

Hochvakuumphotozellen und Sekundärelektroneuvervielfacher

Von N. SCHÄETI und W. BAUMGARTNER

Institut für technische Physik an der ETH, Zürich

Im folgenden soll in einem kurzen Überblick eine Charakteristik der heute verwendeten Hochvakuumphotozellen gegeben werden, in welchen der äußere lichtelektrische Effekt ausgenützt wird. Anschließend wird die Verstärkung der Photoströme mit Hilfe der Sekundärelektronenvervielfacher besprochen und abschließend ein kurzer Hinweis auf Anwendungen auf dem Gebiete der chemischen Untersuchungstechnik gegeben.

Die Photokathoden der für sichtbares Licht hochempfindlichen Photozellen bestehen aus einer Kombi-

nation der Alkalimetalle mit den Elementen der 5. und 6. Vertikalreihe des periodischen Systems. Unter den Alkalimetallen nimmt das Cs als Metall mit der kleinsten Ionisierungsenergie die hervorragendste Stellung ein. Der wichtigste Vertreter der ersten Kombination ist Cs-Sb, derjenige der zweiten Gruppe Cs-O.

Die Kombinationen mit der 5. Reihe bilden die sogenannten Legierungskathoden, diejenigen mit der 6. Vertikalreihe die Schichtkathoden.

Die Überprüfung der Wellenlängenabhängigkeit der

Photoelektronenausbeute und der Lichtabsorption in der Kathodenschicht zeigt, daß beide Gruppen sich maßgebend voneinander unterscheiden:

1. Der Photoeffekt läuft im wesentlichen parallel der Absorptionskurve der Schicht. Da letztere immer sehr dünn ist (ca. 100 m μ), so handelt es sich um eine Absorption durch das Grundgitter mit einem Absorptionskoeffizienten von ca. 10⁶ cm⁻¹.

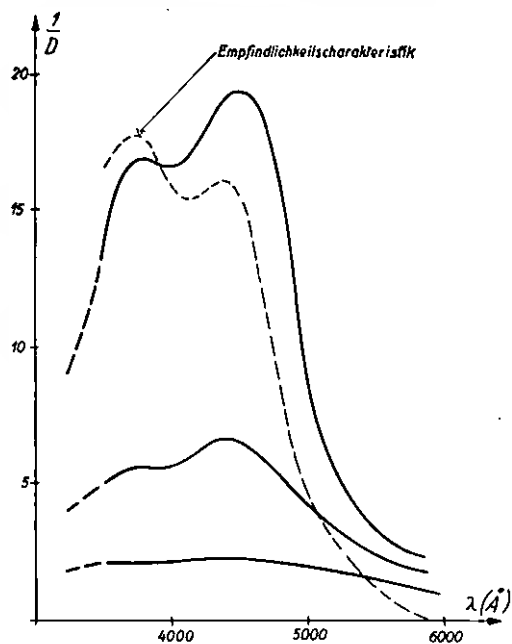


Abb. 1. Absorption der Li-Sb-Schicht

Dieser Fall tritt bei den Legierungskathoden auf. Abb.1 zeigt das Verhalten von Li-Sb nach unseren Messungen¹. Absorption und lichtelektrische Ausbeute laufen parallel. Dieselben Verhältnisse liegen bei Cs-Sb vor, wie dies aus Messungen von BURTON hervorgeht².

2. Dem Photoeffekt entspricht keine in den verwendeten dünnen Schichten feststellbare Absorption. Diesen Fall finden wir bei den Schichtkathoden für das langwellige Maximum vor. Abb.2 zeigt diesen Sachverhalt

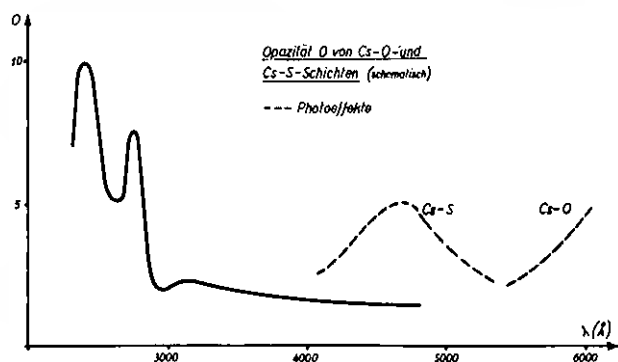


Abb. 2. Absorption von Cs-O- und Cs-S-Schichten

¹ N.SCHAETTI und W.BAUMGARTNER, *La Cathode photoélectrique Lithium-Antimoine*, Le Vide 1951, im Erscheinen.

² ZWORYKIN-RAMBERG, *Photoelectricity*, S. 58, New York 1949.

schematisch³. Diese Figur zeigt deutlich, daß die Photoemission von Cs-O- und Cs-S-Kathoden im sichtbaren Wellenlängengebiet nicht parallel der Grundgitterabsorption geht. Zum gleichen Resultat ist ebenfalls ASAO⁴ gelangt.

Mit Hilfe des Bloch'schen Bändermodells der Festkörper läßt sich versuchsweise folgende Deutung dieser Tatbestände geben:

Im Fall 1 erfolgt die Ablösung der Photoelektronen aus dem obersten besetzten Band des Grundgitters. Im Fall 2 sind atomar oder kolloid dispers verteilte Emissionszentren vorhanden. Ihre Konzentration läßt die Absorption erst in dicken Schichten wirksam in Erscheinung treten.

Dieses verschiedene Verhalten äußert sich in der Quantenausbeute der Photokathoden. Beim Hauptvertreter der Legierungskathoden beträgt diese 10 bis 30 %*, während sie für denjenigen der Schichtkathoden, Cs-O, kleiner als 1 % ist.

