet sich hieraus auch der maximal zulässige Wert der Umgebungstemperatur von $+45^\circ\text{C}$ für Fotovervielfacher mit S-11-Katoden (SbCs) ab.

Die Hauptursache der Alterung bei hohen Temperaturen (etwa ab $+50^\circ\text{C}$) ist in der Verdampfung des Caesiums aus der caesiumhaltigen Katode zu suchen.

Eine merkliche Alterung kann auch eintreten, wenn die Fotokatoden über längere Zeit hohen Beleuchtungsstärken (z. B. starkem Tageslicht oder gar direkter Sonnenstrahlung) ausgesetzt sind, ohne daß die Betriebsspannung anliegt. Dabei verändern sich in unzulässiger Weise die Emp-

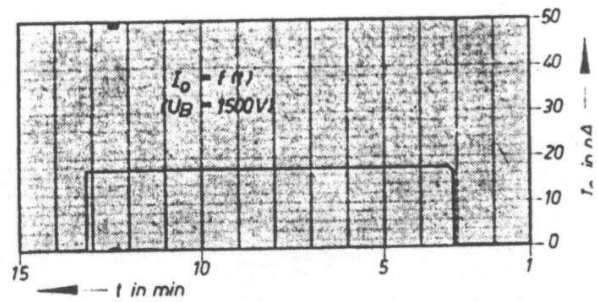


Bild 36: Dunkelstromverhalten eines M 12 FS 35 nach 15stündiger Dunkelpause

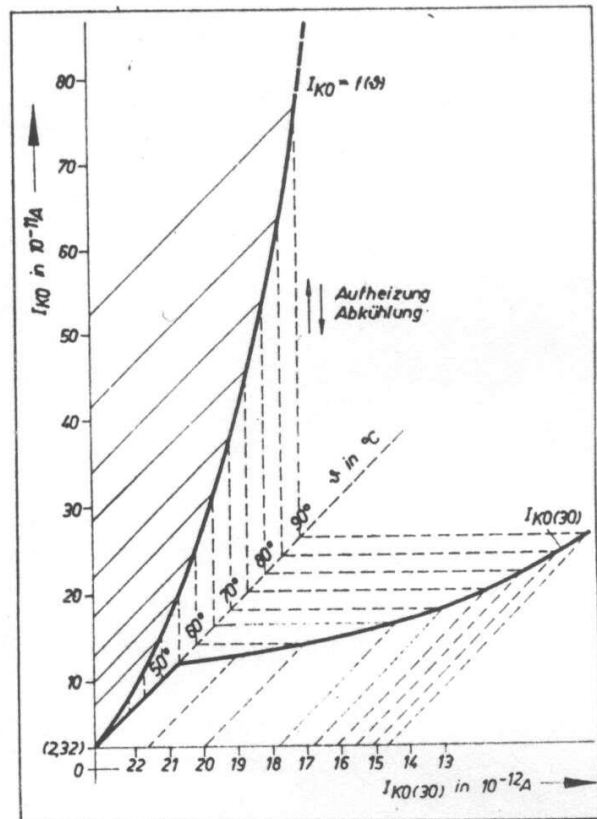


Bild 37: Reversibles und irreversibles Dunkelstromverhalten in Abhängigkeit von der Temperatur

findlichkeit, der Verlauf der Spektralkurve sowie der Dunkelstrom.

Im Bereich von $-60 \dots +80^\circ\text{C}$ ändert sich der Verstärkungsfaktor von Röhren mit S-11-Katode kaum; gleiches gilt für die Katodenempfindlichkeit.

Die Alterungs- und Ermüdungserscheinungen sind das Produkt des Zusammenwirkens der elektrischen Belastung, der Temperatur sowie der einwirkenden Strahlungsintensität, so daß es kaum möglich ist, verbindliche quantitative Angaben zum Verhalten von Fotovervielfachern in dieser Hinsicht zu treffen.

Wird fortgesetzt

Dipl.-Ing. JOACHIM KULLMANN
und Ing. HORST HARTIG

Mitteilung aus dem
VEB Werk für Fernsehelektronik Berlin

4.4.4. Katodengleichmäßigkeit

In verschiedenen Anwendungsfällen ist es erforderlich bzw. nur möglich, kleine Teile der insgesamt nutzbaren Katodenfläche der Röhre dem Strahlungsfluß auszusetzen. Variiert der Ort der genutzten Katodenfläche bei gleichbleibender Beleuchtungsstärke, ist in vielen Fällen eine Änderung der Größe des Ausgangssignales feststellbar.

Diese unerwünschte Signaländerung ist auf Ungleichmäßigkeiten der Empfindlichkeit der Katodenfläche zurückzuführen, die sich fertigungstechnologisch nicht vermeiden lassen. Mit Empfindlichkeitsschwankungen bis etwa 20% ist zu rechnen. Obwohl die durch Ungleichmäßigkeit der Katodenempfindlichkeit hervorgerufenen Signaländerungen kein typisches Stabilitätsproblem eines Fotovervielfachers sind, sollen sie in diesem Zusammenhang nicht unerwähnt bleiben. Durch entsprechende Eichung ist diese Tatsache in der Praxis zu berücksichtigen.

4.4.5. Röhrenabschirmung

Die im Röhrensystem frei beweglichen Elektronen sind durch Magnetfelder beeinflussbar. Überschreiten äußerlich auf den Fotovervielfacher einwirkende Magnetfelder bestimmte Werte, können die elektronenoptischen Daten des Eingangs- und Vervielfachersystems so verändert werden, daß sich Schwankungen im Ausgangssignal und Dunkelstrom bemerkbar machen.

Beim Arbeiten mit sehr geringen Signalströmen kann schon der Einfluß des Erdmagnetfeldes von Bedeutung sein, was insbesondere bei Lageänderungen der Röhre relativ zu den Feldlinien des Erdfeldes Berücksichtigung finden sollte.

