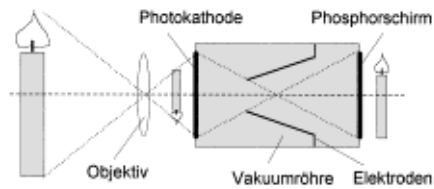
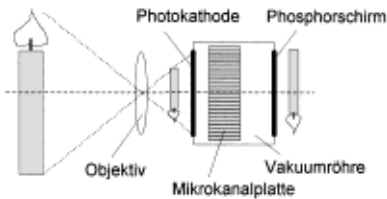


1. Grundprinzip der Bildverstärkung



Elektronenoptische Abbildung
Inverter-Bildverstärker (invert type)



Nahfokus-Bildverstärker
(proximity focused)

Es gibt zahlreiche Applikationen, in denen nur sehr wenig Licht vorhanden und eine Standard CCD-Kamera nicht mehr empfindlich genug ist. Für derartige Anwendungen werden Bildverstärker eingesetzt, die das wenig vorhandene Licht bis zu Faktor 100.000 verstärken können. Es ist mit der Bildverstärkertechnik sogar möglich, einzelne Photonen nachzuweisen.

Es gibt verschiedene Grundausführungen von Bildverstärkern, die für unterschiedliche Anwendungen geeignet sind:

- Bildverstärker der 1. Generation (Bildverstärker-Dioden)
- Bildverstärker der 2. Generation (MCP-Bildverstärker)
- Bildverstärker der 3. Generation (MCP-Bildverstärker mit GaAs-Photokathode)
- Mehrstufige Bildverstärker

Das aufzunehmende Objekt (hier eine Kerze) wird über ein Objektiv auf eine Photokathode abgebildet. Aus dieser Photokathode werden Photoelektronen gelöst. In der Vakuumröhre findet nun -abhängig von der Bildverstärkerausführung- ein Vervielfachungsprozeß statt. Die vervielfachten Elektronen treffen auf einen Phosphorschirm und regen den Phosphor zum Leuchten an. Dieses resultierende lichtverstärkte Bild kann von einem CCD-Sensor erfaßt und weiterverarbeitet werden.

Abhängig von der Elektronenvervielfachung zwischen der Photokathode und dem Phosphorschirm wird zwischen **Nahfokus-** (Proximity Focused) und **Inverter-** (Inverter Type) **Bildverstärker** unterschieden.

Historisch hat man die Bildverstärkertypen in drei Generationen eingestuft. Diese Einstufung stellt keinen Wertmaßstab dar, sondern bezeichnet den unterschiedlichen Aufbau und die Ausführung des jeweiligen Bildverstärkers:

Die Bildverstärker der 1. Generation arbeiten mit elektro-optischer Abbildung. Zwischen den beiden Feldplatten (Elektroden) wird der Elektronenfluß entsprechend geführt. Die Lichtverstärkung beträgt ca. 100. Das Ausgangsbild steht zum Eingangssignal auf dem Kopf. Vorteil dieses Typs ist der einfache Aufbau und die Möglichkeit, durch entsprechenden mechanischen Aufbau, das Ausgangsbild zu verkleinern und zu vergrößern.

