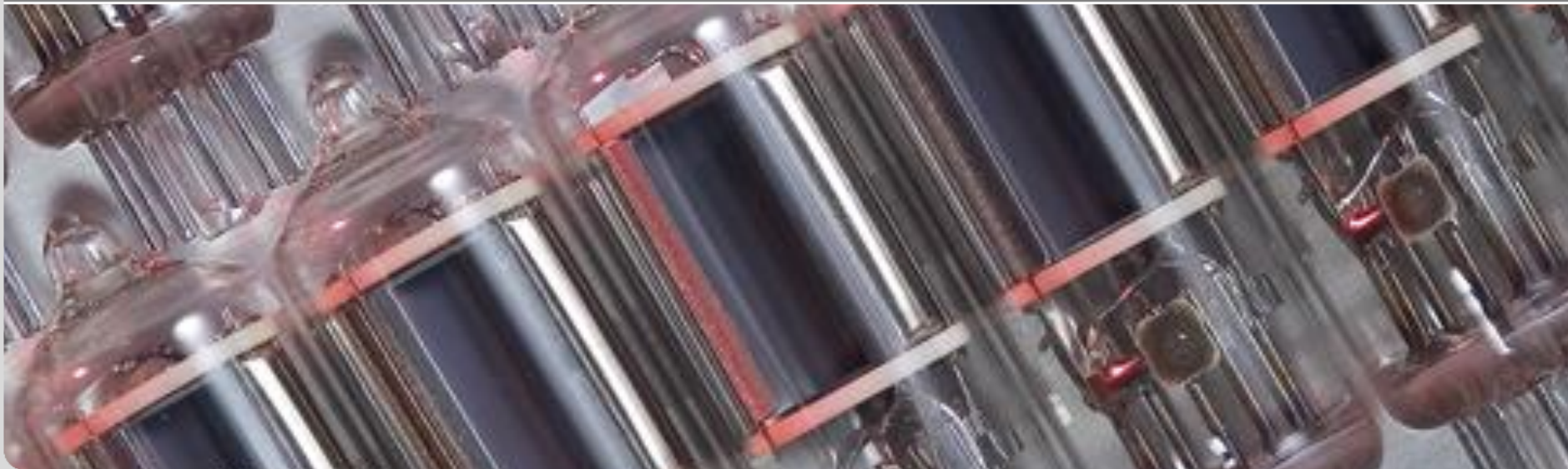


Optoelektronische Messtechnik

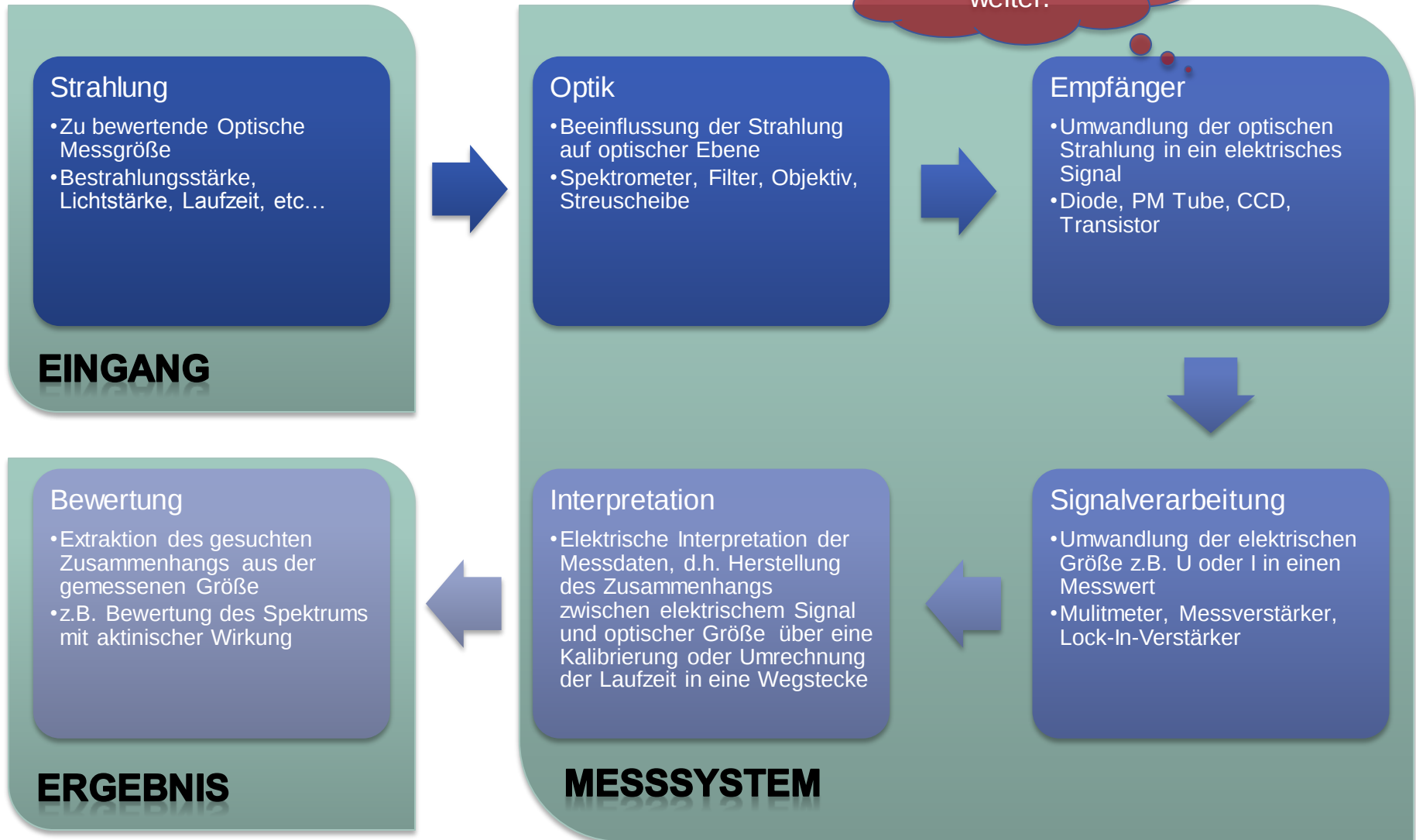
Vorlesung | Nr. 6 |
Empfänger | Äußerer Photoeffekt | Photomultiplier Tube

LTI | Lichttechnisches Institut



Prinzipieller Aufbau eines Messsystems

Hier geht's weiter.



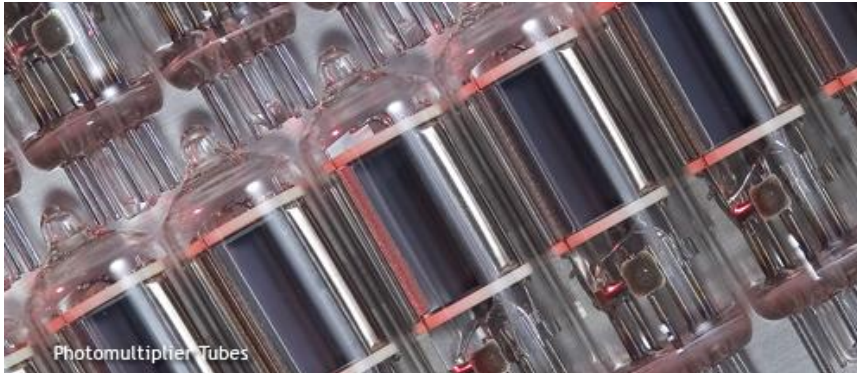
Detektorprinzip



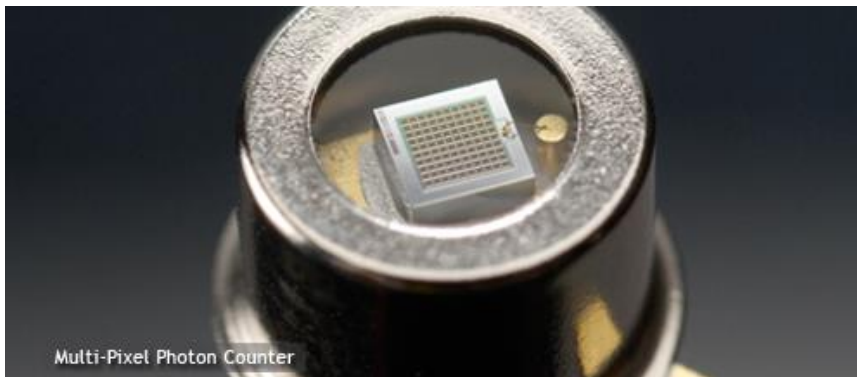
$$s(\lambda, f, T, \dots) \equiv \frac{X}{Y}$$