Aus diesem Grunde gibt es zu jeder Fotovervielfacher-Typenreihe Abschirmzylinder aus hochpermeablem Material:

Abschirmung 3-19 für M 3 FD 19, M 3 FS 19, M 3 FQS 19; Abschirmung 10-19 für M 10 FS 19, M 10 FQS 19; Abschirmung 10-29 für M 10 FS 29, M 10 FS 29 V₁, M 10 FQS 29, M 10 FS 28, M 10 FD 29, M 10 F 29; Abschirmung 12-35 für M 12 FS 35, M 12 FQS 35, S 12 FS 35, M 12 FD 35, M 12 F 35; Abschirmung 12-52 für M 12 FS 52 A, S 12 FS 52 A, M 12 FC 51, P 12 FS 52 A, M 12 FQS 51, M 12 FQ 51, P 12 FQ 51.

Die Abschirmungen sind auf ihrer Innenseite mit Distanzstücken aus Kork versehen, die eine unmittelbare Berührung zwischen Glaskolben der Röhre und Abschirmzylinder verhindern. Darauf ist unbedingt zu achten; andernfalls kann es durch Mikroüberschläge zu einem unerwünschten Anstieg des Dunkelstromrauschens bzw. des Dunkelimpulspegels kommen.

Wird auf besonders geringe Störerscheinungen dieser Art Wert gelegt, sollte der Abschirmzylinder auf Katodenpotential liegen, so daß zwischen Abschirmung und

Katode keine Spannungsdifferenz auftritt. Da üblicherweise die Anode Massepotential hat, führt in diesem Fall ungewöhnlicherweise die Abschirmung ein hohes Potential, was unbedingt konstruktiv bei der Isolation des Abschirmzylinders gegen Masse und vom Berührungsschutz her Berücksichtigung finden muß.

Die bei Fotovervielfachern nachzuweisenden Dunkel- und Signalströme liegen teilweise im Nano- und auch Picoamperebereich. Insbesondere bei direkter Strommessung mit höchstempfindlichen Geräten (z. B. Schwingkondensator-Elektrometer) ist auf entsprechende Leitungsabschirmung und einwandfreie Erdungsverhältnisse im Interesse stabiler und reproduzierbarer Meßwerte zu achten. Unter ungünstigen Bedingungen (z. B. in der Nähe von Hochleistungsendern oder bei vagabundierenden Strömen von Großenergieverbrau- chern) sind Messungen bzw. Untersuchungen nur in einem Faradayschen Käfig möglich.

Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, daß scheinbar unerklärliche Schwankungen oder Spitzen des Dunkelstromes bzw. kleiner Signalströme ihre Ursache auch in elektrostatischen Aufladungen von Kleidungsstücken aus synthetischen Fasern (z. B. Dederon-Arbeitsmittel) haben können. Abhilfe schaffen in solchem Fall nur Textilien aus reiner Baumwolle bzw. Leinen. Tisch- und Stuhlbeläge auf Kunststoffbasis sollten in diesen Sachverhalt mit einbezogen werden, insbesondere, wenn die Umgebungsluft niedrige relative Feuchtwerte aufweist.

Eine Abschirmung des Fotovervielfachers gegen Fremdlichteinfall dürfte selbstverständlich sein. Auch geringste Streulichtspuren müssen unterdrückt werden, was teilweise beim mechanischen Aufbau von Meßschaltungen bzw. Geräten unterschätzt wird. Innenflächen von Geräten sollten mattschwarz sein (bei Versuchsaufbauten hat sich schwarzes Velourpapier bewährt).

Dem üblichen Umgebungslicht ausgesetzte Versuchsaufbauten sind erst dann lichtdicht, wenn bei nicht vorhandenem Signallicht und Abdecken mit einem schwarzen, absolut lichtdichten Tuch der Dunkelstrom der Röhre unverändert bleibt.

4.4.6. Stabilität der Lichtquelle

Bestimmte Meßverfahren mit Fotovervielfachern verlangen eine konstante Lichtquelle (z. B. Absorptionsuntersuchungen, wo eine zu prüfende Substanz zwischen Röhre und Lichtquelle angeordnet ist). In diesem Fall ist die Lichtquelle (z. B. Niedervolt-Glühlampe) unbedingt aus einer stabilisierten Stromversorgung zu betreiben, da geringste Netzspannungsschwankungen zu Lichtstromänderungen führen, die sich erheblich im Ausgangssignal des Fotovervielfachers bemerkbar machen und die zu messenden Größen verfälschen.

Eine Stromstabilisierung ist einer Spannungsstabilisierung in diesem Fall vorzuziehen, da z. B. eine einprozentige Spannungsänderung zu einer etwa vierprozentigen Lichtstromänderung führt, während eine einprozentige Stromabweichung den Lichtstrom schon um etwa 8% verfälscht.

Für den Niedervoltbereich ist z. B. das stabilisierte Stromversorgungsgerät TG 20/6 (20 V, 6 A) vom VEB Statron Fürstenwalde geeignet.

Hohe Stabilitätsansprüche sind auch mit Bleiakkulatoren realisierbar, wenn sie im Verhältnis zu ihrer Ladekapazität durch die Glühlampe nur äußerst gering belastet werden.

Ist eine häufige Unterbrechung des Lichtstromes erforderlich, soll im Interesse hoher Stabilität nicht die Lampe oder gar das Stromversorgungsgerät abgeschaltet werden, da an beiden Komponenten meßwertverfälschende Einlauf- und Stabilisierungsvorgänge nachweisbar sind. Eine mechanische Unterbrechung des Lichtstromes mit entsprechend lichtdichten Verschläüssen bei ständig eingeschalteter Lampe ist in diesen Fällen unbedingt empfehlenswert.

4.5. Grenzfrequenz und Kurzzeitverhalten

Endliche Elektronenlaufzeiten, unterschiedliche Elektronenaustrittsorte und -richtungen, innere und äußere Röhrenkapazitäten sowie Influenz- und Induktionserscheinungen bestimmen die maximal übertragbare Grenzfrequenz bzw. die minimal mögliche Impulsanstiegszeit und Impulsbreite eines Fotovervielfachers. Das daraus ableitbare grundsätzliche Verhalten wurde bereits im Bild 5 dargestellt.