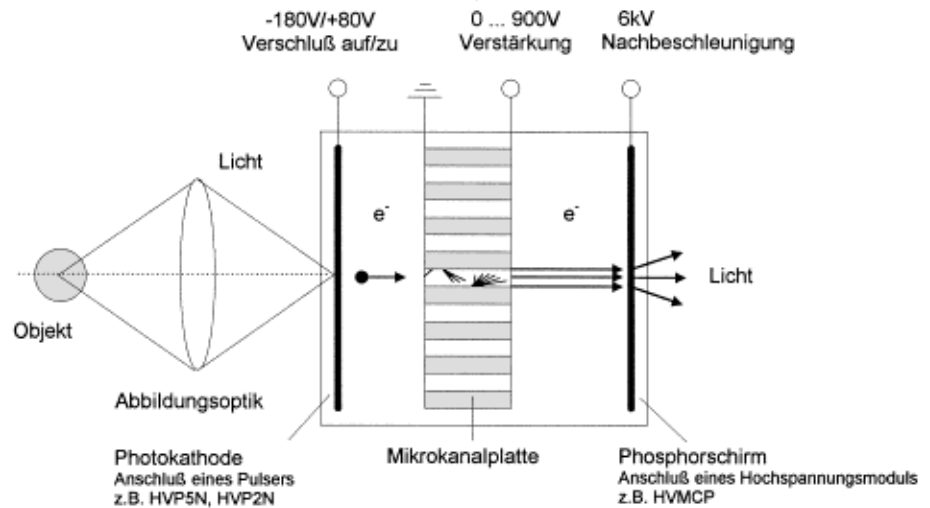
Bildverstärker der 2. und 3. Generation erreichen Verstärkungen bis zu Faktor 10.000. Anstelle der elektro-optischen Abbildung tritt nun eine Führung der Elektronen in kleinen Kanälen (Mikrokanalplatte, micro channel plate, MCP). Die richtige Abbildung zwischen Photokathode und MCP-Eingang, sowie MCP-Ausgang und Phosphorschirm, wird durch entsprechend geringe Abstände erreicht („Nahfokus“). In der MCP findet, ähnlich wie bei einem Photomultiplier, eine Elektronenvervielfachung statt.

Bildverstärker der 3. Generation unterscheiden sich von der 2. Generation durch eine andere Photokathode. Hier wird durch Verwendung von Gallium-Arsenid eine höhere Lichtempfindlichkeit in einem bestimmten Spektralbereich erreicht. Nachteile dieses Typs sind eine relativ hohe Kathodenspannung von 800V (gegenüber 200V bei Bildverstärkern der 2. Generation), schlechte Gatebarkeit und ein hoher Preis. Einsatz findet dieser Bildverstärker v.a. in Nachtsichtgeräten mit einem spektralen Empfindlichkeitsbereich zwischen 600 - 900nm (bis zu 20% Quantenwirkungsgrad).

Auf den nachfolgenden Seiten wird das Funktionsprinzip von **Nahfokus-MCP-Bildverstärkern** erläutert. Dieser Bildverstärkertyp wird in den intensivierten PCO-Kameras eingesetzt.

Aufbau und Funktionsprinzip von MCP-Bildverstärkern

Anhand nachfolgender Skizze soll die prinzipielle Wirkungsweise von MCP-Bildverstärkern erklärt werden:



Das vom Objekt kommende Licht löst auf der Photokathode Photoelektronen aus. Diese treffen auf eine Mikrokanalplatte (micro channel plate, kurz MCP), in der sie durch Sekundärelektronenvervielfachung vermehrt werden. Schließlich werden sie auf einen Phosphorschirm hin beschleunigt und regen diesen zum Leuchten an.

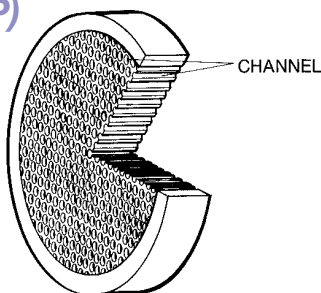
Die drei Hauptbestandteile des Bildverstärkers, nämlich **Photokathode**, **MCP** und **Phosphorschirm**, seien kurz beschrieben:

Photokathode

Die Photokathode besteht aus einer dünnen Schicht eines Materials mit niedriger Austrittsarbeit für Elektronen und bietet hohe Quantenausbeute bis hin zu langen Wellenlängen. Durch die Wahl von Material und Schichtdicke kann die spektrale Empfindlichkeit vom nahen UV bis in den Bereich des nahen IR variiert werden. Die Quantenausbeute (Zahl der Photoelektronen durch Zahl der Photonen) liegt bei vielen Materialien bei 10 % oder besser. Durch die Wahl der Spannung an der Photokathode können die Elektronen auf die MCP hin beschleunigt werden (neg. Spannung) oder sie verbleiben in der Photokathode (pos. Spannung). Diese Eigenschaft erlaubt es, den Bildverstärker auf einfache Weise als elektronischen Verschluss zu benutzen. Dabei muß nicht die gesamte am Bildverstärker anliegende Spannung von einigen kV geschaltet werden, sondern es genügt ein Spannungshub von 200 - 250 V an der Photokathode, um ein Öffnungsverhältnis von ca. $1:10^7$ zu erreichen.