- Eingangsgröße | Ursache | Y
 - Strahlungsgröße, i.d.R. Bestrahlungsstärke
- Ausgangsgröße | Wirkung | X
 - elektrisches Signal (Strom, Spannung, Ladung, Verschiebungsstrom)
- Empfindlichkeit | s
 - Verhältnis von Ausgangsgröße (Wirkung) zur Detektor Eingangsgröße (Ursache)

Anforderungen an Detektoren



<http://sales.hamamatsu.com/>



<http://sales.hamamatsu.com/>

- spektrale Empfindlichkeit
 - Hoch, d.h. starke Änderung des elektrischen Signals in Abhängigkeit des optischen Signals
 - Möglichst konstant über einen spektralen Bereich
 - Linear über einen großen Signalbereich (Dynamik)
 - großer Wellenlänge Bereich
- Signal-Rausch-Verhältnis
 - $SNR \gg 1$
 - Rauschen klein (NEP)
- zeitliche Dynamik
 - kurze Ansprechzeit (f_{Grenz})
 - großer Frequenzbereich

Einteilung Photodetektoren

Quanten Detektoren

Äußerer
Photoeffekt

Innerer
Photoeffekt

Thermische Detektoren

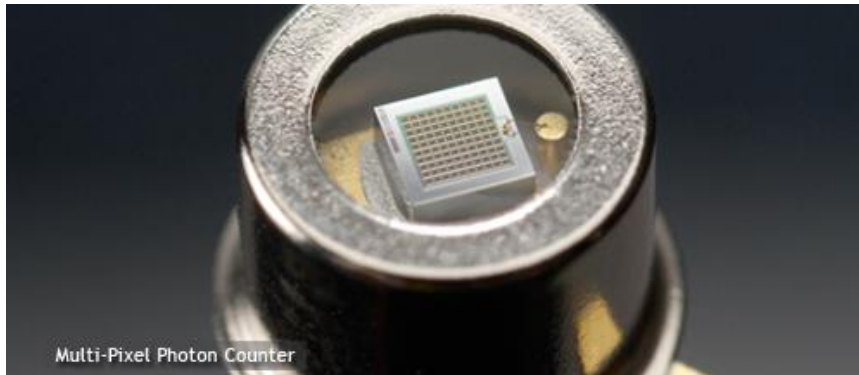
Bolometer
Effekt

Thermoelektrischer
Effekt

Pyroelektrischer
Effekt

Thermopneumatischer
Effekt

Quantendetektoren



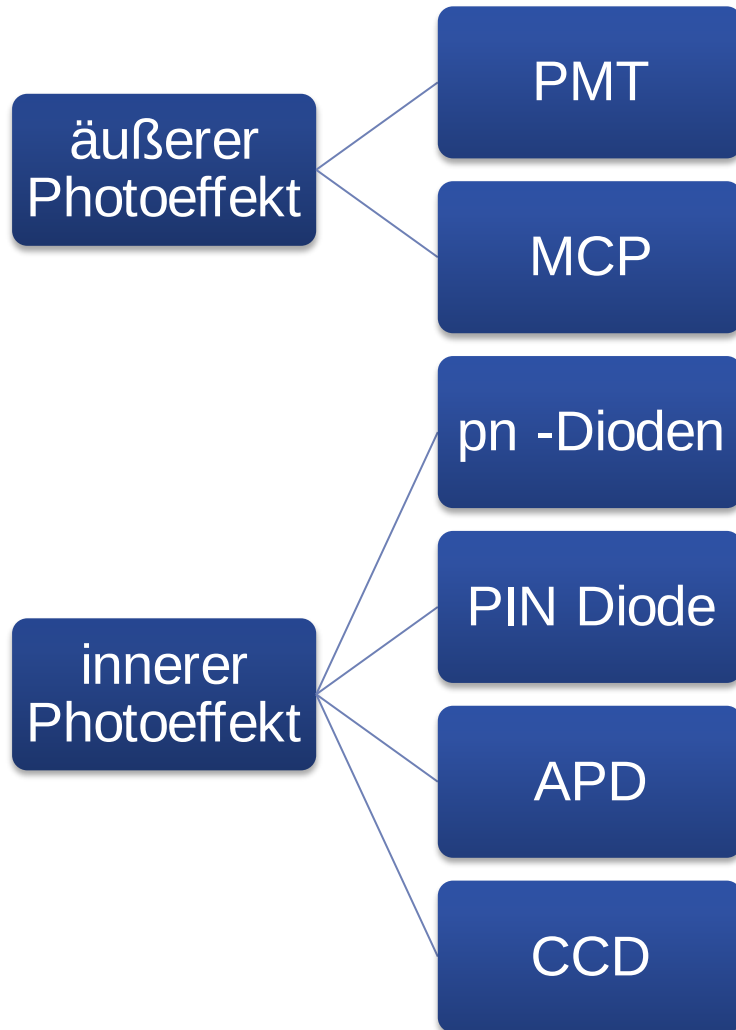
www.hamamatsu.de



www.hamamatsu.de

- Photonen generieren Elektronen und / oder Löcher
- Photosignal proportional der Photonenrate
- Beispiele
 - Photomultiplier Tube (PMT)
 - Dioden
 - Phototransistor
 - Solarzelle
- allgemeine Eigenschaften
 - schnell 👍
 - empfindlich 👍
 - Spektral selektiv 🙅
 - Temperatursensitiv 🙅

Quanten Detektoren



■ Äußerer Photoeffekt

- Photonen lösen freie Elektronen aus dem Material.
- Detektion der freien Elektronen nach Vervielfachung

■ Innerer Photoeffekt

- Photonen generieren durch Anregung von Elektronen aus dem Valenz- in das Leitungsband Ladungsträger im Material
- Detektion der Elektronen als Photostrom

optoelektronische Empfänger

Quanten
Erst die Theorie!

Thermisch

äußerer
PE

innerer
PE

konstant

moduliert

PMT

MCP

Dioden

Photoleiter

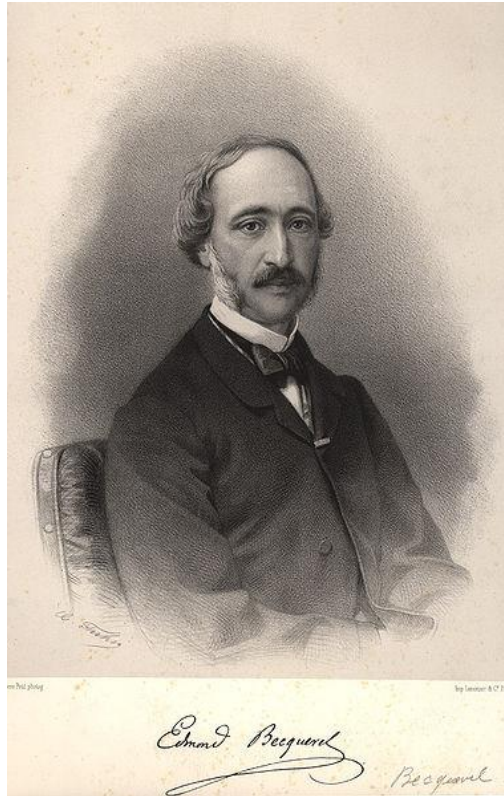
Thermo-
elektrischer
Effekt

Bolometer
Effekt

Pyro-
elektrischer
Effekt

Thermo-
pneu-
matischer
Effekt

Äußerer Photoeffekt



- 1839 Entdeckung durch Alexandre Edmond Becquerel (1820–1891)

