

Sekundärelektronen-Vervielfacher und ihre technische Bedeutung

Von K. Nentwig

Wenn wir nachfolgend einen ausführlicheren Überblick über den Sekundärelektronen-Vervielfacher bringen, so geschieht dies vor allem, weil es neben den verschiedenen Forschungsgebieten kaum ein Gebiet der technischen Entwicklung und Fertigung gibt, auf dem der SEV nicht mit besonderen Vorteilen anwendbar wäre. Da zudem die deutsche Industrie auf Grund der Vernachlässigung im letzten Dezennium im Gegensatz zur Forschung gegenüber dem Ausland noch erheblich aufzuholen hat, glauben wir des Interesses unserer Leser für die hier gemachten Angaben sicher zu sein.

Sekundärelektronen-Vervielfacher, nachfolgend abgekürzt SEV genannt, sind an sich keine Errungenschaft etwa der letzten Jahre, sondern waren schon vor dem Kriege in den verschiedensten Ausführungen bekannt und zwar in erster Linie für die Zwecke des elektrischen Fernsehens. In neuerer Zeit ist indessen insofern ein Wandel eingetreten, als nunmehr SEV auch für allgemeinere Verwendungszwecke zur Verfügung stehen. Nach dem Vorangang der RCA in USA sind seit einiger Zeit auch in Deutschland SEV aus laufender Fertigung erhältlich, wobei es sich um eine neuere Konstruktion handelt. Bevor nähere Angaben über das Grundprinzip sowie die Eigenschaften und Anwendungen der SEV gemacht werden, sei ein für die praktische Verwendung wesentlicher und gleichzeitig für den SEV charakteristischer Umstand schon hier erwähnt; ein SEV ersetzt gleichzeitig lichtelektrische Zelle (Photozelle) und Verstärker! Damit aber ergibt sich eine sehr wesentliche Vereinfachung hinsichtlich Aufbau und Handhabung u. a. lichtelektrischer Überwachungs- und Steuerungseinrichtungen verschiedenster Art. Auf diese und weitere Besonderheiten kommen wir weiter unten noch näher zurück. Wenden wir uns nunmehr zunächst dem im SEV ausgenutzten Grundprinzip kurz zu. Seit Jahrzehnten ist bekannt, daß ein auf einen festen Stoff treffendes

Elektron aus diesem weitere Elektronen befreien kann, die man im Hinblick auf ihre Entstehung Sekundärelektronen nennt. Dazu ist einmal notwendig, daß das auslösende Primärelektron eine ausreichende Geschwindigkeit aufweist, also durch eine nicht zu niedrige Spannung beschleunigt wird. Die Mindestspannung liegt in der Größenordnung von einigen zehn Volt. Bei zunehmender Spannung und damit wachsender Beschleunigung der Primärelektronen steigt auch die Anzahl der am Auftreffpunkt freigemachten Sekundärelektronen an, jedoch mit der Einschränkung, daß von einer gewissen oberen Spannungsgrenze ab die Ausbeute an Sekundärelektronen wieder zurückgeht.

Die Zahl der im Mittel durch ein einziges Primärelektron ausgelösten Elektronen wird aber auch von der Art des Stoffes bestimmt, auf den das Primärelektron trifft. Bei den meisten Metallen liegt der Ausbeutefaktor um ≈ 1 , d. h. statistisch betrachtet löst jedes Primärelektron etwa ein zusätzliches Sekundärelektron aus. Oxydschichten verringern die Ausbeute und bei manchen Stoffen, so z. B. Graphit, ist die Ausbeute besonders gering, so daß also viele Primärelektronen insgesamt nur sehr wenige Sekundärelektronen befreien. Andererseits sind besonders präparierte „Schichten“ bekannt, aus denen ein einziges Primärelektron unter günstigen Umständen zehn und mehr Sekundärelek-

tronen herauszuschlagen vermag. Nutzt man diesen Umstand aus, so läßt sich also bei geeigneter Anordnung eine Erhöhung der ursprünglich gegebenen Elektronenzahl, also eine Verstärkung des Stromes erreichen.