Durch spezielle konstruktive Auslegung des Röhrenaufbaus und Optimierung der Eigenschaften des Eingangs- und Vervielfachersystems in Verbindung mit der äußeren Beschaltung der Röhre kann das gesamte System auf Kosten einiger anderer Parameter speziell auf hohe Grenzfrequenz oder kurze Impulsanstiegszeiten ausgelegt werden. Demzufolge existieren spezielle Kurzzeit-Fotovervielfacher, die üblicherweise Impulsanstiegszeiten unter 3 ns zulassen. Derartige Kurzzeit-Fotovervielfacher sind im Fertigungsprogramm des VEB WF Berlin nicht enthalten.

Bei den zur Verfügung stehenden Standard-Fotovervielfachern liegen die Impulsanstiegszeiten etwa in der Größenordnung von 15 ns. Dabei ist allgemein feststellbar, daß mit zunehmender Betriebsspannung am Fotovervielfacher die Impulsanstiegszeit kürzer wird, weil sich die Elektronenlaufzeit im Röhrensystem verkleinert.

Da andererseits, wie schon erwähnt, trotz des elektronenoptischen Eingangssystems nicht alle auf der Fotokatode ausgelösten Elektronen an der ersten Dynode des Vervielfachersystems gleichzeitig eintreffen und sich dieser Effekt während des Vervielfachungsprozesses von Dynode zu Dynode

wiederholt, kann ein Fotovervielfacher wegen der statistisch verteilten Elektronenlaufzeitstreuungen nicht beliebig zeitlich kurze Impulse übertragen. Die daraus ableitbare minimal mögliche Impulsbreite liegt bei den WF-Standard-Fotovervielfachern etwa zwischen 20 ns und 30 ns.

Unter Zugrundelegung von Impulsanstiegszeit und Impulsbreite kann unter bestimmten Bedingungen angenähert auf die maximal übertragbare Grenzfrequenz geschlossen werden, die bei den genannten Röhren etwa 7 MHz beträgt.

Weiterhin dürfte in diesem Zusammenhang auch die Impulslaufzeit, d. h. die Zeit vom Auftreffen eines Lichtimpulses bis zum Auftreten des Ausgangsimpulses an der Anode der Röhre, von Interesse sein. Diese Zeit ist u. a. logischerweise von der Röhrenlänge (Stufenzahl) abhängig und liegt für die in Frage kommenden Fotovervielfacher etwa im Bereich von 70 bis 90 ns. Außerhalb der Röhre ist die Signallaufzeit durch die Betriebsspannung und das Potential an der Steuerelektrode e_1 beeinflussbar.

Die Abhängigkeit der Elektronengeschwindigkeit v nach der bekannten Funktion

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m_0} U} \quad (10)$$

e = elektrische Elementarladung
 m_0 = Ruhemasse des Elektrons

sagt aus, daß sich die Signallaufzeit durch Erhöhung der Betriebsspannung U_b und der Spannung U_{e1} entsprechend der Gl. (10) verkürzt.

4.6. Weiterverarbeitung des Ausgangssignals

Der an der Anode des Fotovervielfachers zur Verfügung stehende verstärkte Fotoelektronenstrom kann auf verschiedene Weise weiterverarbeitet werden. Im folgenden sollen die üblichsten Varianten Erwähnung finden.

4.6.1. Gleichstrommessung

Die einfachste Methode ist die direkte Messung des Ausgangsstromes in der Anodenleitung mit einem entsprechend empfindlichen Strommesser. Bei den WF-Standard-Fotovervielfachern bewegen sich diese Ströme in der Größenordnung von Nano- bis Mikroampere, so daß neben üblichen Zeigerinstrumenten vorwiegend Lichtmarkengalvanometer und für sehr niedrige Ströme Schwingkondensator-Elektrometer zum Einsatz kommen. Die direkte Strommessung findet insbesondere beim Gleichlichtbetrieb Anwendung, und sie gestattet auch nach Bild 38 durch eine zusätzliche Maßnahme die Kompensation des Dunkelstromes. Mit Hilfe einer Gegenspannung U_G und des Widerstandes R wird der Dunkelstrom auf Null kompensiert.

Eine weitere Variante der Dunkelstromkompensation ist mit einer Brückenschaltung (Bild 39) möglich. Im unbeleuchteten Zustand wird der Brückenstrom auf Null abgeglichen, womit der Dunkelstrom automatisch kompensiert ist. Gleichzeitig gestattet diese Schaltung Differenzmessungen des Lichtstromes.

4.6.2. Gleichspannungsmessungen

Beim Betrieb eines Fotovervielfachers mit einem Anodenwiderstand R_a (s. auch

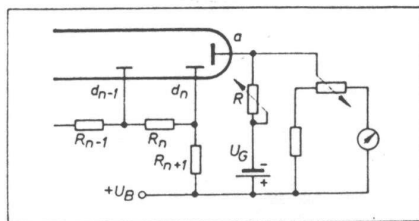


Bild 38: Dunkelstromkompensation bei Gleichlichtmessungen

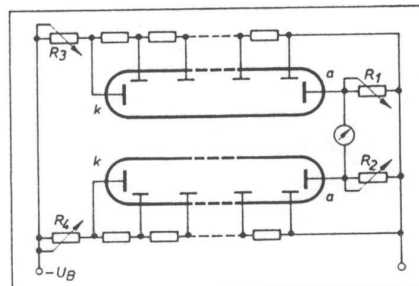


Bild 39: Fotovervielfacher-Brückenschaltung

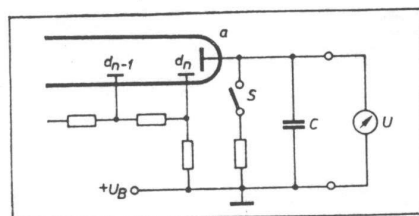


Bild 40: Lichtmengen-Meßschaltung

Bild 17) im Gegensatz zur vorher dargestellten direkten Strommessung stellt der Spannungsabfall über dem Widerstand das gewünschte Ausgangssignal dar. Die Größe des Signals bewegt sich in der Größenordnung von einigen Millivolt bis zu mehreren Volt. Die Amplitude ist durch die Wahl der Größe des Anodenwiderstandes beeinflussbar, wobei jedoch die im Punkt „Wahl der Dynodenteilschaltungen“ dargelegten Zusammenhänge beachtet werden müssen.