Die Deutung für den Fall 1 läßt bei den Legierungskathoden ein halbleiterartiges Verhalten der Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit vermuten. Zu diesem Schluß gelangen ebenfalls ZWORYKIN und BURTON² wie auch SOMMER⁵.

In Abb.3 wird das Verhalten der Cs-Sb- und Li-Sb-Schichten gezeigt¹.

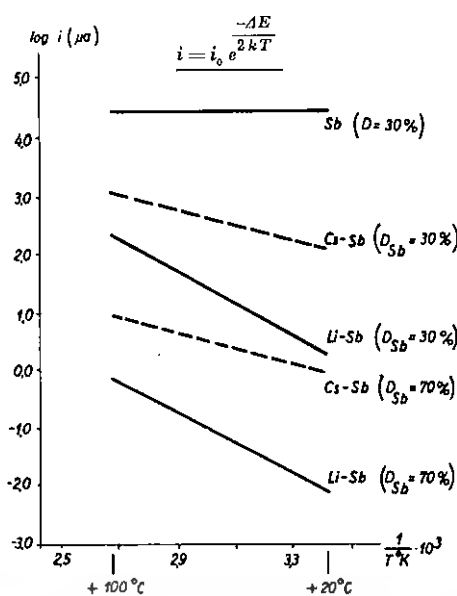


Abb. 3. Leitfähigkeit von Cs-Sb- und Li-Sb-Schichten in Funktion der Temperatur

Es sind die Kurven für die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit im Temperaturintervall +20 bis +100°C aufgetragen. Während eine relativ dicke Sb-

* Bezogen auf auffallendes Licht.

³ W. BAUMGARTNER und N. SCHAETTI, *Photoeffekt bei Cs-O-, Cs-S-, Cs-Se- und Cs-Te-Photokathoden*, Helv. Physica Acta 23, 524 (1950).

⁴ ASAO, *Proc. Phys. Math. Soc. Japan* 22, 448 (1940).

⁵ SOMMER, *Proc. Phys. Soc. (London)* 55, 145 (1943).

Schicht keine Temperaturabhängigkeit aufweist und metallische Leitfähigkeit zeigt, weisen die formierten Cs-Sb- und Li-Sb-Schichten ein halbleiterartiges Verhalten auf*. Die Kurven sind Geraden, aus deren Neigung die Aktivierungsenergie ΔE bestimmt wurde. Sie ergibt sich zu 1,07 Volt für Li-Sb und 0,53 Volt für Cs-Sb.

Nach diesen grundsätzlichen Betrachtungen sollen die einzelnen Kathoden, ihre Herstellung und ihre Charakteristiken behandelt werden.

Legierungskathoden: Sie sind durch GÖRLICH⁶ in Dresden entwickelt worden. Die wichtigsten Vertreter sind: Cs-Sb, Cs-Sb=Ag, Cs-Bi und Li-Sb.

Caesium-Antimon-Kathode: Sie ist die empfindlichste der heute bekannten Kathoden. Sie besitzt ihre höchste Ausbeute im blauen Spektralbereich und ist nur wenig rot-empfindlich. Abb. 4 gibt die spektrale Empfindlichkeitscharakteristik wieder. Das Formierungsverfahren

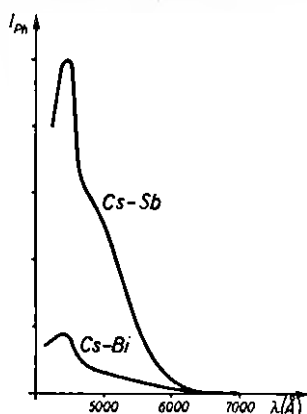


Abb. 4. Spektrale Empfindlichkeitscharakteristik der Cs-Sb- und Cs-Bi-Kathoden

ist relativ einfach: Aus einer Verdampfungsquelle wird ein dünner Belag von Antimon auf die Glaswand der Zelle aufgedampft. Aus einem seitlichen Ansatz wird sodann mit einem Bunsenbrenner Caesium in die Zelle eingetrieben und mit dem Antimonspiegel legiert. Es entsteht ein in Durchsicht roter Belag. Aus der Färbung der Schicht kann schon auf den Grad der Formierung geschlossen werden. Die Bildung der Verbindung Cs-Sb wird durch Aufheizen der Zelle auf 150–200°C intensiviert.

Nach diesem Formierungsverfahren werden Photokathoden von 40–100 $\mu\text{A}/\text{Lumen}$ Empfindlichkeit erhalten. (Gemessen mit W-Lampe von $T=2360^\circ\text{K}$.)

Caesium-Antimon-Silber-Kathode: Der Oberflächenwiderstand der Cs-Sb-Schicht ist sehr groß. Für viele Anwendungen ist dies sehr störend, denn bei intensiver Belichtung der Kathode entsteht in ihr ein Potentialgefälle, das z. B. in Sekundärelektronenvervielfachern ein Absaugen der ausgelösten Photoelektronen verun-

möglicht. Man ist also in vielen Fällen gezwungen, diese Kathoden auf einer leitenden Unterlage herzustellen oder, bei Durchsichtskathoden, diese von einem gut leitenden Belag zu umgeben. Dies läßt sich vermeiden, wenn man an Stelle des reinen Sb eine Legierung von Ag und Sb verwendet. Diese kann z. B. 50% Sb und 50% Ag enthalten. Der Zellenwiderstand einer solchen Zelle ist bedeutend kleiner, ohne daß die Empfindlichkeitscharakteristik und die Ausbeute wesentlich verändert werden.