In den weitaus meisten Fällen wird als Lieferant der Primärelektronen nicht eine Glühkathode, sondern eine Photokathode benutzt, d. h. eine Alkalimetall-Schicht, die durch auftreffendes Licht zur Elektronenemission veranlaßt wird. Sieht man keine Ausnutzung von Sekundärelektronen vor, dann ergibt sich für eine Alkalimetall-Photozelle mit ihrem Stromkreis die grundsätzliche Anordnung der Abb. 1. Hierin ist K die Photokathode und A die Anode. Die vom Licht aus der Photokathode K ausgelösten Elektronen fliegen zur Anode A und machen sich durch einen entsprechenden Zeigerausschlag am Instrument I bemerkbar. Dem-

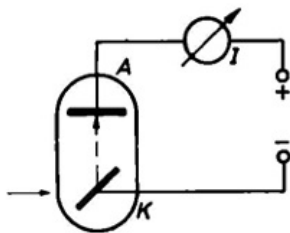


Bild 1
Grundprinzip einer Photozelle.

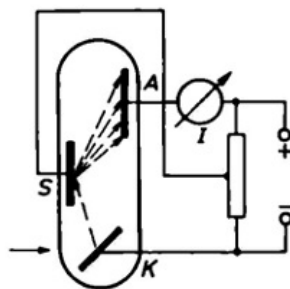


Bild 2
Wie Bild 1, jedoch mit zusätzlicher Sekundärelektronen-Vervielfachung.

gegenüber ist in der Abb. 2 angenommen, daß neben der Photokathode K und der Anode A noch eine Sekundäremissionselektrode S vorhanden sei. Ferner wurde vorausgesetzt, daß jedes auf die Elektrode S treffende Primärelektron dort vier Sekundärelektronen auslöse. Unter sonst gleichen Voraussetzungen, also gleicher Lichtstrom und gleiche Photokathode, wie im Falle der Abb. 1, würde in diesem Beispiel also infolge der Ausnutzung des Sekundäremissions-Effektes das Instrument I den vierfachen Strom anzeigen. Bei Anordnungen der in der Abb. 2 prinzipiell angedeuteten Art spricht man von einstufiger Sekundärelektronen-Vervielfachung.

Selbstverständlich kam man bereits frühzeitig auf den Gedanken das Prinzip der Sekundärelektronen-Vervielfachung mehrfach im gleichen Vakuumgefäß anzuwenden, so daß sich vielstufige SEV mit entsprechend

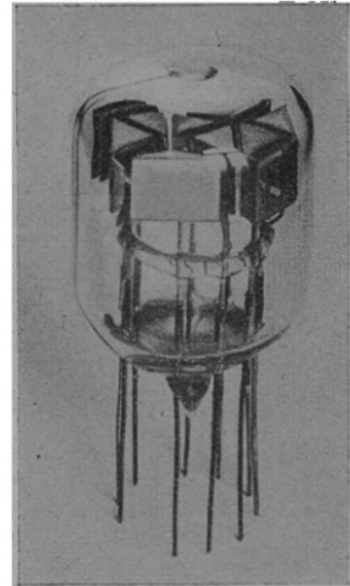


Bild 2a
Achtstufiger SEV

großer Gesamtverstärkung ergeben. Ist n die Stufenzahl und V die in einer Stufe erhaltene Verstärkung, so würde man eine Gesamtverstärkung gleich V^n erhalten. Von diesen Grundgedanken ausgehend sind im Laufe der letzten drei Jahrzehnte die verschiedensten Konstruktionen für solche vielstufigen SEV vorgeschlagen und mit mehr oder weniger gutem Erfolg auch praktisch verwirklicht worden. Alle diese Konstruktionen hatten das Ziel, auf die eine oder andere Weise zu erreichen, daß die an einer Elektrode ausgelösten Elektronen möglichst sämtlich zur jeweils nächstfolgenden Elektrode — und nur zu dieser — gelangen. Mit anderen Worten: es kommt auf einen möglichst hohen elektronenoptischen Wirkungsgrad an, der im Idealfalle gleich 1 wäre. Man versuchte dieses Ziel sowohl durch geeignete Formgebung der einzelnen Elektroden als auch durch zusätzliche elektrostatische oder magnetische Hilfsfelder zu erreichen. Zwar können durch derartige Hilfsfelder die Elektronen in die gewünschten Bahnen gezwungen werden, jedoch ergeben sich in Aufbau bzw. Bedienung mehr oder weniger umständliche Anordnungen. Daher ist man in neuerer Zeit dazu übergegangen, auf jegliche Hilfsfelder zu verzichten und den gewünschten hohen elektronenoptischen Wirkungsgrad allein bereits durch entsprechende Gestaltung der Elektroden in Verbindung mit den an ihnen sowieso liegenden Betriebsspannungen herbeizuführen. So macht die gegenwärtig einzige in Deutschland gefertigte Ausführung eines SEV von sogenannten Torelektroden Gebrauch und erreicht einen bei $\approx 0,95$ liegenden elektronenoptischen Wirkungsgrad. Von z. B. jeweils hundert an einer Elektrode ausgelösten Elektronen kommen also im Mittel ≈ 95 auf der wirksamen Schicht der nächstfolgenden Elektrode an.