- Metall- oder Halbleiter emittiert beim Auftreffen von optischer Strahlung auf dessen Oberfläche Photoelektronen in den Außenraum, wenn die Photonenenergie $h\nu$ größer als die photoelektrische Austrittsarbeit Φ ist.
- Es gilt gemäß Einstein

$$h\nu = \Phi + E_{\text{kin}}$$

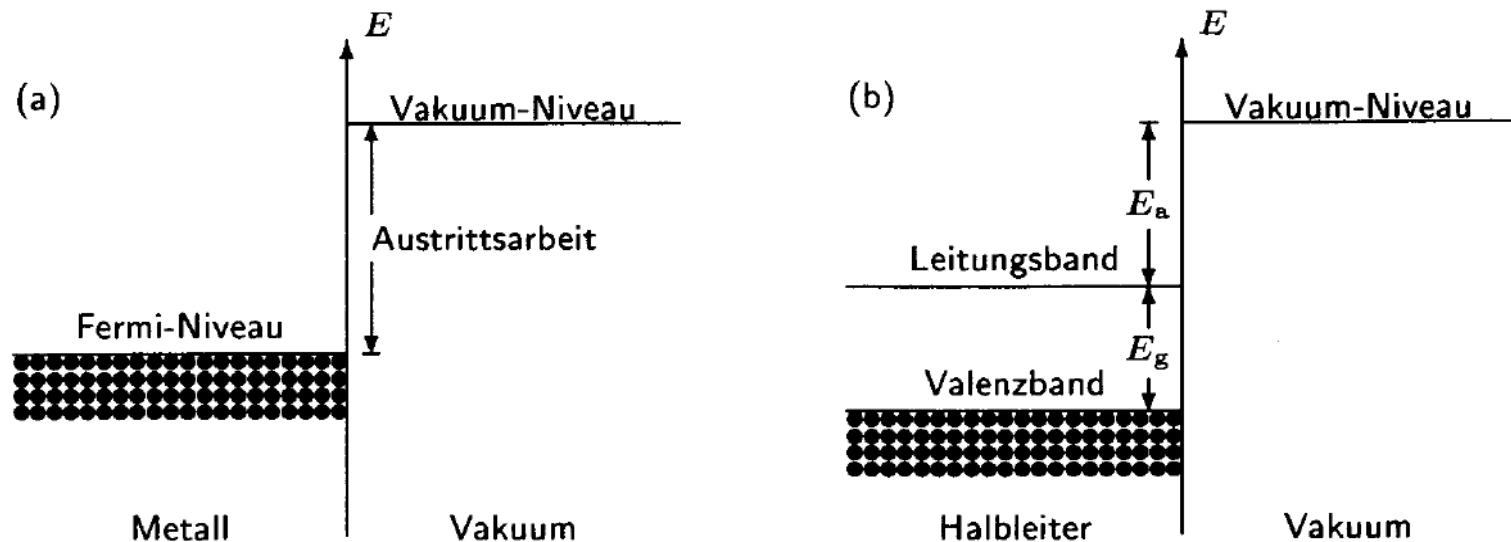
Äußerer Photoeffekt

Die Photonen müssen ausreichend Energie haben, um e^- ins Vakuum zu heben

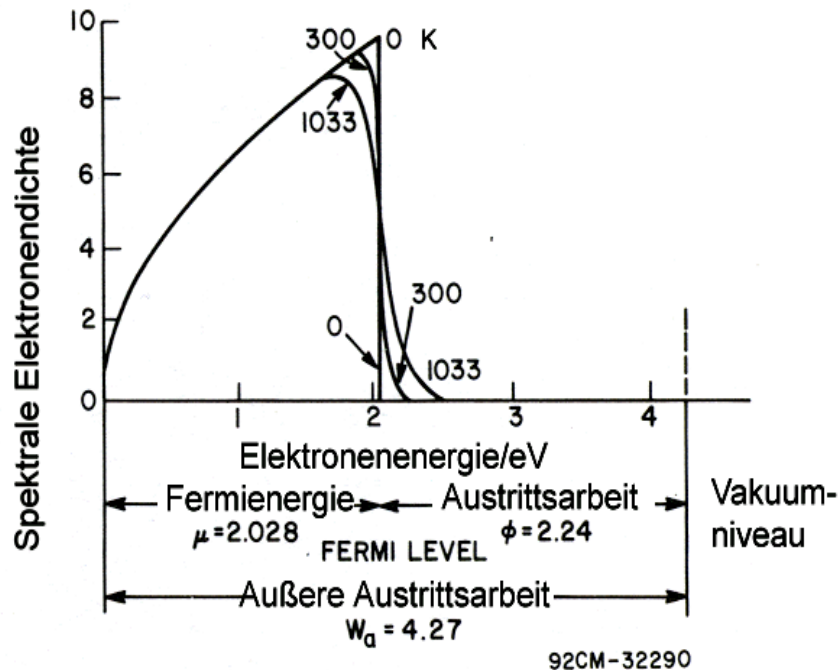
Nachteile Metall: - Metalloberflächen reflektieren gut $\rightarrow$ geringe Absorption
- e^- haben kurze freie Weglänge $\rightarrow$ verlieren schnell Energie

Halbleiter: - effiziente Absorption, relative lange Lebensdauern $\rightarrow$
erhöhte Entweichtiefe

Durch Oberflächen-Dotierung kann Potentialsprung ins Vakuum abgesenkt werden.



Metallische Photokathode

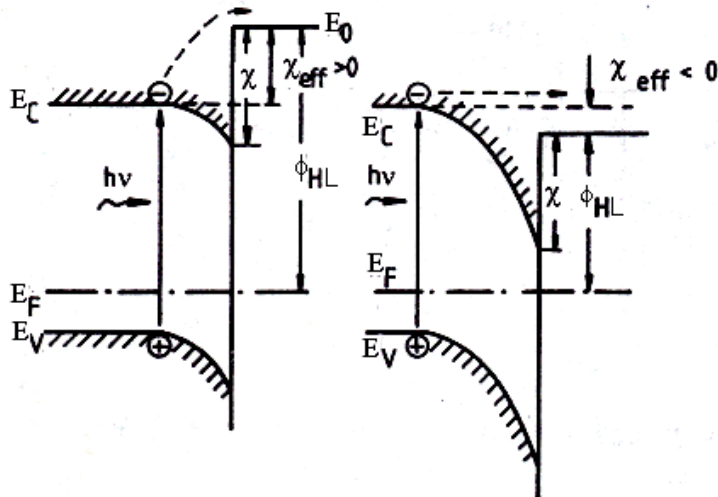


- Bei $T > 0$ K existieren im Metall freie Elektronen mit kinetischen Energien auch oberhalb der Fermienergie E_F .
 $T = 0$ K: E_F Deckel, E_C Boden des Potentialtopfs (potenzielle Energie)
- Schwacher Einsatz der spektralen Empfindlichkeit bereits bei $\lambda > hc / \Phi$ - Rot-Ausläufer; Verlauf nahe der Schwelle nach Fowler:

$$I_{ph} \propto A(\nu)(h\nu - \Phi)^2$$

- Austrittsarbeit Φ für Metalle zwischen 2 eV und 5 eV, am kleinsten für Alkalimetalle – empfindlich für VIS
- Metalle besitzen kleine Quantenausbeuten von nur einigen Promille, u.a. wegen Reflexions- und Stoßverlusten

Halbleiter | Photokathoden



- Bändermodell eines p-Halbleiter-Vakuumübergangs mit effektiver positiver bzw. negativer Elektronenaffinität χ_{eff} des Halbleiters; χ_{eff} ist die wirksame Barriere
- Halbleiterphotokathoden besitzen meist längere Grenzwellenlängen als Metallphotokathoden, z.T. im VIS, weil für viele Halbleiter $EG + \chi < \Phi_M$ ist.

- Halbleiterphotokathoden haben gegenüber Metallen wesentlich höhere Empfindlichkeiten, da
 - sie weniger Strahlung reflektieren d.h. mehr Strahlung absorbieren
 - die Energieverluste durch Elektron-Elektronstreuung wegen der geringeren Elektronendichte im Halbleiter erheblich geringer sind
 - die Fluchtweglänge der Elektronen (max. Laufstrecke, um noch die Oberfläche zu erreichen) einige zehn Nanometer und nicht wie bei Metallen nur einige Nanometer beträgt.

Quanten

Thermisch

äußerer

innerer

Dann die Praxis!

konstant

moduliert

PMT

MCP

Dioden

Photoleiter

Thermo-
elektrischer
Effekt

Bolometer
Effekt

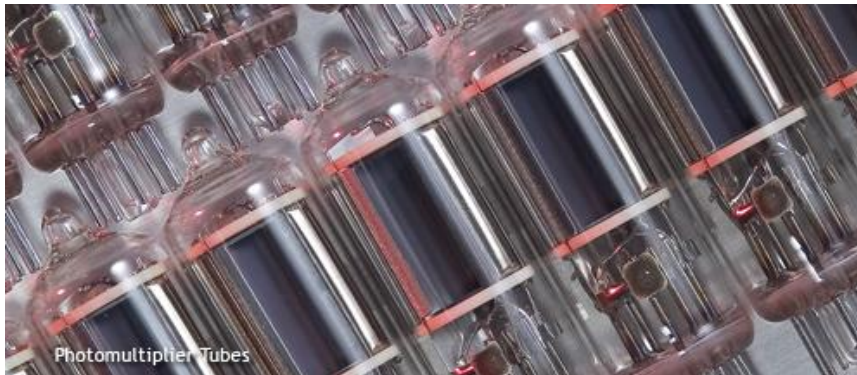
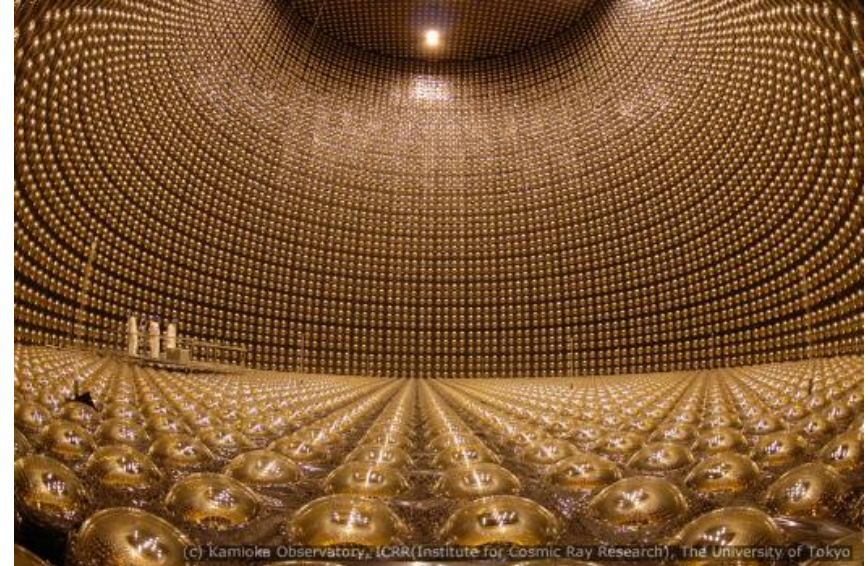
Pyro-
elektrischer
Effekt