Mehrschichtkathoden: Untersuchungen an Legierungskathoden, insbesondere an Cs-Sb-Zellen, haben ergeben, daß undurchsichtige Kathoden dieser Art stets weniger empfindlich sind als durchsichtige (10–20 $\mu\text{A}/\text{Lumen}$). Diese Erscheinung ist bereits von GÖRLICH⁶ mitgeteilt worden.

Dicke Legierungskathoden, die aber schichtweise aufgebaut werden, von uns Mehrschichtkathoden genannt, zeigen ein anderes Verhalten, indem sie empfindlicher sind als die normalen Legierungskathoden.

Das Herstellungsverfahren ist das folgende: Es wird eine dünne Cs-Sb-Zelle hergestellt und durch thermische Behandlung auf die maximale Ausbeute gebracht. Auf diese Zelle wird wiederum eine dünne Schicht Antimon aufgedampft, mit Cs-Dampf behandelt und der Wärmebehandlung unterzogen. Dieses Verfahren wird 3–4mal wiederholt. Und auf diese Weise gewinnt man eine undurchsichtige Kathode, deren Ausbeute in der Regel bedeutend höher ist als diejenige einer einfachen Durchsichtskathode. Die nach diesem Verfahren von uns erzielte höchste Ausbeute betrug 180 $\mu\text{A}/\text{Lumen}$.

Caesium-Wismut-Kathode: Wird das Antimon durch Wismut ersetzt, so erhält man eine Kathode mit etwas verschiedener spektraler Ausbeute. Sie ist insbesondere mehr rot-empfindlich. Die normalen Ausbeuten sind dabei kleiner als bei Sb: sie betragen 5–10 $\mu\text{A}/\text{Lumen}$. Diese Kathoden können jedoch mit Sauerstoff sensibilisiert werden, was eine Erhöhung der Ausbeute, verbunden mit einer Verschiebung der langwelligen Grenze nach längeren Wellenlängen, bewirkt. Diese Sensibilisierung besteht in einer Glimmentladung in reiner Sauerstoffatmosphäre von einigen Zehntelmillimetern Druck nach dem Aufdampfen der Bi-Schicht. Auf diese Weise erhält man Zellen von 15–25 $\mu\text{A}/\text{Lumen}$ Empfindlichkeit.

Ersetzt man in der Cs-Sb-Kathode das Caesium der Reihe nach durch Rb, K, Na, so nimmt die Ausbeute von Kathode zu Kathode ab. Geht man von Na zu Li, so steigt sie wieder an und die Kathode Li-Sb besitzt dieselbe Empfindlichkeit wie die Rb-Sb-Kathode.

Bedeutungsvoll bei der Li-Sb-Kathode ist ihr kleiner thermischer Emissionsstrom. Wir haben in der letzten Zeit diese Kathode näher untersucht⁷. Dabei war zuerst die Herstellung des reinen Li zu studieren. Durch Destillation des Li im Hochvakuum und Einfüllen in

* Weitere Untersuchungen bei tiefen Temperaturen sind im Gange.

⁶ P. GÖRLICH, Z. Physik 101, 335 (1936).

⁷ N. SCHAETTI und W. BAUMGARTNER, Antimon-Lithium-Photokathode, Z. angew. Math. Physik 1, 268 (1950).

Ampullen ist dieses Problem gelöst worden. Es ist sodann gelungen, gut empfindliche Zellen herzustellen. Abb. 5 zeigt die spektrale Empfindlichkeitscharakteristik einer Li-Sb-Zelle von 6 $\mu\text{A}/\text{Lumen}$ Empfindlichkeit und im Vergleich dazu die Kurve einer 30 $\mu\text{A}/\text{Lumen}$ Cs-Sb-Zelle.

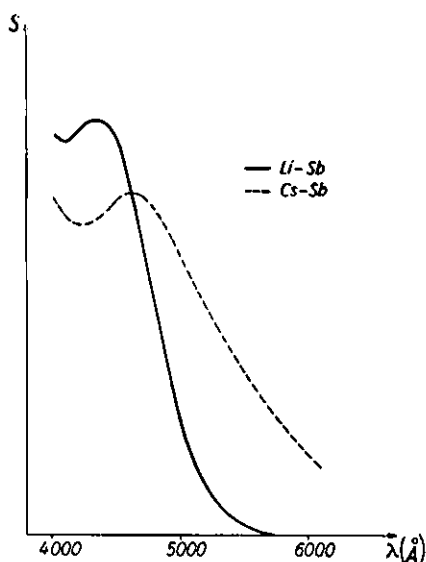


Abb. 5. Spektrale Empfindlichkeitscharakteristik der Li-Sb-Kathode

In Tab. 1 sind schlußendlich die charakteristischen Daten der wichtigsten Legierungskathoden zusammengestellt.

Tab. 1

Schicht	Lage des Empfindlichkeits-Maximums Å	Lage der langwelligen Grenze Å	Mittlere Empfindlichkeit $\mu\text{A}/\text{Lumen}$ W-Lampe T — 2360°K	Maximale Empfindlichkeit $\mu\text{A}/\text{Lumen}$
Cs-Sb	4500	7000	40-100	120
Cs-Sb Mehrschicht	4500	7000	50-120	180
Cs-Sb=Ag			60	
Rb-Sb	4400		20	25
Rb-Sb Mehrschicht	4400		30-40	50
K-Sb	4000	6200	4-10	10
Li-Sb	4200-4300	5700	5-30	40
Cs-Bi	4300	7500	5-10	
Cs-Bi mit O ₂ sensibilisiert	4600	8000	10-25	30

Schichtkathoden: Ihr Hauptvertreter ist die rot- und infrarot-empfindliche Caesiumoxydzelle. Diese Kathode wird normalerweise auf einer Silberunterlage hergestellt. Sie kann dabei als Aufsichts- oder Durchsichtskathode hergestellt werden. Das Formierungsverfahren ist in beiden Fällen etwas voneinander verschieden.