Der neue SEV

Dieser neue deutsche SEV ist elfstufig! Die Abb. 3 gibt eine Außenansicht wieder und läßt auch die Ausbildung der Elektroden mehr oder weniger gut erkennen. In der praktischen Anwendung ist der SEV durch eine Metallhülle geschützt, die lediglich eine Lichteintritts-

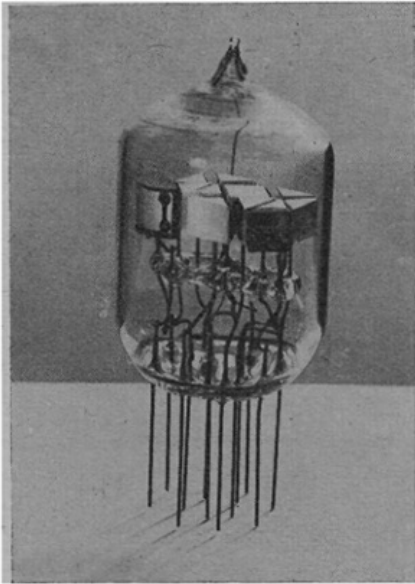


Bild 3

Außenansicht des neuen deutschen Sekundärelektronen-Vervielfachers. (Werkbild: Labor Dr. G. Maurer, Kohlberg Krs. Nürtingen.)

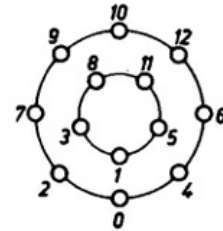


Bild 4

Sockelschaltung des elfstufigen SEV.

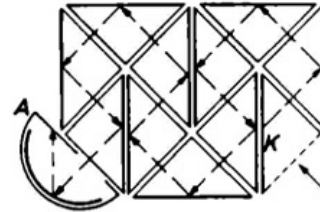


Bild 5

Elektrodensystem (schematisch) und grundsätzlicher Verlauf der Elektronenbahnen.

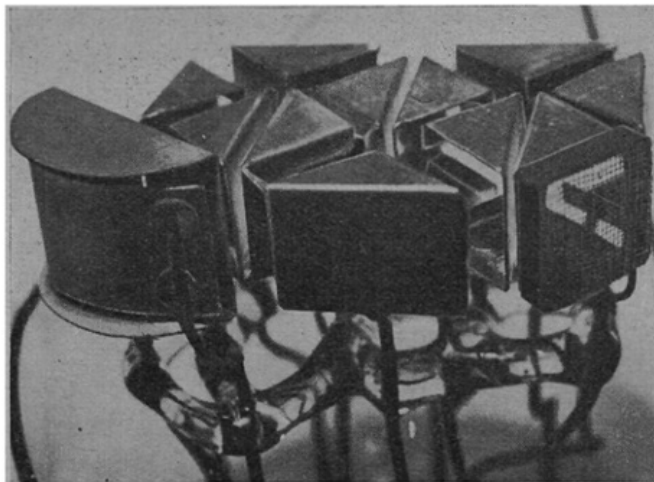


Bild 3a

System (vergr.) des elfstufigen SEV

öffnung aufweist. Die Abb. 4 zeigt die Anordnung der einzelnen Sockelstifte, wobei der Stift 0 mit der Photokathode, der Stift 12 mit der Anode und die übrigen mit den einzelnen Sekundäremissionselektroden verbunden sind.