Thermo-
pneu-
matischer
Effekt

Photomultiplier Tubes (PMT)



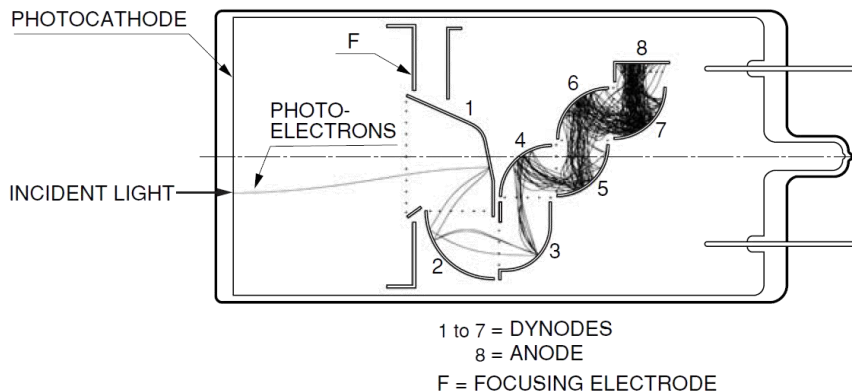
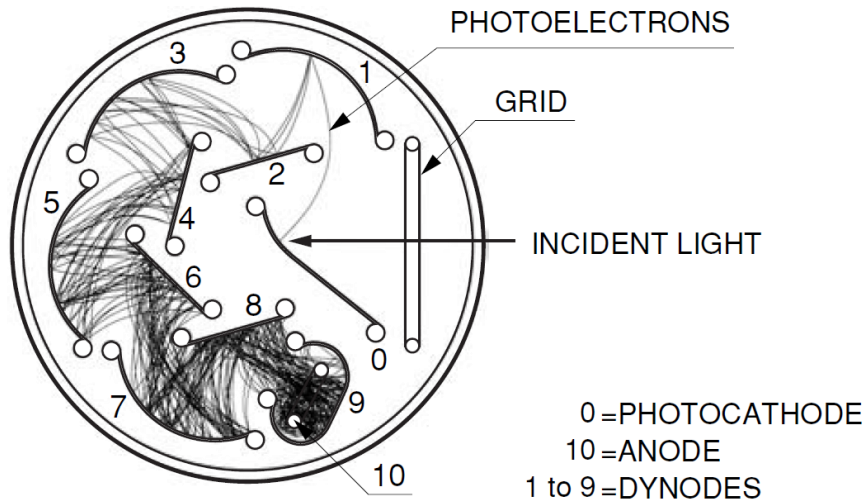
www.hamamatsu.com



<http://sales.hamamatsu.com/>

- Photomultiplier Tube
- Sehr sensitive Empfänger zum Nachweis einzelner Photonen
- 11.200 20-inch PMTs in Super-Kamiokande. Forschungseinrichtung in Japan für den Nachweis des Neutrinozerfalls. 1km tief im Berg eingebaut.

PMT Design



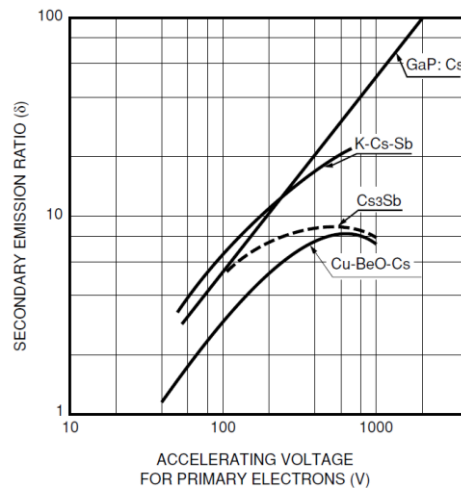
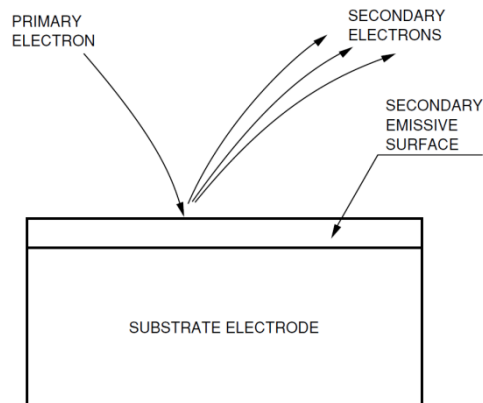
Aufbau

- Photokathode
- Dynoden (min 2, typ. 10, max 19)
- Anoden

Funktionsprinzip

- Photonen schlagen auf Photokathode und lösen Elektronen (äußerer Photoeffekt)
- Elektrisches Feld zwischen PK und Dynode beschleunigen Elektron
- Schnelles Elektron schlägt mehr Elektronen aus Dynode
- Stufenprozess bis zur letzten Dynode – Lawinenartig Vervielfachung.
- Elektronen werden auf der Anode gesammelt = Strom

http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/PMT_handbook_v3aE.pdf



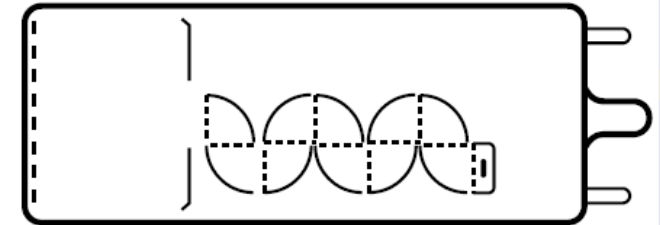
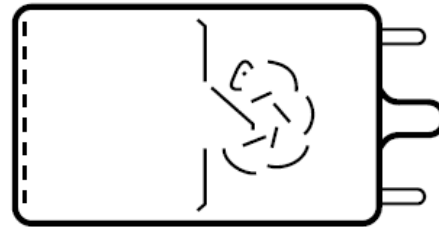
http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/PMT_handbook_v3aE.pdf

- Belche zur Elektronenvervielfachung und Lenkung
- Typ. Materialien:
 - Edelstahl | Nickel
- Dynoden vervielfachen die Elektronen
 - Bis zu 19 Stufen
 - Vervielfachung von 10^1 bis 10^8
- Sekundärelektronenemission abhängig von
 - Beschichtung
 - Elektronengeschwindigkeit (Energie)
- Typ. Beschichtungsmaterialien
 - Beryllium Oxyd | BeO
 - Magnesium Oxyd | MgO
 - Gallium Phosphid | GaP
 - Galliumarsenid Phosphid | GaAsP