Ein Verfahren für die Herstellung einer infrarot-empfindlichen Durchsichtskathode ist das folgende:

1. Aufdampfen von Silber auf die Zellenwand bis zu einer Lichtdurchlässigkeit von 35 %.
2. Oxydation der Silberschicht durch Glimmentladung in reinem Sauerstoff bis zu einer Lichtdurchlässigkeit von 75 %.
3. Nachsilbern bis zu einer Durchlässigkeit von 50 %.
4. Einführen von Cs in die Zelle und Formieren bei +70°C bis zur Erreichung der maximalen Ausbeute.
5. Einführen eines großen Cs-Überschusses in die Zelle.
6. Oxydation der Cs-Schicht bei gleichzeitiger Kühlung der Schicht durch Einlaß von Sauerstoffspuren unter Kontrolle der Ausbeute für weißes, rotes und infrarotes Licht. Langsame Steigerung der Temperatur auf +100°C.
7. Nach Erreichen der maximalen Ausbeute Erhöhung der Temperatur auf +150°C.
8. Nach Erreichen der maximalen Ausbeute für infrarotes Licht, Aufdampfen von Silber unter Kontrolle der Infrarotempfindlichkeit bei einer Temperatur von 100°C.
9. Eventuell nochmaliges kurzes Aufheizen auf +150°C.

Das Herstellungsverfahren ist somit bedeutend komplizierter als im Falle der Legierungskathoden. Abb. 6 zeigt die spektrale Empfindlichkeitscharakteristik einer nach dem besprochenen Verfahren hergestellten Caesiumoxydkathode.

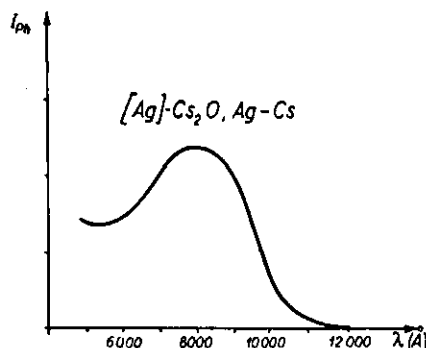


Abb. 6. Spektrale Empfindlichkeitscharakteristik der [Ag]-Cs₂O-Cs-Kathode

Verschiedene Anwendungen dieser Kathoden ließen es als wünschenswert erscheinen, noch weiter in das Infrarotgebiet vorzustoßen. Es wurde daher untersucht, ob durch Ersatz des Sauerstoffes durch Schwefel, Selen oder Tellur eine solche Verschiebung der langwelligen Grenze und des Empfindlichkeitsmaximums zu erreichen wäre. Es zeigte sich aber, daß das Gegenteil der Fall war und daß ein Ersatz des O durch eines dieser anderen Elemente sowohl Maximum als auch langwellige Grenze gegen kürzere Wellenlängen zurück verschiebt*. Abb. 7 zeigt die Empfindlichkeitscharakteristiken dieser verschiedenen Schichtenkathoden nach unseren Messungen³. In Tab. 2 sind die charakteristischen Daten dieser Zellen-Gruppe zusammengestellt.

* Aus gewissen Gründen vermuten wir, daß diese Maxima eine Folge kolloidaler anstatt wie im Falle von Sauerstoff atomarer Einlagerung von Cs in der Schicht sind.

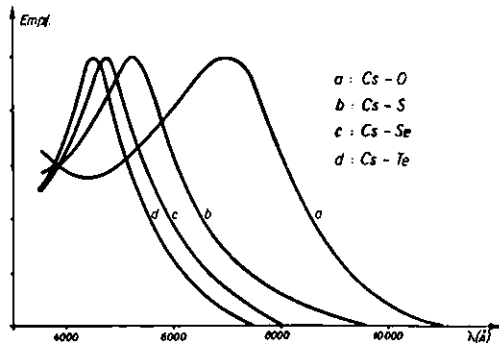


Abb. 7. Spektrale Empfindlichkeitscharakteristik der Cs-O-, Cs-S-, Cs-Se- und Cs-Te-Kathoden

Tab. 2

Kathode	Grenzwellenlänge in λ	Wellenlänge des Maximums in λ	Empfindlichkeit in $\mu\text{A/Lm}$ $T = 2360 \text{ K}$
Cs-O	10000–12000	7000–8000	30–50
Cs-S	8500–10000	4750–5300	10–20
Cs-Se	7500–8500	4750	5–10
Cs-Te	7000	4500	5–10

Sekundärelektronenvervielfacher

In den letzten Jahren hat die Verwendung der Erscheinung der Sekundärelektronenemission zur Verstärkung kleinster Photoströme außerordentlich an Bedeutung gewonnen. Ursprünglich für die Fernsehtechnik entwickelt, haben die Sekundärelektronenvervielfacher auch auf anderen Gebieten wichtige Anwendungsmöglichkeiten gefunden.

Diese Vervielfacher beruhen auf der Eigenschaft aller festen Körper, beim Beschuß durch Elektronen selbst solche, die sogenannten Sekundärelektronen, abzugeben. Die Zahl der pro einfallendes primäres Elektron ausgelösten Sekundärelektronen hängt dabei von der Beschleunigungsspannung der primären Elektronen sowie von den Eigenschaften des untersuchten Stoffes ab.

Die großen Vorteile der Anwendung der Sekundärelektronenvervielfacher zur Verstärkung kleinster Photoströme liegen im günstigen Verhältnis von Nutz- zu Stör-signal über eine außerordentlich große Frequenzbreite. Bei normaler Verstärkung ist das Stör-signal, abgesehen vom Rauschen der Zelle selbst, durch die äußeren Schaltungselemente gegeben und damit unabhängig von der Größe des Signals selbst. Es tritt somit bei kleinen Signalen besonders störend hervor.