Zur Vertiefung des Verständnisses der Arbeitsweise des neuen SEV sei noch auf die Abb. 5 verwiesen, die eine schematische Darstellung des Elektrodensystems und der grundsätzlichen Flugrichtung der Elektronen zeigt. Die Sekundäremissionsschichten sind dabei stark ausgezogen angedeutet, die Elektronenbahnen durch dünne Pfeile gekennzeichnet. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß es sich hinsichtlich der Elektronenbahnen um eine weitgehend idealisierte Darstellung handelt, denn in der Wirklichkeit verlaufen die Bahnen überwiegend nicht gerade, sondern mehr oder weniger gekrümmt. Trotzdem wird auf Grund der besonderen Form der Elektroden im Verein mit den an ihnen liegenden Spannungen der bereits oben angeführte

hohe elektronenoptische Wirkungsgrad von $\approx 0,95$ erreicht. Dabei ist hinsichtlich der Betriebsspannungen allerdings auch vorausgesetzt, daß die an den Elektroden 1...11 liegenden einzelnen Spannungen sich wie 2:4:3:2:4:3:2 4:3:2,6:3,4 zueinander verhalten. Dieses gegenseitige Spannungsverhältnis ist durch entsprechende Bemessung eines im Hochspannungsgerät (s. unten) vorzusehenden Spannungsteilers aus Widerständen passender Größe leicht einzuhalten. Der neue SEV trägt die Typenbezeichnung VpA bzw. VpG und wird mit Photokathoden verschiedener spektraler Empfindlichkeit geliefert, so daß den verschiedensten Wünschen Rechnung getragen werden kann. In der Abb. 6 ist der ungefähre spektrale Empfindlichkeitsverlauf zweier derartiger Photokathoden wiedergegeben, und zwar ist dabei die Empfindlichkeit E auf ein energiegleiches Spektrum bezogen. Die Wellenlänge des auftreffenden Lichtes ist in $m\mu$ ($1 m\mu = 10^{-6} \text{ mm}$) angegeben, in welchem Zusammenhang darauf hingewiesen sei, daß das menschliche Auge bekanntlich nur für Wellenlängen zwischen etwa $400 m\mu$ (Dunkelviolet) und etwa $700 m\mu$ (Dunkelrot) empfindlich ist, wobei die maximale Empfindlichkeit bei $555 m\mu$ (Grün) liegt. Aus der Abb. 6 geht hervor, daß die Empfindlichkeit der Photokathode c bis etwa in den hellroten Teil des Spektrums reicht, während die Photokathode e auch noch im nahen Infrarot ein Empfindlichkeitsmaximum besitzt. Bei einigen weiteren lieferbaren Photokathoden liegen die spektralen Empfindlichkeitskurven zwischen den beiden in der Abb. 6 gezeigten. Der SEV vom Typ VpG enthält dagegen eine Photokathode, die im Bereich zwischen etwa 350 und $600 m\mu$ angenähert die doppelte Empfindlichkeit eines SEV vom Typ VpA besitzt. Dieser SEV kommt daher in erster Linie bei sehr geringen Lichtintensitäten im sichtbaren Spektralbereich in Betracht. Unterhalb etwa $350 m\mu$ sind die Photokathoden zwar an sich auch noch empfindlich, jedoch ist dann die Absorption im Glaskolben des SEV bereits zu groß. Eine Verwendung des SEV im langwelligen Ultraviolett würde also Kolben aus Spezialgläsern (z. B. Uviolglas) oder Quarz voraussetzen.

Obleich bei bekannter spektraler Intensitätsverteilung einer benutzten Lichtquelle eine Umrechnung der zu erwartenden Empfindlichkeit der vorhandenen Photokathode an Hand der in Abb. 6 gezeigten Kurven möglich ist, seien in der Abb. 7 noch einige weitere Kurven nach Messungen des Verf. wiedergegeben, die unmittelbar für die Praxis benutzt werden können. Die Kurve a gilt für eine Photokathode etwa vom Typ c, und zwar im SEV vom Typ VpG, während die Kurve b zur Photokathode e (Abb. 6) gehört. Beide Kurven zeigen die