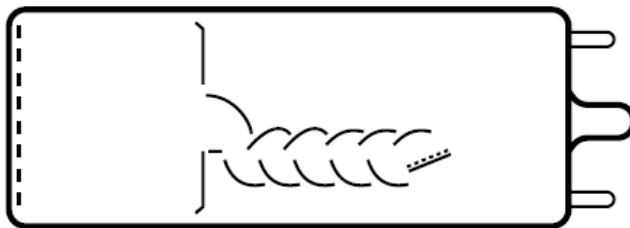
Bauarten von PMT -1



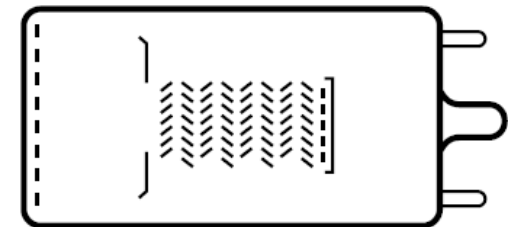
(1) Circular-cage Type



(2) Box-and-grid Type



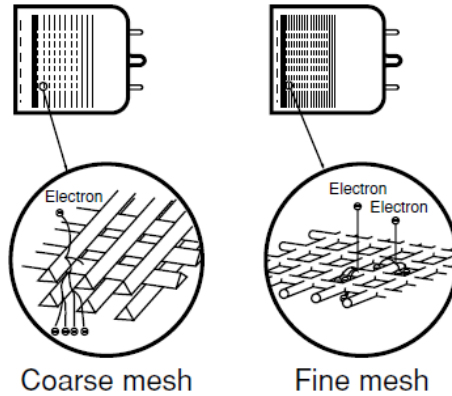
(3) Linear-focused Type



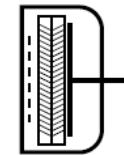
(4) Venetian Blind Type

http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/PMT_handbook_v3aE.pdf

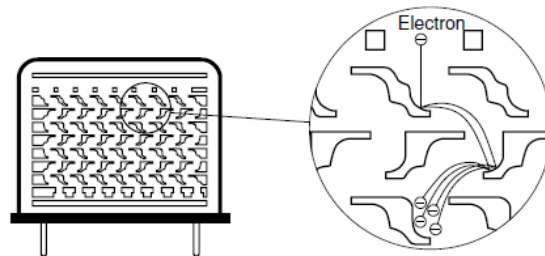
Bauarten von PMT - 2



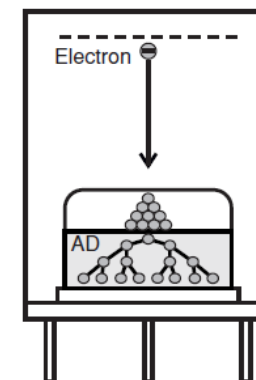
(5) Mesh Type



(6) Microchannel Plate Type



(7) Metal Channel Dynode Type



(8) Electron Bombardment Type

http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/PMT_handbook_v3aE.pdf

Eigenschaften von PMT

Dynode Type	Rise Time (ns)	Pulse Linearity at 2% (mA)	Magnetic Immunity (mT)	Uniformity	Collection Efficiency	Features
Circular-cage	0.9 to 3.0	1 to 10	0.1	Poor	Good	Compact, high speed
Box-and-grid	6 to 20			Good	Very good	High collection efficiency
Linear-focused	0.7 to 3	10 to 250		Poor	Good	High speed, high linearity
Venetian blind	6 to 18	10 to 40		Good	Poor	Suited for large diameter
Fine mesh	1.5 to 5.5	300 to 1000	500 to 1500*	Good	Poor	High magnetic immunity, high linearity
MCP	0.1 to 0.3	700	1500*	Good	Poor	high speed
Metal channel	0.65 to 1.5	30	5**	Good	Good	Compact, high speed
Electron bombardment type	Depends on internal semiconductor		—	Very good	Very good	High electron resolution

* In magnetic field parallel to tube axis

** Metal package PMT

- Die Bauart beeinflusst die Eigenschaften sehr stark
- Ideale Bauart abhängig von der Applikation
- Den perfekten PMT gibt es nicht.

http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/PMT_handbook_v3aE.pdf

Spektrale Charakteristik

■ Spektrale Charakteristik abhängig von

- Photokathodenmaterial
- Eingangsfenster

■ Charakteristik ist

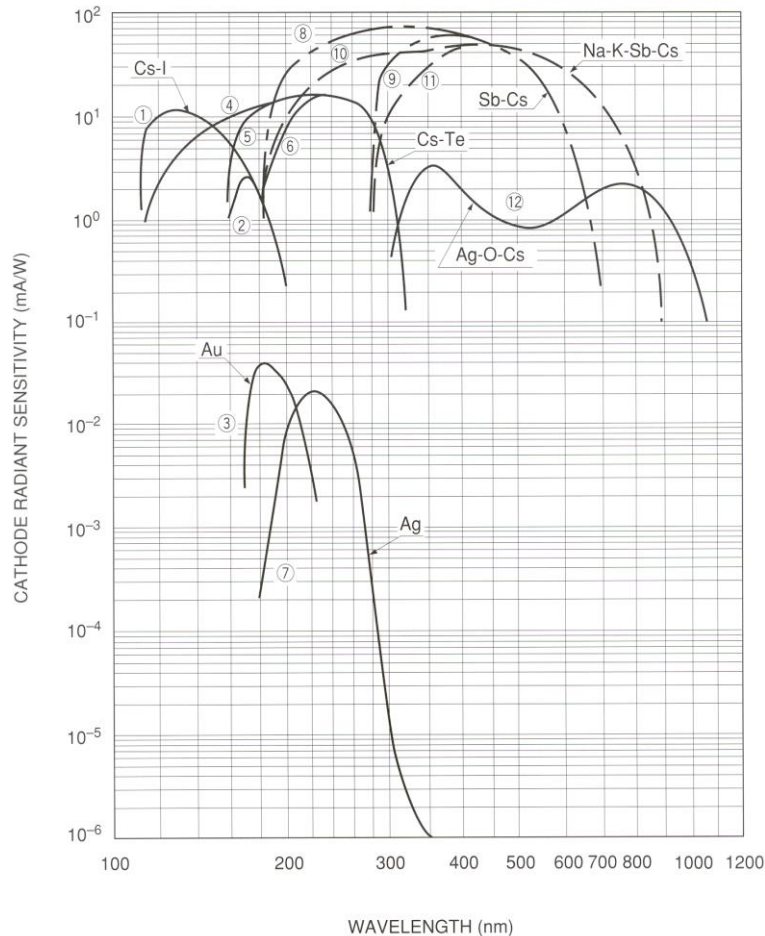
- stark wellenlängen-abhängig
- geringe QE
- eingeschränkt (kleiner Bereich)

Reflection mode photocathodes

Curve Code (S number)	Photocathode Material	Window Material	Luminous Sensitivity (Typ.) ($\mu\text{A/lm}$)	Spectral Response				
				Spectral Range (nm)	Peak Wavelength			
					Radiant Sensitivity (mA/W)		Quantum Efficiency (%)	
100M	Cs-I	MgF ₂	—	115 to 200	14	140	13	130
200S	Cs-Te	Quartz	—	160 to 320	29	240	14	210
200M	Cs-Te	MgF ₂	—	115 to 320	29	240	14	200
400K	Bialkali	Borosilicate	95	300 to 650	88	420	27	390
400U	Bialkali	UV	95	185 to 650	88	420	27	390
400S	Bialkali	Quartz	95	160 to 650	88	420	27	390
401K	High temp. bialkali	Borosilicate	40	300 to 650	51	375	17	375
500K (S-20)	Multialkali	Borosilicate	150	300 to 850	64	420	20	375
500U	Multialkali	UV	150	185 to 850	64	420	25	280
500S	Multialkali	Quartz	150	160 to 850	64	420	25	280
501K (S-25)	Multialkali	Borosilicate	200	300 to 900	40	600	8	580
502K	Multialkali	Borosilicate (prism)	230	300 to 900	69	420	20	390
700K (S-1)	Ag-O-Cs	Borosilicate	20	400 to 1200	2.2	800	0.36	740
—	GaAsP(Cs)	—	—	300 to 720	180	580	40	540
—	GaAs(Cs)	—	—	380 to 890	85	800	14	760
—	InP/InGaAsP(Cs)	—	—	950 to 1400	21	1300	2.0	1000 to 1300
—	InP/InGaAs(Cs)	—	—	950 to 1700	24	1500	2.0	1000 to 1550