Bei Kurzzeit- bzw. Impulseinsatz erfolgt die Darstellung des Ausgangssignals normalerweise oszilloskopisch. Da hierbei abgeschirmte Kabel zum Einsatz kommen, muß der Anodenwiderstand der Röhre dem Wellenwiderstand der Kabel angepaßt werden (50...70 Ω). Empfehlenswert ist bei besonders hohen Ansprüchen die Anwendung induktionsarmer Widerstände (ungewendelte „UKW-Widerstände“).

Als ein Sonderfall der Spannungsmessung ohne Anodenwiderstand kann die im Bild 40 dargestellte Lichtmengenmeßschaltung gelten. Die vom Anodenstrom im Kondensator C integrierte Ladung – und damit die an ihm meßbare Spannung – ist der auf den Fotovervielfacher treffenden Lichtmenge proportional. Nach jedem Meßvorgang wird mit dem Schalter S die Kondensatorladung gelöscht. Die Spannungsmessung am Kondensator muß belastungslos erfolgen, also mit einem statischen Voltmeter oder hochohmigen Spannungsmessern mit MOSFET-Eingang. Der Fotovervielfacher sollte einen möglichst niedrigen Dunkelstrom haben und der In-

tegrationskondensator einen möglichst hohen Isolationswiderstand.

4.6.3. Wechslichtmessungen

In diesem Fall liegt das weiterzuverarbeitende Lichtsignal entweder gleich als Wechsellicht vor, oder man kann vorteilhafterweise ein ursprünglich vorhandenes Gleichlichtsignal vor der Fotokathode zerhacken (Frequenz im NF-Bereich). Somit sind langsame parasitäre Drifterscheinungen sonst nachzuschaltender Gleichspannungsverstärker eliminiert, und der Gleichanteil des Dunkelstromes tritt als nicht mehr störend auf.

Das am Arbeitswiderstand der Röhre liegende Wechselspannungssignal kann mit Oszillografen oder Spannungsmessern ausgewertet werden. Wie bei Gleichlichtbetrieb kann man Verstärker einfügen. Günstigerweise können diese Wechselspannungsverstärker selektiv ausgelegt werden, und eine Begrenzung der Bandbreite Δf führt auf Grund der bekannten Beziehung

$$U_r = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (11)$$

U_r = Rauschspannung
 k = Boltzmann-Konstante
 T = absolute Temperatur
 Δf = Bandbreite

zu einer willkommenen Reduzierung des im Ausgangssignal enthaltenen Anteils des Dunkelstromrauschens.

Selbstverständlich ist jedes im Gleich- oder Wechselspannungsbereich liegende Ausgangssignal eines Fotovervielfachers unter Zwischenschaltung eventuell erforderlicher Anpaßglieder mit entsprechenden anzeigenden oder schreibenden Meßgeräten weiterverarbeitbar (elektronische Datenverarbeitung usw.).

Neben der reinen Meßtechnik kann das Ausgangssignal von Fotovervielfachern auch zur Auslösung von Steuer- und Regelvorgängen benutzt werden. Auf die Vielfalt der sich damit abzeichnenden Möglichkeiten und Einzelheiten kann im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen werden.

5. Strahlungsphysikalische und lichttechnische Größen

Innerhalb des elektromagnetischen Spektrums wird der Wellenlängenbereich 10 nm bis 1 mm als optische Strahlung bezeichnet. In diesem Gebiet wiederum liegt bei etwa 380...780 nm die vom menschlichen Auge wahrgenommene und bewertete Lichtstrahlung. Aus dieser Tatsache heraus ist es nötig, zwischen strahlungsphysikalischen und fotometrischen Größen zu unterscheiden.

Es ist erforderlich, auf diesen Sachverhalt im Rahmen dieses Beitrages einzugehen, da die vorhandenen Fotokathoden auch im Infrarot- und Ultraviolettbereich empfindlich sind und die von Fotovervielfachern registrierten Strahlungsgrößen oft fälschlicherweise mit fotometrischen (lichttechnischen) Werten gleichgesetzt werden (außer M 10 FS 29 V₂ mit entsprechend korrigierter Spektralkurve).

5.1. Strahlungsphysikalische Größen

Im Gegensatz zum menschlichen Auge berücksichtigen die strahlungsphysikalischen Größen die von einer Strahlungsquelle ausgesandte gesamte absolute Energie. Ge-

genüber den fotometrischen Größen (vom Auge bewertete Strahlung) werden die strahlungsphysikalischen Größen mit dem Index e (energetisch) gekennzeichnet (s. auch TGL 0-5031).

Die Strahlungsmenge Q_e ist die in Form von Strahlung auftretende Energie, gemessen in Js.

Der Strahlungsfluß Φ_e ist der Quotient aus der Strahlungsmenge und der Zeit, gemessen in W:

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \text{ bzw. } \Phi_e = \frac{Q_e}{t} \quad (12)$$

Die Strahldichte L_e ist der Quotient aus dem durch eine Fläche in einer bestimmten Richtung durchtretenden Strahlungsfluß und dem Produkt aus dem durchstrahlten Raumwinkel und der zu der betreffenden Richtung senkrechten Projektion der Fläche, gemessen in $W m^{-2} sr^{-1}$:

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{\cos\alpha dA d\omega} \text{ bzw. } L_e = \frac{\Phi_e}{\cos\alpha A\omega} \quad (13)$$

Die Strahlstärke I_e ist der Quotient aus dem in einer bestimmten Richtung abgestrahlten Strahlungsfluß und dem durchstrahlten Raumwinkel, gemessen in $W sr^{-1}$:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega} \text{ bzw. } I_e = \frac{\Phi_e}{\omega} \quad (14)$$

Die spezifische Ausstrahlung M_e ist der Quotient aus dem von einer Fläche ausgehenden Strahlungsfluß und der strahlenden Fläche, gemessen in $W m^{-2}$:

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \text{ bzw. } M_e = \frac{\Phi_e}{A} \quad (15)$$

Die Bestrahlungsstärke E_e ist der Quotient aus dem auf eine Fläche auftreffenden Strahlungsfluß und der bestrahlten Fläche, gemessen in $W m^{-2}$:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \text{ bzw. } E_e = \frac{\Phi_e}{A} \quad (16)$$