Leistungsfähige „Hochspannungs“-Pulsgeneratoren erreichen dabei Verschlussöffnungszeiten von wenigen Nanosekunden. Sie können die kapazitive Last (ca. 100pF) der Photokathode mit einer Flankensteilheit von 1-2ns schalten (z.B. HVP5N, HVP2N).

Mikrokanalplatte (MCP)



Die Vervielfachung der Photoelektronen geschieht in einer Mikrokanalplatte (micro channel plate), die aus Bleiglas gefertigt ist und 10^6 - 10^7 kleine Kanäle des Durchmessers von typisch $10\mu\text{m}$ und der Länge von ca. 0,5mm beinhaltet. Jeder Kanal stellt einen Photomultiplier dar, bei dem die Dynoden durch eine einzige halbleitende Oberfläche ersetzt sind.

Die Herstellung solcher Mikrokanalplatten ist ein technologisch komplizierter Vorgang, wobei die späteren Eigenschaften in weiten Bereichen gezielt beeinflusst werden können. Der Verstärkungsgrad hängt vor allem von zwei Parametern ab, dem Verhältnis von Länge zu Durchmesser der Kanäle und von der angelegten Spannung. Die Lichtverstärkung des Bildverstärkers ist damit allein durch die angelegte Beschleunigungsspannung variierbar und liegt zwischen 0 und 10^4 für den hier beschriebenen Typ.

Phosphorschirm

Die Elektronen werden schließlich durch eine Spannung von einigen kV auf einen Phosphorschirm beschleunigt und regen diesen zum Leuchten an. Bei der Wahl des geeigneten Leuchtschirms spielt vor allem die Energieausbeute und die Nachleuchtdauer eine Rolle. Die Nachleuchtdauer kann von wenigen ns bis zu einigen Sekunden je nach verwendetem Phosphor variieren und muß sorgfältig auf die Anwendung abgestimmt sein.

Allgemeine Eigenschaften

Die gesamte Einheit Photokathode-MCP-Phosphorschirm ist in Glas eingeschweißt und befindet sich in Hochvakuum (10^{-6} mbar), um Wechselwirkungen der Elektronen mit den Gasatomen zu vermeiden. Trifft dennoch ein Elektron ein Gasatom, so entsteht ein positives Ion, das auf die Photokathode hin beschleunigt wird und dort störende Elektronen auslöst (Ion feed-back).

Aus Gründen der optischen Anpassung werden Bildverstärker oft mit Ein- und Ausgangsfenster aus Fiberglas hergestellt. Dabei verschiebt sich die Bildebene aus dem Inneren des Bildverstärkers an seine Oberflächen und erleichtert die Einbindung in Kamerasysteme.

Bei hoher Beleuchtung tritt in den Kanälen der MCP ein Sättigungseffekt ein, der die erreichbare Verstärkung drastisch reduziert. Zu hohe Eingangsbeleuchtungsstärken können zur Zerstörung des gesamten Bildverstärkers oder zu lokalen Einbrennvorgängen führen. Es reicht bereits eine lange Belichtungszeit bei Raumbeleuchtung oder sogar kurze, reflektierende Laserblitze, um in die Photokathodenschicht schwarze, irreparable Flecken einzubrennen.

Durch entsprechende Konverter (UV, IR) kann die spektrale Empfindlichkeit in andere Bereiche verschoben werden.

Mit offenen MCP-Bildverstärkern ohne Photokathode, die direkt an eine Versuchsapparatur angeschlossen sind, lassen sich außerdem Röntgenstrahlen, Elektronen und andere geladene Teilchen nachweisen.

2. Der Bildverstärker als Teilkomponente einer CCD-Kamera

Für eine bildverstärkende (intensivierte) Kamera sind folgende Komponenten notwendig:

- Eingangsoptik
- Bildverstärker
- CCD-Sensor
- Steuerungselektronik

Wahl und Ausführung der optischen Komponenten am Eingang werden zum großen Teil von den Eigenschaften des zu messenden Objektes bestimmt (Linsenobjektiv, Spiegel, Beugungsgitter, Fiberoptik). Dabei kann die Abbildungsqualität mit speziellen Methoden optimiert werden.