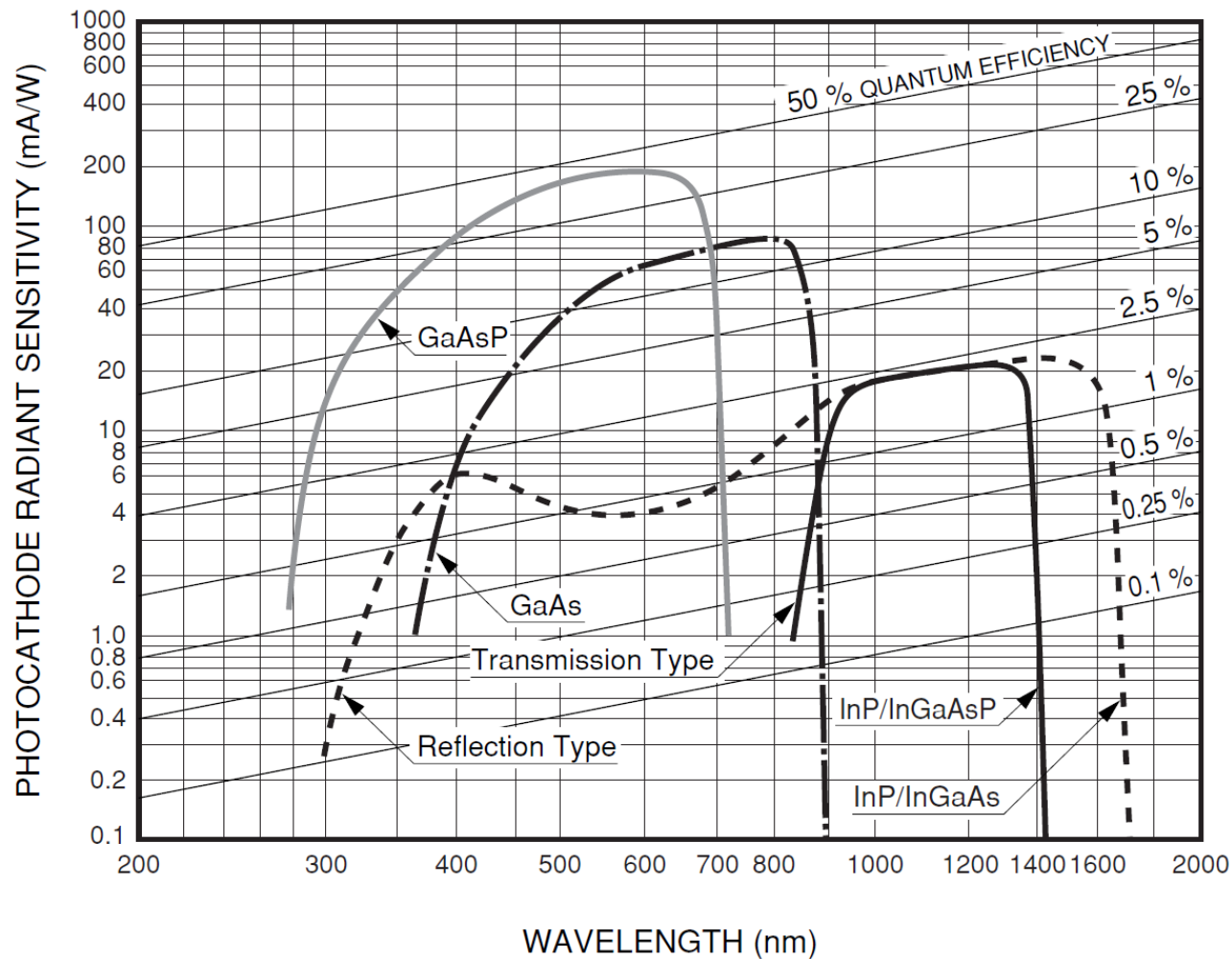
http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/PMT_handbook_v3aE.pdf

spektrale Eigenschaft | metallische Kathoden

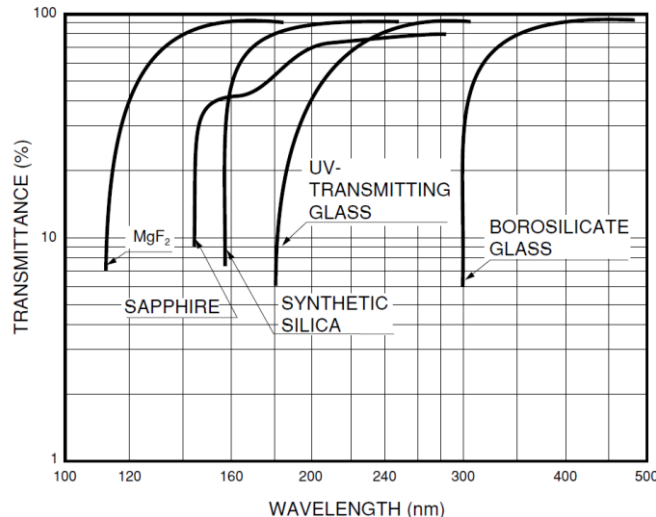


- Einige Nanometer dicke Metallschichten aufgedampft auf Träger aus Ag, Fe, Mo
- Cs-I und Cs-Te ergeben sonnenblinde Photokathoden, die bei hohen UV-Bestrahlungen relativ stark altern.
- Au-Photokathoden sind relativ stabil.

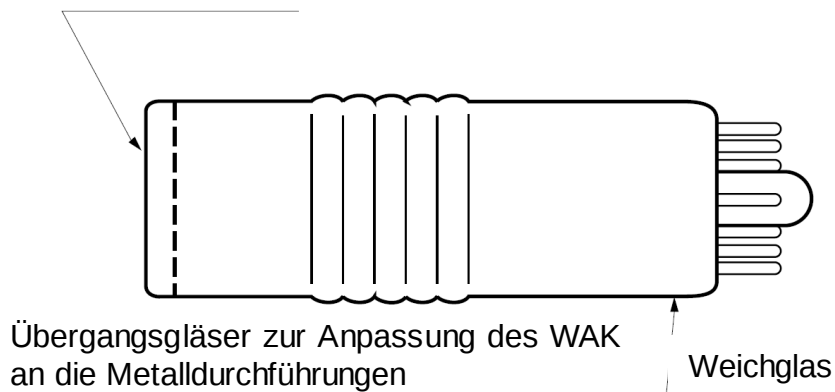
Spektrale Eigenschaften | HL Photokathode



Fenstermaterialien



Eintrittsfenster (Quarz)



■ Äußerer Photoeffekt

- Nutzung freie Elektronen
- Notwendigkeit von Vakuum
- Vakuum im Hüllkolben

■ Hüllkolben

- Transparent für Nutzwellenlänge
- Gläser = Langpassfilter im UV
- Unter Einsatzwellenlänge abhängig vom Fenstermaterial

■ Typ. Materialien

- Borosilikatglas | 300 nm | UVA
- UV Glas | 200nm | UVB UVC
- Quarz | 160nm | UVC
- MgF₂ | 115nm | VUV

http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/PMT_handbook_v3aE.pdf

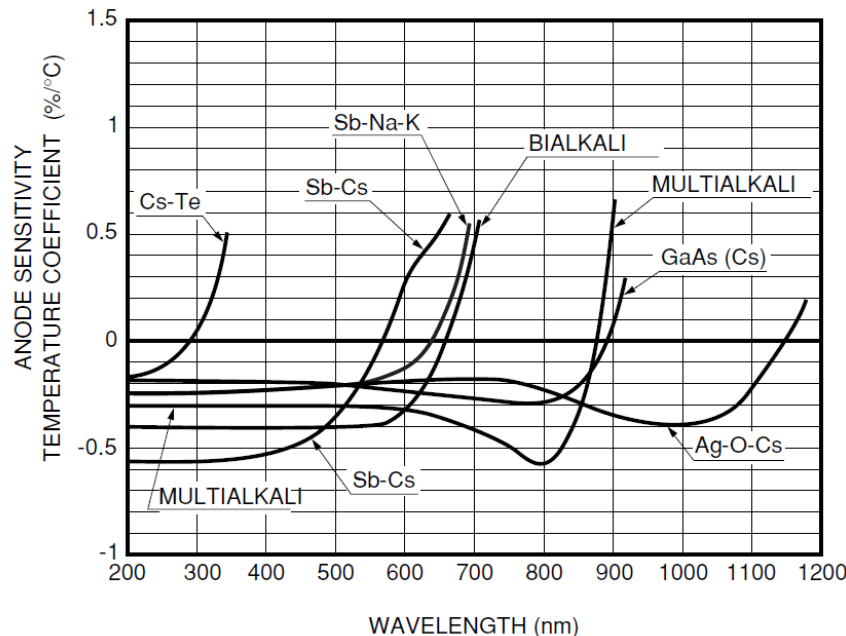
PMT Temperaturabhängigkeit | Empfindlichkeit

■ Empfindlichkeit (T)