Die Bestrahlung H_e ist das Produkt aus Bestrahlungsstärke und der Dauer der Bestrahlung, gemessen in $W s m^{-2}$:

$$H_e = \int E_e dt \text{ bzw. } H_e = E_e t \quad (17)$$

Der Raumwinkel ω ist das Verhältnis der Kugeloberfläche zum Quadrat ihres Radius. Die Einheit ist der Steradian (sr). Der volle Raumwinkel (gesamte Kugeloberfläche) beträgt somit $\omega = 4\pi \cdot sr$. 1 sr ist demzufolge ein Kreissegment mit einem Öffnungswinkel von 65,5 Grad.

$$\omega = \frac{A}{r^2}$$

ω = Raumwinkel

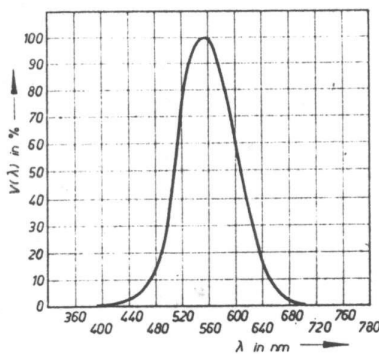


Bild 41: Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$

r = Kugelradius (in m)
 A = Kugeloberfläche (in m^2)

5.2. Fotometrische Größen

Die vom menschlichen Sehapparat bei gleichenergetischem Spektrum registrierten Lichtreize sind für jeden Teil des sichtbaren Spektrums verschieden groß, woraus sich der Hellempfindlichkeitsgrad des Auges ableitet. Der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad des Auges ist ein relatives Maß für den Helligkeitseindruck eines Normalbeobachters für einen bei allen Wellenlängen gleichgroßen Strahlungsfluß. Das Ergebnis, die sogenannte $V(\lambda)$ -Kurve (abgeleitet von dem englischen Wort „visuable“), zeigt Bild 41. Die dargestellte Kurve gilt für das Tagessehen, die $V'(\lambda)$ -Kurve für das Nachtsehen weicht davon etwas ab. Es ist entnehmbar, daß bei gleichenergetischem Spektrum für gelbgrüne Farbtöne ($\lambda \approx 555$ nm) der größte Helligkeitseindruck wahrgenommen wird (Maximum der Kurve bei 100 %).

Die Existenz der $V(\lambda)$ -Kurve ist letztlich dafür verantwortlich, daß sich aus den strahlungsphysikalischen Größen die fotometrischen (lichttechnischen) Größen ableiten. Praktische Berücksichtigung findet dieser Zusammenhang auch im Fotovervielfacher M 10 FS 29 V_λ .

Die Lichtstärke I ist der Quotient aus dem von einer Lichtquelle in einer bestimmten Richtung ausgesandten Lichtstrom und dem durchstrahlten Raumwinkel, gemessen in Candela (cd):

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \text{ bzw. } I = \frac{\Phi}{\omega} \quad (18)$$

Die Lichtstärke gilt als die Grundgröße der Fotometrie, wobei die Candela über ein Vergleichsnormale definiert ist.

Der Lichtstrom Φ ist der $V(\lambda)$ -bewertete Strahlungsfluß, gemessen in Lumen (lm):

$$\Phi = K \int \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

$$K = \frac{680 \text{ lm}}{W} \quad (19)$$

Die Leuchtdichte L ist der Quotient aus dem durch eine Fläche in einer bestimmten Richtung durchtretenden Lichtstrom und dem Produkt aus dem durchstrahlten Raumwinkel und der zu der betreffenden Richtung senkrechten Projektion der Fläche, gemessen in Stilb (sb):

$$L = \frac{d^2\Phi}{\cos\alpha dA d\omega} \text{ bzw. } L = \frac{\Phi}{\cos\alpha A\omega} \quad (20)$$

Die spezifische Lichtausstrahlung M ist der Quotient aus dem von einer Fläche abgegebenen Lichtstrom und der strahlenden Fläche, gemessen in Lux (lx):

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \text{ bzw. } M = \frac{\Phi}{A} \quad (21)$$

Die Beleuchtungsstärke E ist der Quotient aus dem auf eine Fläche auftreffenden Lichtstrom und der bestrahlten Fläche, gleichfalls gemessen in lx:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \text{ bzw. } E = \frac{\Phi}{A} \quad (22)$$

Die Lichtmenge Q ist das Produkt aus dem Lichtstrom und der Zeit, während der er ausgestrahlt wird, gemessen in $lm s$:

$$Q = \int \Phi dt \text{ bzw. } Q = \Phi t \quad (23)$$

Die Belichtung H ist das Produkt aus Beleuchtungsstärke und der Dauer des Beleuchtungsvorganges, gemessen in $lx s$:

$$H = \int E dt \text{ bzw. } H = E t \quad (24)$$

5.3. Einige praktische Werte aus der Lichttechnik

Die zunehmende Bedeutung opto- und fotoelektronischer Bauelemente in der modernen Nachrichten- und Informationsverarbeitungstechnik (z. B. Lichtleiterkabel, integrierte Optik, Laser, Holografie usw.) verlangt in steigendem Maß, sich mit strahlungsphysikalischen und fotometrischen Fragen zu befassen. Daher sollen im folgenden einige lichttechnische Größen gegenübergestellt werden, zumal der Umgang mit diesen bisher noch weit weniger vertraut ist als vergleichsweise das „praktische Gefühl“ für elektrotechnische Größen.

$$\text{Beleuchtungsstärke } E = \frac{\Phi}{A} \quad \frac{E}{lx} \left| \frac{\Phi}{lm} \right| \frac{A}{m^2}$$

| | |
|---------------------------|-------------------|
| Sonnenlicht (Sommer) | 50 000 lx |
| Sonnenlicht (Winter) | 10 000 lx |
| bedeckter Himmel (Sommer) | 5 000...20 000 lx |
| bedeckter Himmel (Winter) | 1 000...2 000 lx |
| Nacht (Vollmond) | 0,1...0,2 lx |
| Nacht (mondlos, klar) | 0,0003 lx |