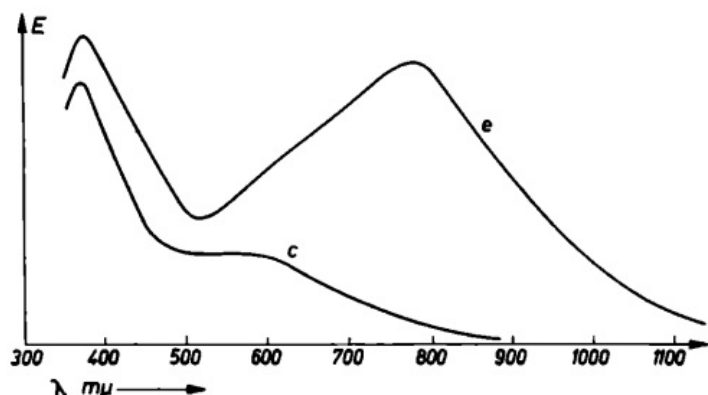


Bild 6

Grundsätzlicher Verlauf der spektralen Empfindlichkeit des neuen SEV.

Abhängigkeit der Empfindlichkeit E im sichtbaren Spektralbereich, und zwar bei Beleuchtung mit einer Glühlampe von etwa 2700° K Farbtemperatur. Die Kurven wurden ohne Verwendung irgendwelcher Filter unter Heranziehung eines Monochromators aufgenommen. Die Maximalempfindlichkeit wurde jeweils gleich 1 gesetzt und liegt bei der Kurve a in großer Annäherung in der Nähe der Maximalempfindlichkeit des menschlichen Auges, bei der Kurve b hingegen im Bereich des Infrarot. Die Kurven der Abb. 7 sind besonders dann sehr brauchbar, wenn — wie meist üblich — ein SEV in Verbindung mit gewöhnlichen Glühlampen benutzt und evtl. der eine oder andere Teil des Spektrums durch geeignete Farbfilter ausgeblendet werden soll.

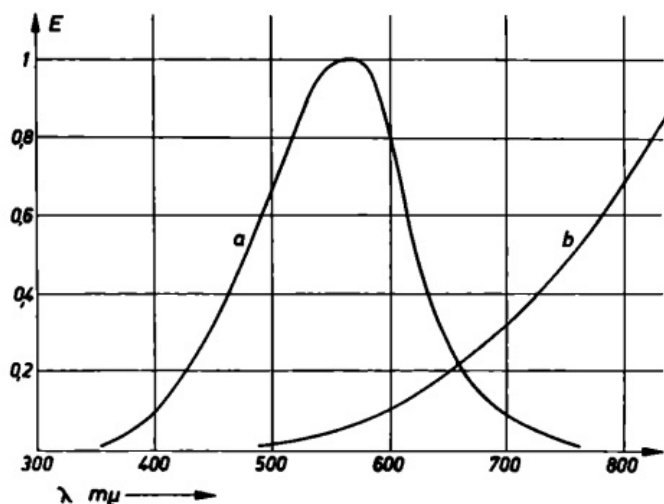


Bild 7

Weitere gemessene spektrale Empfindlichkeitskurven.