Die Wahl der optischen Koppelung von Phosphorschirm und CCD-Sensor im Inneren der Kamera wird dagegen von den Eigenschaften der Komponenten und den gewünschten Leistungsmerkmalen der Kamera bestimmt. Im Prinzip bieten sich zwei Möglichkeiten der optischen Koppelung zwischen Phosphorschirm und CCD-Sensor an, entweder eine Linsenoptik oder eine fiberoptische Platte (Taper).

Linsenoptik

Wählt man ein Abbildungssystem aus Linsen, so erhält man eine sehr gut verzerrungs- und bildfehlerfreie Abbildung, die außerdem gestattet, den Abbildungsmaßstab frei zu wählen. Man hat damit die Möglichkeit, die Auflösung von Bildverstärker und CCD-Sensor aufeinander abzustimmen. Insbesondere bei kleinen CCD-Sensoren kann das in der Auflösung begrenzte Bild des Phosphorschirms verkleinert auf den CCD-Sensor abgebildet werden. Es erhält dadurch eine der Pixelgröße des CCD-Sensors angepaßte Ortsauflösung. Ein Nachteil ist der relativ kleine Wirkungsgrad der Linsenabbildung. Dieser liegt bei Linsen mit typischer Blende von 2.0 nur im Bereich von 1,5%.

Eine deutliche Verbesserung läßt sich erreichen indem man die abbildende Optik mit zwei Objektiven als Tandemanordnung ausführt. Hier lassen sich Wirkungsgrade von größer 20% realisieren. Der Tandemaufbau erlaubt jedoch keinen variablen Abbildungsmaßstab mehr. Dieser wird durch das Verhältnis der Brennweiten bestimmt. Die Abbildungsqualität dieser Anordnung ist im Allgemeinen deutlich höher als bei Einzelobjektiven, unter der Voraussetzung, daß ein optisches Kollimator- und Ausgangsobjektiv verwendet wird. Es lassen sich verzeichnungsfreie Objektive mit einer Vignet-

tierung $<3\%$ und exzellenten MTF-Werten realisieren. Nachteil der Tandemanordnung sind der relativ hohe Konstruktionsaufwand, die große räumliche Abmessung und das hohe Gewicht.

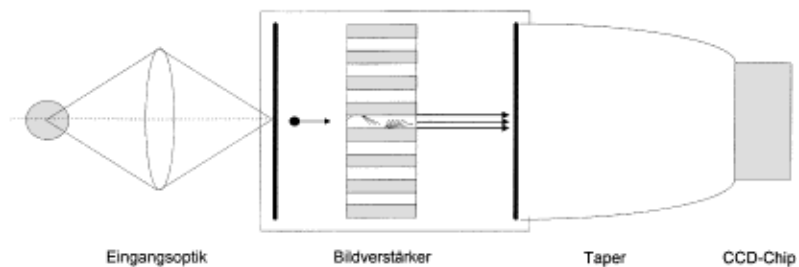
Glasfiberplatte (Taper)

Kommt es auf maximale Ausnutzung der Lichtintensität und kleinste räumliche Abmessungen an, so eignet sich eine Koppelung mit einer Glasfiberplatte. Die Glasfiberplatte besteht, ähnlich wie eine MCP, aus unzähligen kleinen Lichtleiterfasern mit dem Durchmesser von einigen μm , die miteinander zu einem Strang verschweißt sind. Durch geeignete Wahl der Materialien erreicht man damit eine numerische Apertur von 1, was bedeutet, daß Lichtstrahlen unter beliebigen Einfallswinkeln weitergeleitet werden. Mit Berücksichtigung von Störstellen und nicht vollständiger Flächendeckung der Fasern ergibt sich eine integrale Transmission von 50 bis 80%. Damit gelingt es, fast die ganze Lichtintensität vom Phosphorschirm auf den CCD-Sensor zu übertragen. Die Fiberplatte läßt sich leichter justieren als eine Linsenoptik, da eventuelle Dejustierungen relativ zur optischen Achse die Abbildungsqualität kaum berühren.

Als Nachteil sind produktionsbedingte Unregelmäßigkeiten in der Transmission zu nennen. Diese machen nur wenige Prozent aus und können bei quantitativen Messungen korrigiert werden. Auf den Originalbildern sind sie jedoch zu erkennen.