Beleuchtungsstärken E in lx

| Ansprüche Wohnräume Art der Arbeit | niedrig | mittel | hoch | sehr fein |
|---|------------|--------------|-------------|--------------|
| | 40 grob | 80 mittel | 150 fein | |
| nur Allgemeinbeleuchtung | 40 | 80 | 150 | 300 |
| Allgemeinbeleuchtung + Arbeitsplatzbeleuchtung | 20 | 30 | 40 | 50 |
| | 100 | 300 | 1 000 | 5 000 |

$$\text{Leuchtdichte } L = \frac{l}{A} \quad \frac{L}{sb} \left| \frac{l}{cd} \right| \frac{A}{cm^2}$$

$$1 sb = 1 \frac{cd}{cm^2} = 10^4 \frac{cd}{m^2}$$

Beispiele zur Leuchtdichte in sb

| | |
|-------------------|----------------|
| Nachthimmel | 10^{-7} |
| grauer Himmel | $\leq 0,3$ |
| blauer Himmel | 1,0 |
| Mond | 0,25 |
| volle Sonne | $\leq 150 000$ |
| Kerzenflamme | 1,0 |
| Glühlampe (matt) | 5...40 |
| Glühlampe (klar) | 200...1 500 |
| Leuchtstofflampen | 0,2...0,4 |

$$\text{Lichtstrom } \Phi = l\omega \quad \frac{\Phi}{lm} \left| \frac{l}{cd} \right| \frac{\omega}{sr}$$

Gesamtlichtstrom von Lichtquellen in lm

| | |
|---|--------|
| Allgebrauchslampe (Einfachwendel 40 W) | 325 |
| Allgebrauchslampe (Einfachwendel 100 W) | 1 150 |
| Allgebrauchslampe (Doppelwendel 40 W) | 400 |
| Fotolampe (500 W) | 11 000 |
| Leuchtstofflampe (40 W) | 2 400 |

Da es sich um den Gesamtlichtstrom handelt, ist in diesem Fall der Raumwinkel $\omega = 4\pi sr$ (gesamte Kugeloberfläche). Vergleichsweise ist es nun in diesem Zusammenhang von Interesse, diesen Werten den schon genannten Arbeitsbereich der Fotovervielfacher von 10^{-11} ... $10^{-6} lm$ gegenüberzustellen, woraus auch die hohe Empfindlichkeit hervorgeht, die z. Z. von

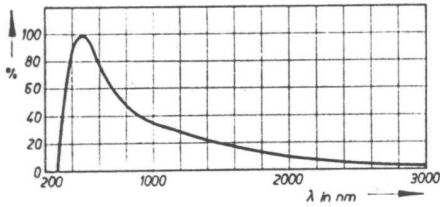


Bild 42: Spektralverteilung des Sonnenlichtes

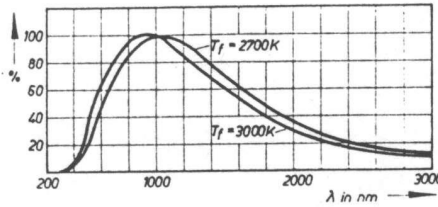


Bild 43: Spektralverteilung von Glühlampenlicht

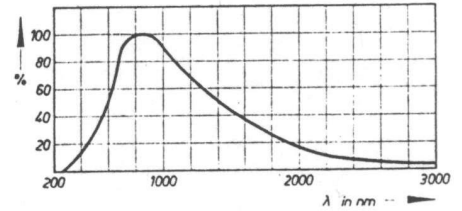


Bild 44: Spektralverteilung eines Reinkohle-Lichtbogens

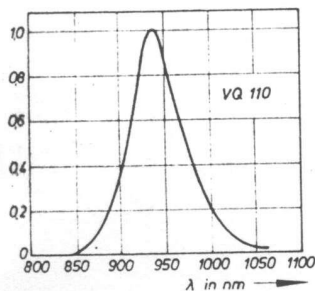


Bild 45: Mittlere Spektralverteilung einer Infrarot-LED VQ 110

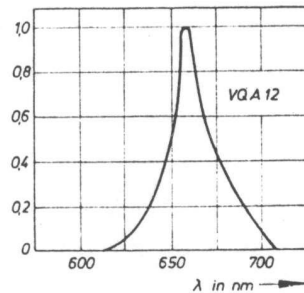


Bild 46: Mittlere Spektralverteilung einer Rot-LED VQA 12

keinem anderen elektronischen Bauelement dieser Art erreicht wird. Der genannte Lichtstrombereich entspricht Beleuchtungsstärken auf einer 35-mm-Katode von etwa $1,0 \cdot 10^{-8} \dots 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ lx}$.

Von anwendungstechnischem Interesse sind die spektralen Emissionskurven einiger Lichtquellen, die bei ihrem Einsatz möglichst mit den spektralen Empfindlichkeitskurven der Fotovervielfacher übereinstimmen sollten. So zeigen Bild 42 die spektrale Verteilung des Sonnenlichtes ($T_f = 6000 \text{ K}$), Bild 43 die des Glühlampenlichtes ($T_f = 2700 \text{ K}; 3000 \text{ K}$), Bild 44 die eines Reinkohlelichtbogens, Bild 45 die einer GaAs-Infrarot-Lumineszenzdiode VQ 110 und Bild 46 die Spektralverteilung einer rotstrahlenden GaAsP-Lumineszenzdiode VQA 12.

6. Überblick über das Fertigungsprogramm des VEB WF

6.1. Allgemeine fotometrische Anwendungen

M 12 FS 52 A, M 12 FC 52 (erhöhte Rotempfindlichkeit), M 12 FQC 51 (auch UVempfindlich), M 12 FVC 51 (auch UVempfindlich), M 12 FQ 51 (auch UVempfindlich), M 12 FS 35, M 12 FQS 35 (auch UVempfindlich), M 12 FD 35 (auch IRempfindlich), M 12 F 35 (auch IRempfindlich),

M 10 FS 29 V₁ (für fotometrische Messungen), M 10 FQS 29 (auch UVempfindlich), M 10 FD 29 (auch IRempfindlich), M 10 F 29 (auch IRempfindlich), M 10 FS 19, M 10 FQS 19 (Miniaturfotovervielfacher).

Eine Sonderstellung nimmt der M 10 FS 300 ein. Er ist äußerlich mit einer Leuchtstoffolie versehen, die Röntgenstrahlung in den optisch sichtbaren Bereich transformiert, so daß diese Röhre für Schalt- und Steuerzwecke unter Anwendung von Röntgenstrahlung einsetzbar ist.