Da der neue SEV, wie bereits oben erwähnt wurde, elfstufig ist, so liefert er eine Gesamtverstärkung zwischen etwa 10^5 und etwa 10^7 ; der je Stufe ausgenutzte Vervielfachungsfaktor liegt also nur bei etwa 4...5, und zwar vor allem aus Gründen der Stabilität. Ob sich allerdings die genannten hohen Verstärkungsziffern im praktischen Betrieb voll ausnutzen lassen, wird u. a. vom sogenannten thermischen Dunkelstrom bestimmt. Hierunter ist der Strom zu verstehen, den die Photokathode auch bei völliger Dunkelheit allein auf Grund der Raumtemperatur liefert. Der thermische Dunkelstrom nimmt mit steigender Rotempfindlichkeit der Photokathode zu, die Kathode e (s. oben) weist daher mit etwa 10^{-10} A, einen angenähert tausendfach größeren Dunkelstrom als die Kathode c auf, bei der nur mit einem Mittelwert von etwa 10^{-13} A zu rechnen ist. Durch künstliche Kühlung des SEV läßt sich der thermische Dunkelstrom falls notwendig um einige Zehnerpotenzen verkleinern und damit wird auch die nutzbare Verstärkung größer, so daß sich entsprechend kleinere Lichtströme erfassen lassen. Im übrigen reicht die Verstärkung der SEV ohne weiteres aus, um selbst den Austritt eines einzelnen Elektrons aus der Photokathode in Form eines entsprechenden Impulses im Anodenkreis zu beobachten! Wie bereits oben bemerkt wurde, wirkt der SEV wie eine Photozelle mit nachgeschaltetem Verstärker hoher Verstärkungsziffer bzw. — was ein gleiches Ergebnis bedeutet — wie eine Photozelle mit entsprechend vervielfachter Empfindlichkeit. Bei üblichen Alkalimetall-Photozellen kann im allgemeinen etwa mit einer Empfindlichkeit von 10^{-4} A/lm (= 100 Mikroampere je Lumen) gerechnet werden. Demgegenüber beträgt die Empfindlichkeit des SEV etwa 10 A/lm, was allerdings nicht bedeutet, daß die Anode des SEV auch mit derartig großen Strömen belastet werden darf. Bei Dauerbetrieb ist vielmehr kein größerer Strom etwa 0,5 mA zulässig, der bei stoßweisem Betrieb bis auf etwa 10 mA ansteigen darf. Im übrigen muß der SEV, wie alle neuzeitlichen Alkalimetall-Photozellen vor ständiger Bestrahlung mit Tageslicht und erst recht vor unmittelbarer Sonnenbestrahlung geschützt werden.

Die für den Betrieb des SEV erforderlichen Gleichspannungen werden einem geeignet bemessenen Netzanschlußgerät entnommen. Der Gleichrichter dieses Netzgerätes muß eine Spannung von mehr als 2 kV (bei allerdings nur kleinem Strom) liefern. Die hohe Spannung ist notwendig, weil einmal nicht nur der SEV selbst insgesamt eine relativ hohe Spannung erfordert, sondern die infolge der stets vorhandenen Schwankungen der Netzspannung unerläßliche Stabilisierung der Gleichspannung immer einen gewissen Spannungsüberschuß notwendig macht. Darüber hinaus muß sowohl eine Grob-, als auch eine Feinregelung der Spannung vorgesehen werden, denn durch Regelung der dem SEV zugeführten Betriebsspannungen (zumindest einiger) läßt sich die Verstärkungsziffer auf denkbar einfachste Weise von Null bis zum nutzbaren Höchstwert stufenlos einregeln. Netzanschlußgeräte, die den vorstehend genannten Bedingungen genügen, sind gleichfalls im Handel.

Die vorstehenden Angaben dürften bereits erkennen lassen, daß der Betrieb bzw. die Handhabung eines SEV denkbar einfach ist, einfacher jedenfalls als die übliche aus Photozelle und nachgeschaltetem Verstärker be-

stehende Kombination, die zudem den Nachteil einer Alterung der Röhren aufweist. Es ist lediglich darauf zu achten, daß eine Heraufsetzung der Betriebsspannung zum Zwecke der Einstellung einer größeren Verstärkung langsam zu erfolgen hat, und zwar besonders im Bereich der höchsten Verstärkungsziffer. Andernfalls kann es evtl. auf Grund der unvermeidlichen Gasreste im SEV zu einer selbständigen Entladung kommen, durch die eine Verringerung der Lebensdauer des SEV bewirkt wird.

Die für die praktische Verwendung des SEV wichtigen Vorteile bestehen nun nicht nur allein in der einfacheren Handhabung usw. (s. oben), sondern es sind darüber hinaus noch zwei besonders wichtige Vorteile gegeben. Einerseits ist das in jedem Röhrenverstärker lästige Rauschen ganz erheblich geringer, entspricht es doch etwa nur der Wurzel aus dem jeweiligen Signalstrom, nimmt also mit dem Signalstrom zu. Bei einem Röhrenverstärker hingegen ist das Rauschen unabhängig vom Signalstrom, weist also auch (im Falle einer vorgeschalteten Photozelle) selbst bei kleinsten Lichtintensitäten bzw. bei völliger Dunkelheit den durch die Röhrenzahl usw. bedingten vollen Wert auf! Der zweite wichtige Vorteil des SEV ist darin zu sehen, daß er eine frequenzunabhängige Verstärkung liefert, und zwar von Gleichstrom bis zu sehr hohen Frequenzen. Die obere Frequenzgrenze ist lediglich durch die Laufzeit der Elektronen im SEV bedingt und liegt bei etwa 10^7 10^8 Hz. Erst mit weiter zunehmender Frequenz nimmt dann die Verstärkung ab. Wie schwierig sich demgegenüber der Bau eines üblichen Verstärkers gestaltet, wenn eine in gleicher Weise wie beim SEV durch das ausgenutzte Prinzip bedingte frequenzunabhängige Verstärkung erreicht werden soll, dürfte hinlänglich bekannt sein. Im übrigen wirkt sich das Fehlen jeglicher Kopplungsglieder usw. beim SEV naturgemäß auch hinsichtlich der Betriebssicherheit vorteilhaft aus.