- Bestimmt durch Photokathode
- effektives Dynoden-Gain unempfindlich gegen T

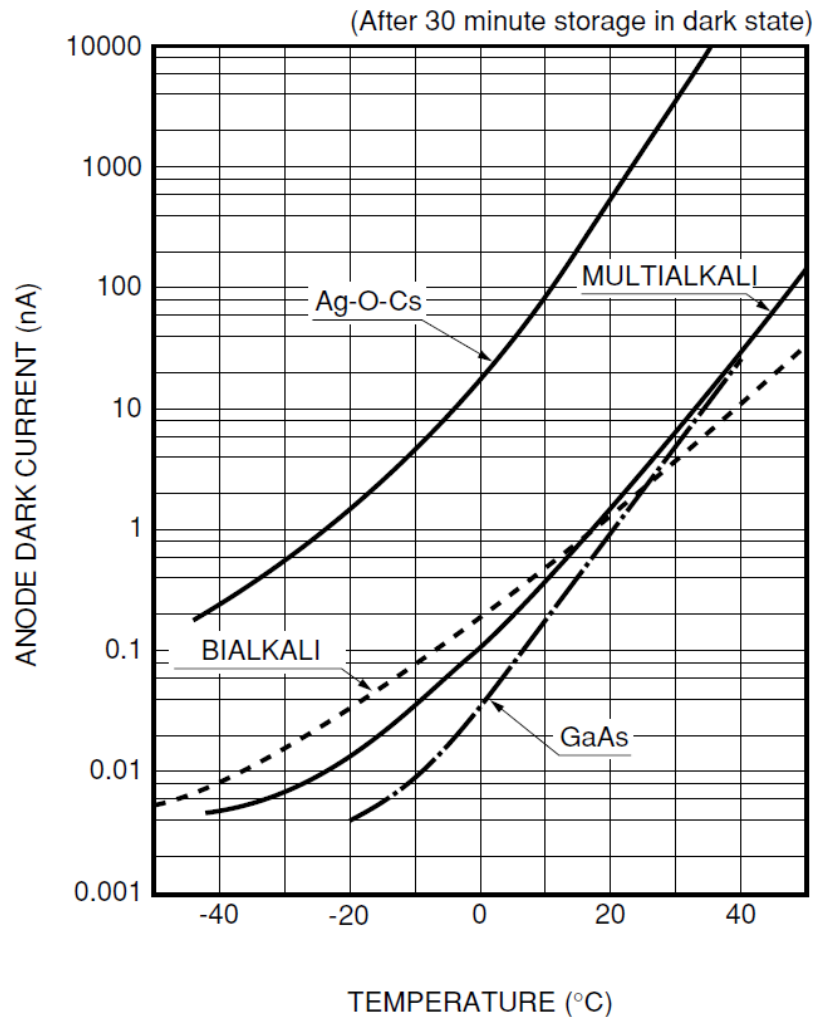
■ Temperaturkoeffizient Photokathode

- Wellenlängenabhängig
- Relativ groß $> 0,5 \% / ^\circ\text{C}$
- negativ bei kleinen Wellenlängen
- positiv am langen Wellenlängenende



http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/PMT_handbook_v3aE.pdf

PMT Dunkelstrom



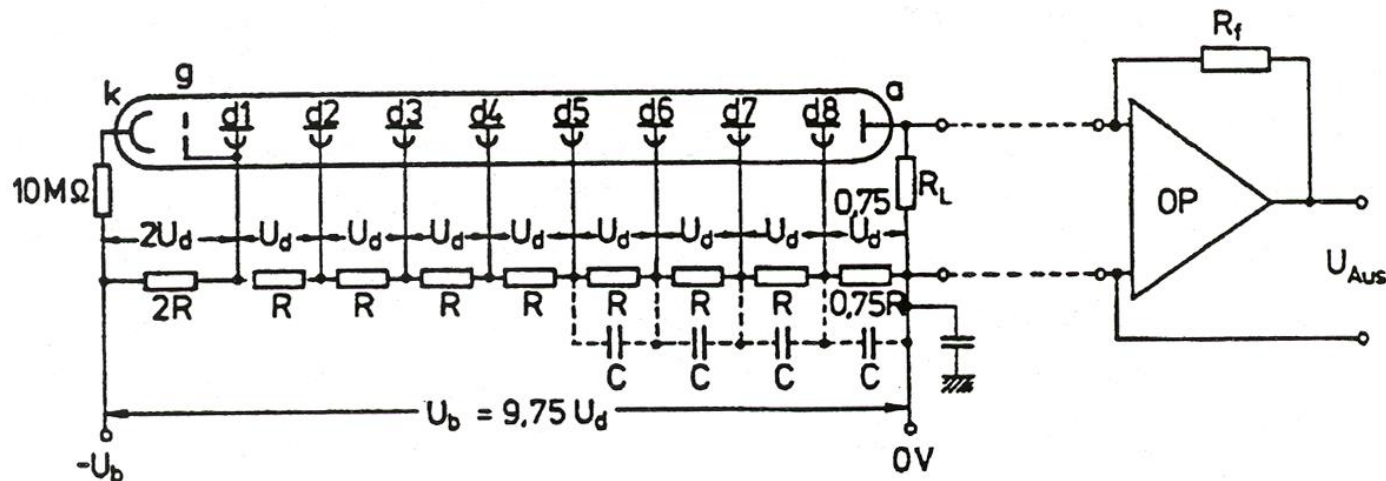
■ Photokathode

- Halbleiter mit geringer Austrittsarbeit
- großer Einfluss von T auf Austrittsarbeit
- großer Einfluss von T auf Dunkelstrom

■ Maßnahmen

- Kühlung des PMT bei Anwendungen mit wenig Licht.
 - Achtung auf Kondenswasser
 - Nutzung von Vakuum Fenster
- Temperatur stabilisieren bei radiometrischen Anwendungen
- Achtung bei Messungen absoluter Größen wie I, E

PMT Beschaltung



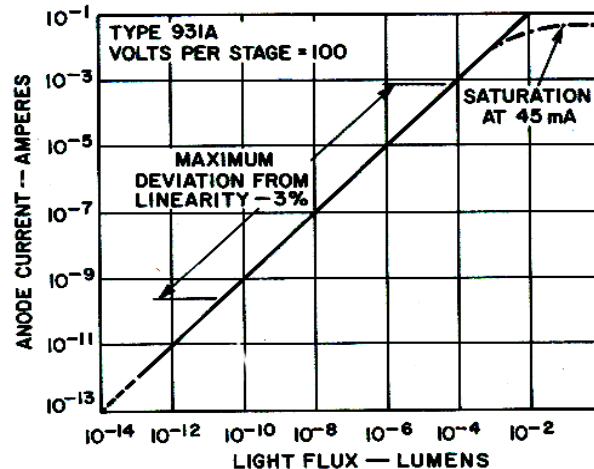
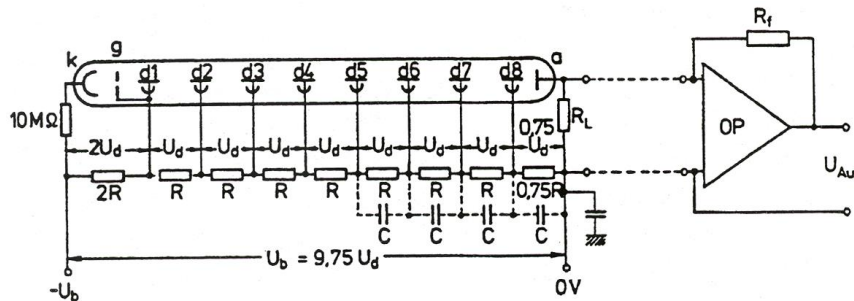
Anforderung

- Stufenpotential von Dynode zur Dynode
- konstante und gleiche Spannung
- Erzeugung der Stufenspannungen über ohmsche Widerstandskette

Signal

- Anodenstrom = verstärkter Kathodenstrom über Messwiderstand R_L

PMT Beschaltung



- Zur Erzeugung der Stufenspannungen ohmsche Widerstandskette, über der die Hochspannung geteilt wird.
- Anodenstrom = verstärkter Kathodenstrom fließt über Messwiderstand R_L ab.
- Photomultiplier nur linear, wenn Kettenstrom sehr groß (Faktor ≥ 100) gegen Anodenstrom ist
- Bei stark pulsierender Bestrahlung werden die letzten Kettenwiderstände kapazitiv abgestützt