Bei Verwendung einer Photozelle setzt sich die Rauschspannung zusammen aus der am Belastungswiderstand R durch den Schrotstrom i_s der Photokathode erzeugten Rauschspannung U_s sowie durch die an diesem Widerstand auftretenden Wärmerauschspannung U_r . Die erste Komponente ist proportional der Quadratwurzel aus dem Photostrom I , während die zweite Komponente eine gegebene Größe darstellt.

Die Wärmerauschspannung U_r ist:

$$U_r = 4 k T \Delta f R.$$

Die Rauschspannung erzeugt durch den Schrot der Zelle:

$$U_s = i_s R = R \sqrt{2 e \Delta f I}.$$

T = absolute Temperatur in Grad Kelvin,

e = Ladung des Elektrones = $1,60 \cdot 10^{-19}$ Coulomb,

k = BOLTZMANNsche Konstante = $1,38 \cdot 10^{-23}$ Watt-sec./Grad,

$4 k T = 1,6 \cdot 10^{-20}$ Wattsec. bei Zimmertemperatur,

Δf = Frequenzbreite in Hertz.

U_r wird für einen Widerstand von 1000 Ohm, bei einer Frequenzbreite von 10^8 Hertz, bei Zimmertemperatur $4 \cdot 10^{-5}$ Volt. Diese Größe bestimmt den Wert des Photostromes, der eine der Wärmerauschspannung äquivalente Nutzspannung erzeugt, zu:

$$I = \frac{4 \cdot 10^{-5}}{10^3} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ A.}$$

Der Photostrom, der eine der Wärmerauschspannung U_r gleiche Rauschspannung U_s erzeugt, ist $5 \cdot 10^{-5}$ A.

Bei Verwendung eines Sekundärelektronenvervielfachers ergibt sich der Rauschstrom am Ausgang des Vervielfachers zu:

$$I_s = i_s a^n \sqrt{\frac{a}{a-1}},$$

wo i_s = Schrotstrom der Photokathode des Vervielfachers,

a = Sekundäremissionsfaktor = Verstärkung pro Stufe,

n = Zahl der Prallplatten oder Stufen bedeuten.

Die Formel zeigt, daß im Vervielfacher der Rauschstrom der Photokathode außer der normalen Verstärkung a^n

eine geringe zusätzliche um den Wert $\sqrt{\frac{a}{a-1}}$ erfährt.

Dieser letzte Term ist eine Folge der Schwankungen der pro Primärelektron ausgelösten Zahl an Sekundärelektronen. Er ist unbedeutend und beträgt für $a=4$ nur 1,15.

Unter der Annahme eines Vervielfachers mit 10 Prallplatten und eines Sekundäremissionsfaktors von 4,0 ergeben sich unter denselben Voraussetzungen wie im Beispiel der einfachen Photozelle:

Photostrom I , der eine der Wärmerauschspannung $U_r = 4 \cdot 10^{-5}$ Volt im Widerstand von 1000 Ohm äquivalente Nutzspannung erzeugt:

$$I = \frac{4 \cdot 10^{-8} \text{ A}}{4^{10}} = 3,84 \cdot 10^{-14} \text{ A.}$$

Photostrom I , der eine der Wärmerauschspannung U_r gleiche Rauschspannung U_s erzeugt:

$$\frac{5 \cdot 10^{-5} \text{ A}}{4^{10} \sqrt{\frac{4}{4-1}}} = 4,2 \cdot 10^{-11} \text{ A.}$$

Aus diesem Zahlenbeispiel geht die Überlegenheit der Verstärkung mit Hilfe der Sekundärelektronenemission ohne weiteres hervor.

Bereits im Jahre 1920 wurde der Gedanke erörtert, diese Erscheinung für die Verstärkung von Elektronenströmen zu verwenden. Doch scheiterte die Umsetzung in die Praxis daran, daß alle damals bekannten Schichten nur kleine Sekundärelektronenausbeuten aufwiesen und damit nur kleine Verstärkungsgrade gestatteten.

Für die Herstellung von Sekundärelektronenvervielfachern werden Schichten benötigt, die bei möglichst niedriger Beschleunigungsspannung der primären Elektronen eine möglichst hohe Sekundärelektronenausbeute aufweisen. Solche Schichten sind die Photokathoden, hauptsächlich die Cs-O- und Cs-Sb-Kathode. Die ersten Vervielfacher sind ausnahmslos mit der erstgenannten Schicht hergestellt worden.

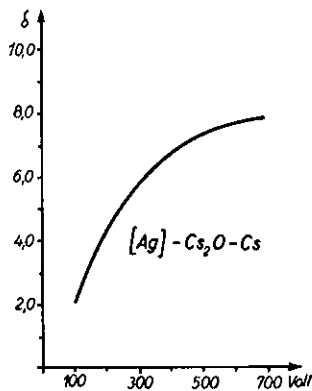


Abb. 8. SE-Ausbeute der [Ag]-Cs₂O-Cs-Kathode

Die erreichbaren Ausbeuten waren sehr gut. Abb. 8 gibt die Ausbeute, d. h. die pro Primärelektron ausgelöste Zahl an Sekundärelektronen, nach unseren Messungen wieder. Abb. 9 zeigt die Ausbeuten für verschiedene Schichtkathoden nach Messungen von WEISS⁸.