Wenn wir uns nunmehr den Verwendungsmöglichkeiten des SEV zuwenden, so sollen hier lediglich die technischen Anwendungen angeführt werden, da sich die Nutzbarmachung des SEV für Forschungszwecke u. dgl. mehr oder weniger von selbst ergibt. Grundsätzlich ist zunächst festzuhalten, daß der SEV überall dort mit denkbar bestem Erfolg eingesetzt werden kann, wo man bisher auf die Verwendung einer üblichen Photozelle mit nachgeschaltetem Verstärker angewiesen war. Dabei hat der SEV gegenüber der bisherigen Anordnung nicht nur den Vorteil, daß die ganze Einrichtung wesentlich einfacher und weniger störanfällig wird, sondern auch einfacher in der Bedienung ist. Man kommt durchweg mit ein bis zwei Bedienungsknöpfen aus, die zudem nur sehr selten einmal wirklich betätigt werden müssen, sofern die Arbeitsbedingungen einigermaßen die gleichen bleiben. Ohne näher auf Einzelheiten einzugehen, sei hier lediglich darauf hingewiesen, daß der SEV in einer heute noch nicht annähernd übersehbaren Fülle technischer Arbeitsgänge u. a. für Meß-, Zähl-, Regel-, Steuerungs-, Sortier- und Überwachungszwecke herangezogen werden kann. Dabei vermag der SEV weitestgehend zur gesteigerten Automatisierung mancher Arbeitsvorgänge beizutragen, womit nicht nur eine Steigerung der Produktion, sondern zumeist auch eine Gütesteigerung verbunden ist, da die Ermüdbarkeit des sonst meist herangezogenen menschlichen Auges fortfällt. Es lassen sich auf diese Weise Aufgaben lösen, die mit anderen Hilfs-

mitteln nicht zu bewältigen sind. Reicht die vom SEV abgegebene Leistung nicht zur Steuerung eines Schaltrelais o. dgl. aus, so ist es ohne weiteres möglich, etwa eine Elektronenröhre oder eine Gasentladungsröhre („Thyratron“) zu steuern und auf diese Weise selbst große Leistungen zu steuern. Steht bei dem zu beeinflussenden Vorgang usw. nicht von vornherein ein Lichtimpuls zur Verfügung, so läßt er sich mit Hilfe eines kleinen Scheinwerfers mit mechanisch gesteuerter geeigneter Blende jederzeit leicht herbeiführen. Nähere Hinweise dürften sich hier wohl erübrigen. Gegebenenfalls soll ein weiterer Beitrag näher auf Anwendungsbeispiele eingehen. Im übrigen dürfte wohl jeder Techniker und Ingenieur auf seinem eigenen Arbeitsgebiet mit Leichtigkeit selbst viele Fälle benennen können, in denen eine weitergehende Automatisierung erwünscht und somit der Einsatz eines SEV angebracht wäre. Eine Zusammenarbeit der interessierten Kreise wird dann leicht zu den angestrebten Lösungen führen und es ist kein Zweifel, daß auf diese Weise auch die deutsche Industrie sehr bald den zumindest z. T. vorhandenen Vorsprung des Auslandes aufzuholen imstande ist.

Anmerkung:

Für geringere Ansprüche hinsichtlich Empfindlichkeit bzw. Verstärkungsziffer wurde inzwischen ein achtstufiger SEV prinzipiell gleichen Aufbaues und gleicher sonstiger Eigenschaften herausgebracht.