6.2. Typen hoher Stabilität

Die Stabilität bezieht sich auf das Anodenstromeinlaufverhalten, beeinflusst durch die Wahl spezieller Dynodenmaterialien. Es handelt sich hier um den Typ M 10 FS 28, ein weiterer ist in Vorbereitung (M 11 FVS 300).

6.3. Typen mit niedrigem Dunkelstrom

Diese Röhren haben einen Dunkelstrom von $I_0 \leq 0,5 \text{ nA}$ und sind daher besonders für den Nachweis sehr niedriger Lichtströme wegen des großen Signal-Dunkelstrom-Abstandes geeignet. Es handelt sich um die Typen P 12 FS 52 A und P 12 FQ 51.

6.4. Röhren für die Kernspektrometrie

Die Angabe kernspektrometrischer Parameter erfolgt bei den Typen S 12 FS 52 A,

S 12 FS 35, M 10 FS 29, M 12 FS 52 A, M 12 FS 35. Die Anwendung erfolgt mit Szintillatoren im Zusammenhang mit speziellen kernspektrometrischen Meßplätzen (Impuls-Amplituden-Analysatoren).

6.5. Typen im Grenzgebiet zu anderen foto- und optoelektronischen Bauelementen

Es gibt dreistufige Fotovervielfacher kleinen Durchmessers, woraus vergleichsweise niedrige Empfindlichkeitswerte (allerdings auch bei kleinen mechanischen Abmessungen) resultieren. Bei Anwendung dieser Röhren M 3 FS 19, M 3 FQS 19 und M 3 FD 19 ist eine sinnvolle Abwägung zu anderen Bauelementen erforderlich (Fotodioden, Fototransistoren, Fotowiderstände, Fotoelemente und Fotozellen).

Literatur

- [1] Hartmann, W.; Bernhard, F.: Fotovervielfacher und ihre Anwendung in der Kernphysik. Berlin: Akademieverlag 1957
- [2] Photovervielfacher. Handbuch. Berlin: VEB Werk für Fernsehelektronik 1975/76
- [3] TGL 24 165/01. Elektronenröhren, Photovervielfacher (Allgemeine technische Forderungen, Prüfung, Lieferung). Juni 1976
- [4] TGL 0-5031. Strahlungsphysikalische und fotometrische Einheiten und Größen. 1962
- [5] Kuchling, H.: Nachschlagebücher für Grundlagenfächer: Physik. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1968
- [6] Förster, H.: Einheiten, Größen, Gleichungen und ihre praktische Anwendung. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1976

Neu im Handel

Probleme der Festkörperelektronik Band 9

Herausgegeben vom Kombinat VEB Halbleiterwerk Frankfurt (Oder)
228 Seiten, 111 Bilder, 7 Tafeln
Broschur 24,00 Mark
Bestellnummer 552 484 4

Theoretische und experimentelle Untersuchungen des

Anhang

In den folgenden Tabellen sind die Daten der bekanntesten zur Zeit handelsüblichen und einiger noch in der Entwicklung befindlicher Fotovervielfacher zusammengestellt. Sie geben, ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, einen Überblick über die technisch erreichten Werte und die Richtung der weiteren Vervollkommnung.

Die einzelnen Spalten enthalten Angaben über:

- D_k Durchmesser der Fotokathode in cm.
- F_k Fläche der Fotokathode in cm^2 .
- Kathode Fotoelektrische Schicht der Fotokathode.
- λ_{max} Wellenlänge der maximalen Empfindlichkeit in $m\mu$.
- E_0 Charakteristische Empfindlichkeit der Fotokathode in $\mu\text{A/Lm}$.
- E_0 (min) Minimale Empfindlichkeit der Fotokathode in $\mu\text{A/Lm}$.
- n Zahl der Dynoden.
- Konstruktion Konstruktionstyp des Dynodensystems.
- Material Sekundäremittierendes Material der Dynoden.
- M Gesamtvervielfachungsfaktor.
- U Gesamtspannung in Volt.
- E_a Charakteristische Ausgangsempfindlichkeit in A/Lm .
- E_a (min) Minimale Ausgangsempfindlichkeit in A/Lm .
- I_D Dunkelstrom in A.
- I_{max} Maximal zulässiger Ausgangsstrom in A.
- Φ Dem Rauschpegel äquivalenter Lichtstrom in Lm.

Den Firmen und Instituten sind wir für Überlassung von Unterlagen, Fotografien sowie für die Erlaubnis zur Veröffentlichung zu großem Dank verpflichtet.

Tabelle 1

Fotovervielfacher des VEB Carl Zeiss, Jena, nach Angaben von Herrn Prof. Dr. GÖRLICH (Abb. 67 und 68)

| Typ | D_k | F_k | Kathode | E_0 | n | M | U | I_D | I_{max} | |
|----------|-------|-------|----------------------------|-------|-----|--|-----------|------------------------------------|----------------------|--|
| M 12 | — | 2,4 | [Ag]-Cs ₂ O, Cs | 10—50 | 12 | 10 ⁶ —10 ⁷ | 1100—1800 | 10 ⁻⁸ —10 ⁻⁷ | 5 · 10 ⁻⁴ | mit Möglichkeit zur Kühlung der Kathode. Anode getrennt herausgeführt. |
| M 13 gek | 2,5 | — | [Ag]-Cs ₂ O, Cs | 5—20 | 13 | 10 ⁶ —10 ⁷ | 1100—1800 | — | 5 · 10 ⁻⁴ | |
| M 12 S | — | 2,4 | [SbCs ₃]-Cs | ≥ 60 | 12 | 5 · 10 ⁵ —5 · 10 ⁶ | 1100—1800 | 10 ⁻⁹ —10 ⁻⁸ | 5 · 10 ⁻⁴ | Anode getrennt herausgeführt. |
| M 13 S | — | 2,4 | [SbCs ₃]-Cs | ≥ 60 | 13 | 8 · 10 ⁵ —5 · 10 ⁶ | 1100—1800 | 10 ⁻⁹ —10 ⁻⁸ | 5 · 10 ⁻⁴ | |
| M 12 Q | — | 2,4 | [Ag]-Cs ₂ O, Cs | 10—50 | 12 | 10 ⁶ —10 ⁷ | 1100—1800 | 10 ⁻⁸ —10 ⁻⁷ | 5 · 10 ⁻⁴ | mit Quarzfenster. |
| M 12 QS | — | 2,4 | [SbCs ₃]-Cs | ≥ 60 | 12 | 5 · 10 ⁵ —5 · 10 ⁶ | 1100—1800 | 10 ⁻⁹ —10 ⁻⁸ | 5 · 10 ⁻⁴ | mit Quarzfenster. |
| M 12 Sz | 5,5 | — | [SbCs ₃]-Cs | ≥ 20 | 12 | ≥ 5 · 10 ⁵ | 1100—1800 | < 10 ⁻⁷ | 5 · 10 ⁻⁴ | |