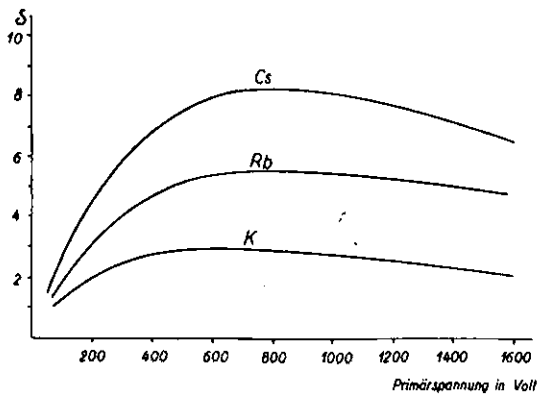


Abb. 9. SE-Ausbeuten von Cs-, K- und Rb-Schichtkathoden

Neben der guten Ausbeute zeigten diese Schichten aber einige Nachteile:

1. Der Formierungsprozeß dieser Vervielfacher war ziemlich kompliziert, da in derselben Röhre neben der

⁸ G. WEISS, *Über Sekundärelektronenvervielfacher*, Fernsehen u. Tonfilm 7, 41 (1936).

Photokathode 6–11 Prallplatten auf gute Ausbeute gebracht werden mußten. Dadurch konnten nur Mittelwerte erreicht werden und nicht für Photozelle und alle Prallplatten maximale Ausbeuten.

2. Die Prallplatten wiesen, wie die Photokathode, eine bedeutende thermische Emission auf.

3. Die Prallplatten waren photoelektrisch empfindlich.

4. Ihre Stabilität war nicht sehr gut, und sie ließen daher nur kleine Belastungen zu.

Wie die Cs-O-Kathode kann auch die Cs-Sb-Kathode als sekundäremittierende Schicht verwendet werden. Dies ist in den bekannten RCA-Vervielfachern der Fall. Die Ausbeutekurve ist von ZWORYKIN angegeben worden⁹ (Abb. 10). Für diese Anwendung werden diese Schichten auf Nickel- oder Silberunterlage hergestellt. Bei guter Ausbeute hat die Cs-Sb-Schicht den Vorteil einer besseren Stabilität als die Cs-O-Kathode. Zudem ist ihre thermische Emission bedeutend kleiner. Sie weist jedoch, wie die Cs-O-Kathode, den Nachteil auf, im Dauerbetrieb Ermüdungserscheinungen zu zeigen, welche sich in einer Abnahme der Verstärkung während des Betriebes äußern.

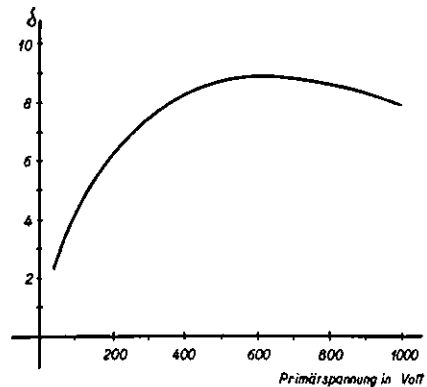


Abb. 10. SE-Ausbeute der Cs-Sb-Kathode

Neben diesen beiden Photokathoden haben hauptsächlich die folgenden Legierungen als sekundäremittierende Schichten Bedeutung erlangt:

Silber-Magnesium-Legierung: Diese Legierung ist erstmalig durch ZWORYKIN, RUEDI und PIKE¹⁰ beschrieben worden. Ausgehend von der Tatsache, daß die Magnesiumverbindungen hohe Sekundärelektronenausbeuten aufweisen können, häufig aber nicht stabil sind, wurden verschiedene Legierungen mit Mg untersucht. Dabei hat sich die Ag-Mg-Legierung als am geeignetsten erwiesen. Es handelt sich dabei um Legierungen mit 1–15 % Mg. Die Mg-Konzentration ist innerhalb dieser Grenzen nicht kritisch, hingegen ist sie von großem Einfluß auf die Bearbeitbarkeit des Materiales und wird aus diesem Grunde möglichst niedrig gewählt.

⁹ ZWORYKIN-RAMBERG, *Photoelectricity*, S.137, New York 1949.

¹⁰ ZWORYKIN, RUEDI und PIKE, *Silver-Magnesium-Alloy as an Secondary Electron Emitting Material*, J. Appl. Physics 12, 696 (1949).

Die Herstellung der Legierung geschieht in Graphitiegeln unter einer Salzschutzschicht zur Vermeidung einer Oxydation¹¹. Abb. 11 zeigt die Ausbeute einer Ag-Mg-Legierung mit 4% Mg, gemessen in einem unserer Vervielfacher.

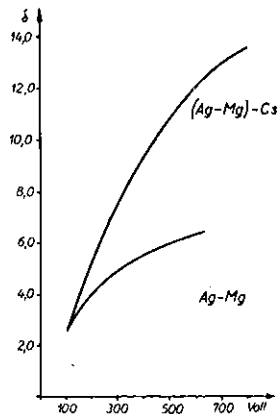


Abb. 11. SE-Ausbeute der Ag-Mg-Legierung

Von Interesse ist die Steigerung der Ausbeute infolge Anlagerung von Cs. Leider sind die so erhaltenen Ausbeuten aber nicht immer konstant, sondern nehmen im Betrieb auf den normalen Wert ab.

Nachteile der Ag-Mg-Legierung sind:

1. nicht gute Reproduzierbarkeit bei der Herstellung und dadurch großer Ausschub bei der Herstellung der Vervielfacher,
2. geringe Haltbarkeit an Luft,
3. helles Leuchten der Prallplatten im Betrieb bei höherer Belastung mit Rückwirkung auf die Photokathode.