Zur Verkleinerung des Ausgangsbildes werden sog. „tapered fibers“ verwendet. Dies sind reduzierende Glasfaseroptiken. Durch moderne Herstellungsverfahren ist es in der Zwischenzeit gelungen, Störstellen (hot-, dark-spots, non-uniformity, chicken wires, shear and gross distortion) so zu verringern, daß sie im Vergleich zur Qualität des Bildverstärkers kaum mehr in Erscheinung treten.

Blockschaltbild der einzelnen Komponenten eines Bildverstärker-Kamera-systems:



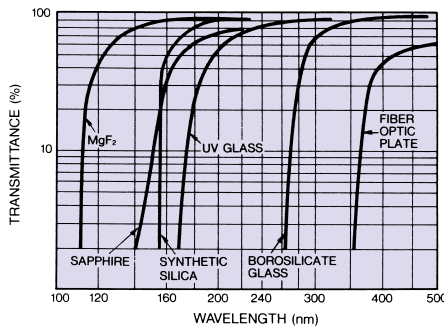
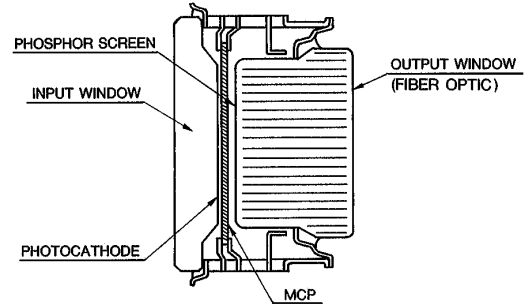
Ist bereits ein externes Kamerasystem vorhanden, so kann dieses mit einem Bildverstärker-Vorsatz und Linsen-koppelung (z.B. mit der PCO-Relais-Optik IRO) zu einem intensivierten Kamerasystem aufgerüstet werden.

3. Charakteristische Größen eines MCP-Bildverstärkers

Das verwendete Material der folgenden vier Komponenten hat einen entscheidenden Einfluß auf das spektrale Verhalten und damit die Empfindlichkeit des Bildverstärkers:

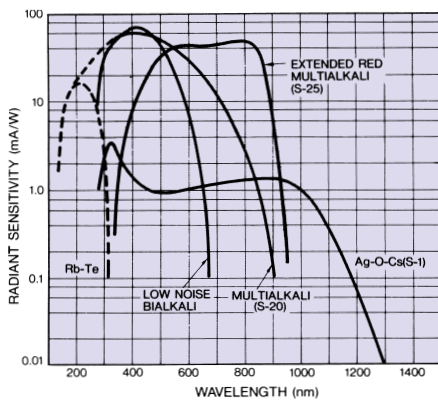
- Eingangsfenster
- Photokathode
- Phosphorschirm
- Ausgangsfenster

Die Zeichnung rechts zeigt das größenmäßige Verhältnis der vier Komponenten:



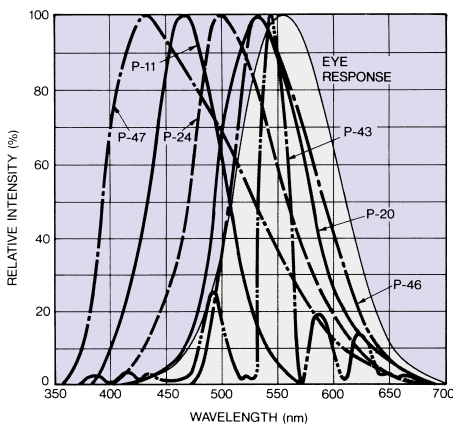
Input Window

THICKNESS:
SAPPHIRE 0.5mm
FIBER OPTIC PLATE 5mm
OTHERS 1.5mm



Photocathode

Photocathode	Noise (typ.)	$\frac{e^-}{\text{sec cm}^2}$
S25	30000	
S20	1500	
Bi	20	
Rb-Te	3	



Phosphor

Phosphor	Phosphor Decay (typ.) to ...		Typical Efficiency
	... 10%	... 1%	
P20	0.01 - 4ms	40 - 100ms	100%
P43	1ms	4ms	80 - 100%
P46	0,2µs	1µs (4µs@0,1%)	25-30%
P47	0,1µs	0,5µs (8µs@0,1%)	25-30%