Tabelle 2

Fotovervielfacher des VEB Werk für Fernmeldewesen, Berlin-Oberschöneweide, nach Angaben lt. Informationsblätter des Betriebes (Abb. 69)

| Typ | Kathode | F_k | E_0 | n | M (150 V/Stufe) | U | I_D | I_{max} |
|--------|-------------------------|-------|--------|-----|--|-----------|------------------------|----------------------|
| 2740 | [SbCs ₃]-Cs | 10 | 60—120 | 12 | 6 · 10 ⁴ —10 ⁶ | max. 2100 | ≤ 10 ⁻⁴ | 10 ⁻³ |
| 2740 M | [SbCs ₃]-Cs | 10 | 60—120 | 12 | 2 · 10 ⁵ —1,2 · 10 ⁶ | max. 2100 | ≤ 3 · 10 ⁻⁵ | 5 · 10 ⁻⁴ |

Tabelle 3

Fotovervielfacher der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Institut für Festkörperforschung, Berlin-Buch, nach Angaben von Herrn Dr. ECKART (Abb. 70 und 71)

| D_k | Kathode | n | Konstruktion | Material | M | U | I_D |
|-------|----------------------------|-----|--------------|----------------------------|-----------------|--------|------------------------|
| 5 | [SbCs ₂]-Cs | 8 | Jalousie | AlMg | 10 ⁶ | ~ 1800 | 3 · 10 ⁻⁷ |
| | [SbCs ₂]-Cs | 12 | Netz | [Ag]-Cs ₂ O, Cs | 10 ⁶ | ~ 2500 | 2,5 · 10 ⁻⁷ |
| | [Ag]-Cs ₂ O, Cs | 12 | Netz | [Ag]-Cs ₂ O, Cs | 10 ⁶ | ~ 2500 | 10 ⁻⁷ |

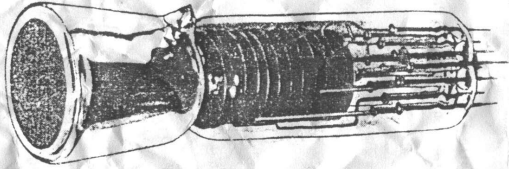


Abb. 70. SEV des Instituts für Festkörperforschung der DAdW zu Berlin

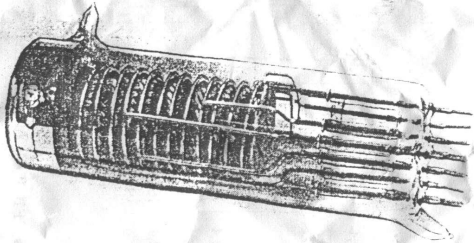


Abb. 71. SEV des Instituts für Festkörperforschung der DAdW zu Berlin

Tabelle 4

Fotovervielfacher der Fernseh-G.m.b.H., Darmstadt, nach Angaben lt. Prospekt F 50, Ausgabe März 1955

| Typ | R_0 | λ_{max} | n | M | U | E_0 | I_D |
|--------|-------|-----------------|-----|-----------------------------------|------|-------|------------------|
| FS 9-A | 30 | 420 | 9 | 10 ⁶ - 10 ⁸ | 1150 | 10 | 10 ⁻⁷ |
| FS 9-C | 15 | 420 | 9 | 10 ⁶ - 10 ⁸ | 1150 | 1,5 | — |

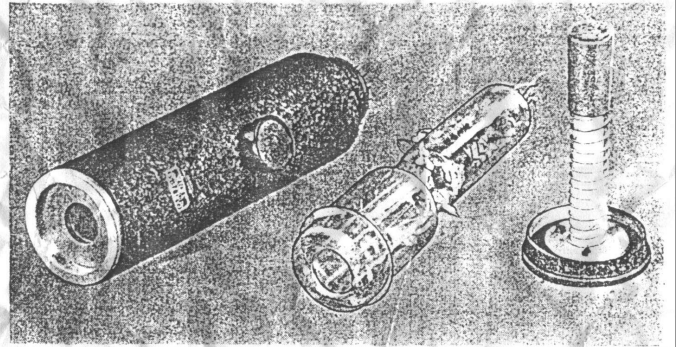


Abb. 67. SEV des VEB Carl Zeiss, Jena

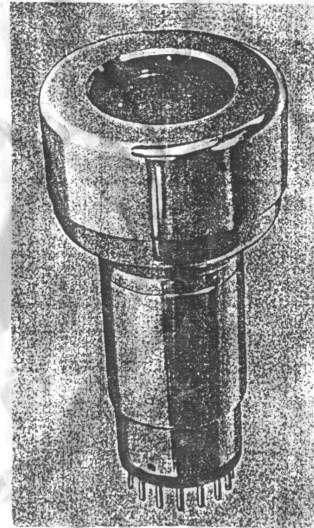


Abb. 68. SEV des VEB Carl Zeiss, Jena

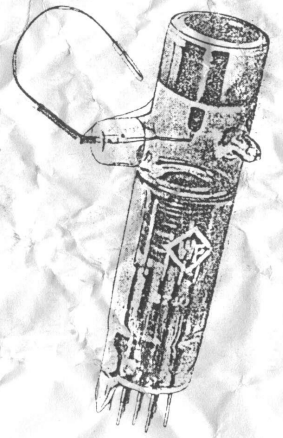


Abb. 69. SEV des VEB Werk für Fernmeldewesen, Berlin