Kupfer-Beryllium-Legierung: Kompakte Be-Schichten zeigen unter Umständen ebenfalls große Ausbeuten an Sekundärelektronen. Auf diese Tatsache sind in Deutschland Legierungen von Cu-Be und Ni-Be untersucht worden¹². Der Gehalt an Be betrug dabei 2%. Abb. 12 zeigt die Ausbeutewerte einer solchen Legierung nach unseren Messungen in Vervielfachern.

Die Vorteile dieser Legierung sind:

1. gute Reproduzierbarkeit,
2. gute Haltbarkeit an Luft,
3. schwaches Leuchten der Legierung bei höherer Strombelastung.

Weitere Vorteile beider Legierungen:

1. einfache Formierung zur Erreichung hoher Ausbeuten,
2. kleine thermische Emission,
3. geringe lichtelektrische Empfindlichkeit,
4. sehr gute Stabilität und Wegfall von Ermüdungserscheinungen im Dauerbetrieb (vgl. ¹³).

¹¹ N. SCHAETTI, *Photozellen mit Sekundärelektronenvervielfachern*, *Helv. Physica Acta* 23, 108 (1950).

¹² J. MATTHES, *Z. techn. Physik* 22, 232 (1941).

¹³ N. SCHAETTI, *Sekundärelektronenvervielfacher*, *Z. angew. Math. Physik* 2, 123 (1951).

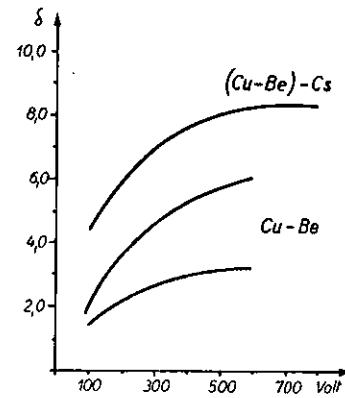


Abb. 12. SE-Ausbeute der Cu-Be-Legierung

Im übrigen sind von uns noch einige weitere Legierungen auf ihre Sekundärelektronenemission hin untersucht worden. Es handelt sich um Ag-Be, Ag-Al, Ag-Ca (vgl. ¹¹).

Nach diesen Betrachtungen über die sekundäremitierenden Schichten, die zur Herstellung von Vervielfachern Verwendung finden, soll kurz auf den Aufbau der Vervielfacher eingegangen werden.

Ein Sekundärelektronenvervielfacher besteht aus einer Anzahl auf stetig höherem Potential sich befindlichen Prallplatten. Abb. 13 zeigt den grundsätzlichen Aufbau.

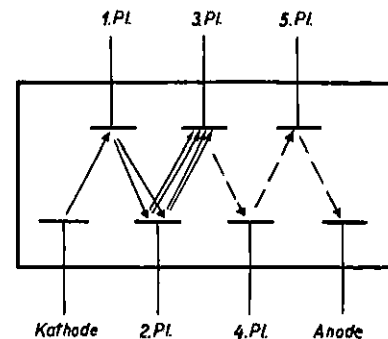


Abb. 13. Grundsätzlicher Aufbau eines Sekundärelektronenvervielfachers

Es muß nun dafür gesorgt werden, daß alle an einer Prallplatte ausgelösten Sekundärelektronen auf die nächste Platte gelangen und dort ihrerseits neue Sekundärelektronen auslösen. Dies kann mit Hilfe von elektronenoptischen Hilfsmitteln erreicht werden. Die Lösung dieser Aufgabe ist im Laufe der Zeit auf verschiedenen Wegen versucht worden.

In Amerika wurde von ZWORYKIN sowohl ein elektrostatischer wie auch ein magnetischer Vervielfacher realisiert (vgl. ¹³). Die erste Lösung war ziemlich kompliziert und hat keine praktische Anwendung gefunden (L- und T-Type-Multiplier). Der magnetische Typus war hingegen der erste Vervielfacher, der eine gute Leistungsfähigkeit aufwies (Abb. 14). Der Aufbau besteht aus einer Anzahl hintereinander gestellter Prallplatten. Gegenüber den Prallplatten sind die Absangelektroden an-

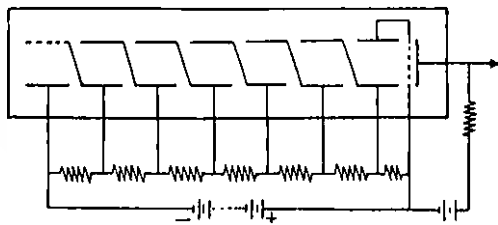


Abb. 14

Schema eines magnetischen Sekundärelektronenvervielfachers

geordnet, die jeweils auf dem Potential der folgenden Prallplatte sind. Durch ein Magnetfeld senkrecht zur Zeichnungsebene werden die an den Prallplatten losgelösten Elektronen in zykloidenförmige Bahnen gezwungen und auf die nächste Prallplatte fokussiert. Bei kleinen Stromdichten war diese Abbildung gut, hingegen führten höhere Stromdichten rasch zu Defokussierung und dadurch zu Sättigung (maximaler Anodenstrom ca. 0,1 mA).

Abb. 15 zeigt die Ausführung eines solchen Vervielfachers, wie er bei uns im Jahre 1939 hergestellt wurde.

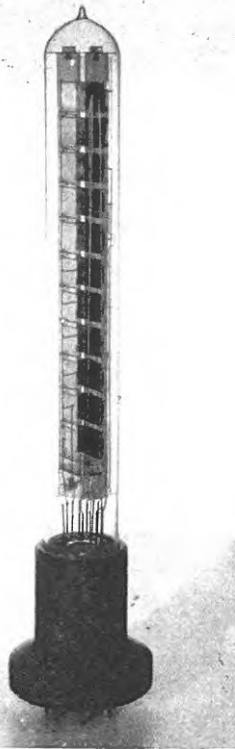


Abb. 15

Magnetischer Vervielfacher (Institut für technische Physik ETH)

In Deutschland ist in erster Linie der Netzvervielfacher entwickelt worden. Er ist im Aufbau prinzipiell sehr einfach und besteht aus hintereinander gestellten feinmaschigen Netzen, die auf hohe Sekundäremission gebracht sind. Ihre Ausbeute ist kleiner als bei den anderen Vervielfachern, weil pro Stufe nur ein Teil der

Primärelektronen verstärkt wird, während der übrige Teil unverstärkt durch die Maschen gelangt. Abb. 16 zeigt eine Ausführung dieses Vervielfachers, hergestellt im Jahre 1938.

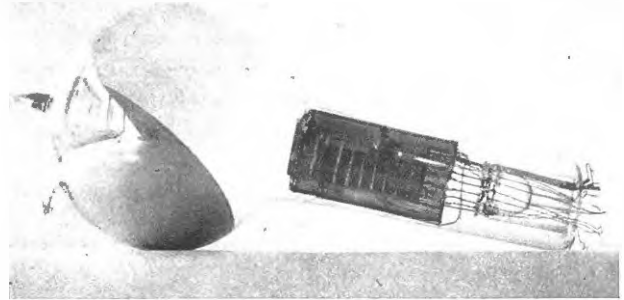


Abb. 16. Netzvervielfacher (Institut für technische Physik ETH)

Durch RAYCHMAN ist sodann in neuerer Zeit der Schaufelvervielfacher entwickelt worden¹⁴. Die Parallelelektroden sind so geformt, daß die ausgelösten Sekundärelektronen durch das elektrostatische Feld auf die nächste Platte fokussiert werden. Abb. 17 zeigt die Ausführung eines solchen Vervielfachers aus unserem Institut (Jahr 1951). Die 17 Prallplatten bestehen aus

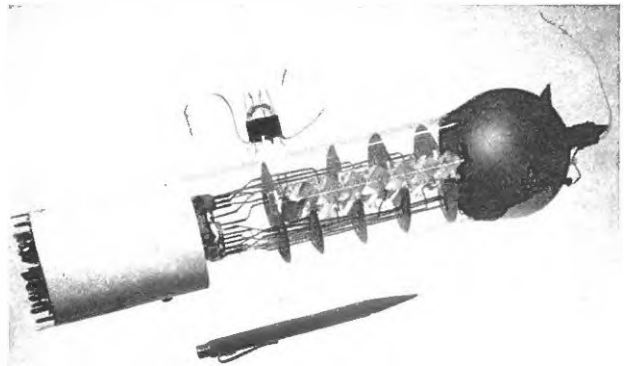


Abb. 17. Elektrostatistischer Vervielfacher (Institut für technische Physik ETH)

Cu-Bc-Legierung (Totalverstärkung 10^9), die Photokathode ist eine Li-Sb-Kathode. Aus diesem Vervielfachertyp ist sodann die hekannte kreisförmige Anordnung der Parallelektroden entwickelt worden (RCA-Vervielfacher, vgl.¹³).

Die wichtigsten Anwendungsmöglichkeiten von Photoeffekt und Sekundäremission für die Chemie liegen in Spektral- und Absorptionsmessungen. Immer sind die Grenzen einer mit Photozellen arbeitenden Apparatur bezüglich dieser selbst durch folgende Punkte festgelegt:

1. Schrotstrom der Photokathode,
2. Dunkelstrom,
3. Übersteuerung und Ermüdung.

¹⁴ ZWORYKIN und RAYCHMAN, Proc. I. R. E. 27, 558 (1939).

Oft ist es angezeigt, Schwankungen der Lichtquelle durch Verwendung zweier Photozellen in einer Kompensationsschaltung zu eliminieren. Auch läßt sich der Dunkelstrom durch vorsichtigen konstruktiven Aufbau des Meßgerätes bezüglich Isolation und, falls er nicht zu starke Schwankungen aufweist, etwa durch einen Gegen-EMK herabdrücken, so daß sich die durch den Schrotteffekt gegebene prinzipielle Grenze erreichen läßt. Wie solche Überlegungen im Einzelfalle durchzuführen sind, kann man etwa einem Artikel von OLDENBERG und BROIDA¹⁵ entnehmen, wo eine mit zwei Sekundärelek-

¹⁵ O. OLDENBERG und P. H. BROIDA, *Application of photoelectric multiplier tubes to the sensitive measurement of absorption or change of relative light intensities*, J. Opt. Soc. Amer. 40, 381 (1950).

tronenvervielfachern in Brückenschaltung arbeitende Anlage für Absorptionsmessungen besprochen wird, die Änderungen von 10^{-4} bei spektral zerlegtem Licht zu messen gestattet. Die Literaturhinweise¹⁶⁻¹⁹ geben weitere Anwendungen von Photozellen und Sekundärelektronenvervielfachern auf chemischem Gebiet.

¹⁶ K. G. KESSLER und R. A. WOLFE, *The measurement of the intensity ratios of spectral lines with electron multiplier tubes*, J. Opt. Soc. Amer. 37, 133 (1949).

¹⁷ R. W. ENGSTROM, *Multiplier phototube characteristics, application to low light levels*, J. Opt. Soc. Amer. 37, 420 (1949).

¹⁸ H. W. BANCOCK, *Integrating Photometer for low Light levels*, J. Opt. Soc. Amer. 40, 409 (1950).

¹⁹ B. A. BRICE, M. HALWER und R. SPEISER, *Photoelectric light scattering photometer for determining high molecular weights*, J. Opt. Soc. Amer. 40, 768 (1950).