PMT Ersatzschaltbild

$$\delta = p \cdot (U_d)^q$$

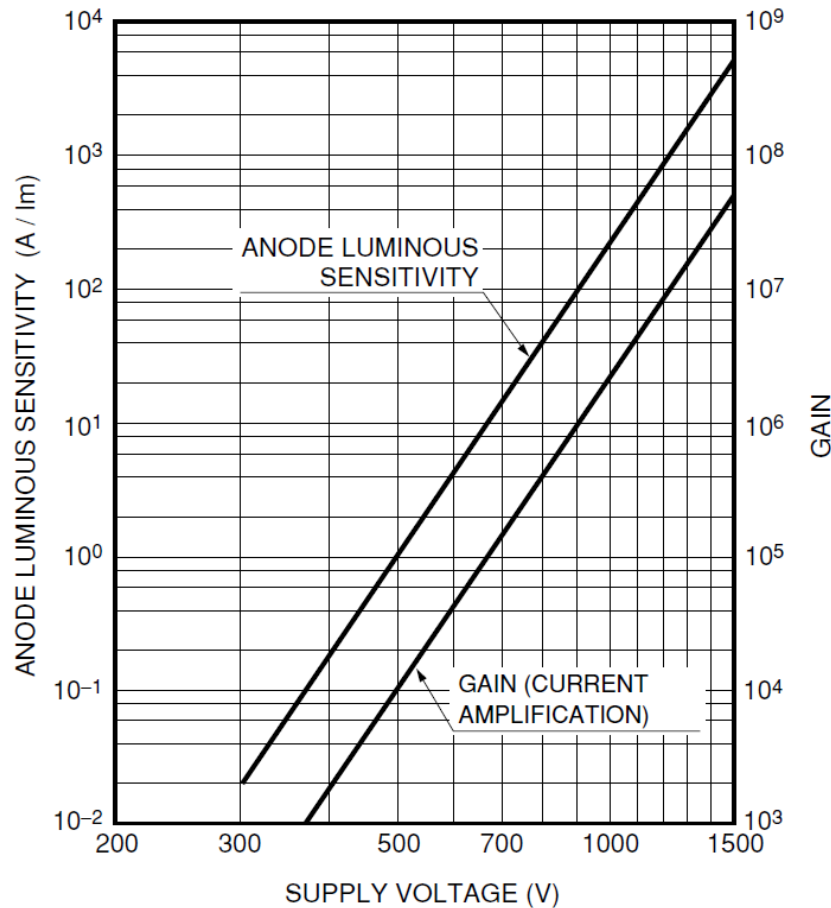
$$G = \frac{I_A}{I_K} = f(g \cdot \delta)^n \propto (U_H)^{q \cdot n}$$

$$\frac{\Delta G}{G} = q \cdot n \frac{\Delta U_H}{U_H}$$

- Im Ersatzschaltbild stellt sich der Photomultiplier als eine sehr gute Stromquelle mit einem Innenwiderstand $> 10^{12} \Omega$ und Kapazität $< 10 \text{ pF}$ dar.

- Sekundärelektronenausbeute pro Stufe, abhängig von der Interdynodenspannung U_d und q ; $q=0,7 - 0,8$ abhängig von Material und Struktur
- Gesamte Stromverstärkung G variiert mit einer Potenz $q \cdot n=6 - 10$ der Hochspannung U_H .
 - f - Grad der Fokussierung auf die erste Dynode
 - g - Anteil der Elektronen von einer Stufe zur nächsten
- Um Verstärkung konstant auf 1% konstant zu halten, ist die Hochspannung auf etwa 1 ‰ zu stabilisieren!

Verstärkerspannung



■ Verstärkung

- abhängig von Beschleunigungsspannung
- Um Verstärkung auf 1% konstant zu halten, ist die Hochspannung auf etwa 1⁰/₀₀ zu stabilisieren!

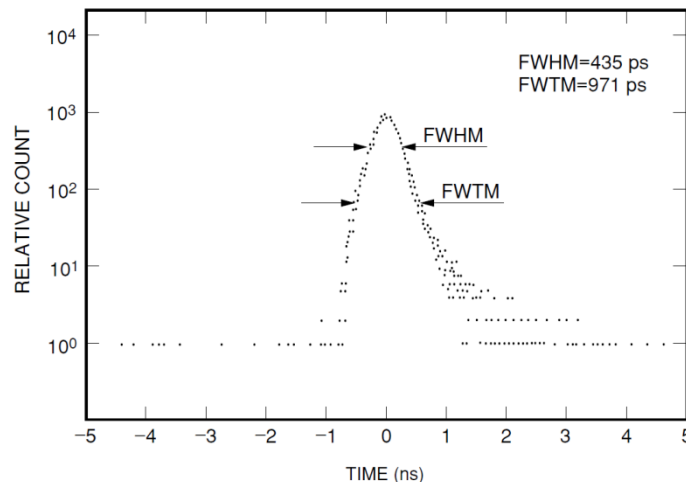
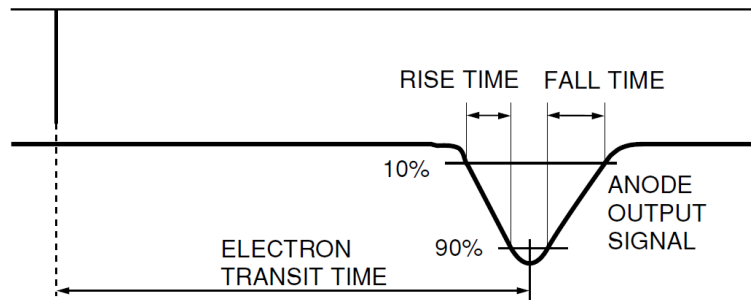
■ Sehr stabile Spannungsquellen benötigt.

- Extrem konstant (kein Rippel)
- Hohe Spannung > 1kV
- kleine Ströme

http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/PMT_handbook_v3aE.pdf

Definition der Zeiten eines PMT

DELTA FUNCTION LIGHT



■ Transit Time

- Totzeit zwischen Einfall Photon und Anodenstrom
- Bauart abhängig
- Bereich 10 - 20 ns

■ Rise- und Fall-Time

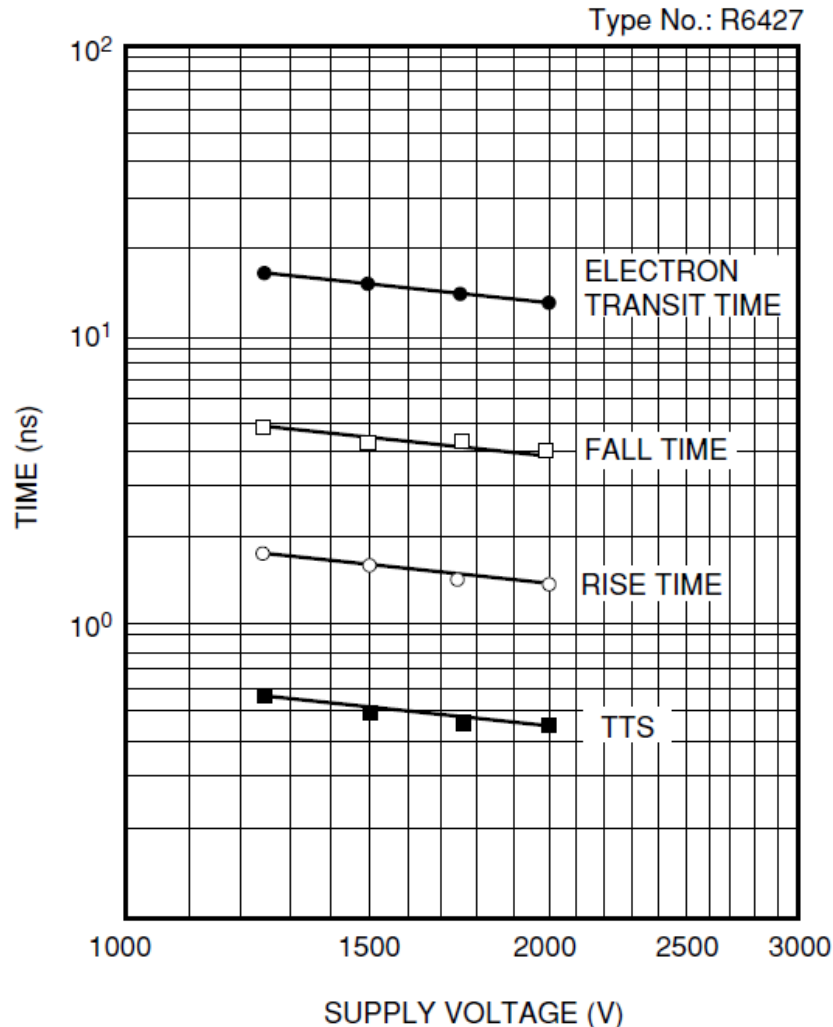
- Flanken des Antwortpulses
- abhängig von Beschaltung
- abhängig von Eingangskapazität des PMT
- Bereich ps bis ns
- Rise Time > Fall Time

■ TTS (Transit Time Spread)

- Variation der Transitzeit
- vor allem bei geringer Ausleuchtung

http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/PMT_handbook_v3aE.pdf

Zeitverhalten



http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/PMT_handbook_v3aE.pdf

- Zeitverhalten wird beeinflusst von
 - Verstärkerspannung
 - Aufbauprinzip
- Transit Time
 - Bauart abhängig
 - Bereich 10 - 20 ns
- Rise- und Fall-Time
 - abhängig von Beschaltung
 - abhängig von Eingangskapazität des PMT
 - Bereich ps bis ns
 - Rise Time > Fall Time
- TTS (transit time spread)
 - abhängig vom Ausleuchtungsniveau
 - Bauart abhängig

Quanten

Thermisch

äußerer
PE

innerer
PE

Nächstes Thema!

konstant

moduliert

PMT

MCP

Dioden

Photoleiter

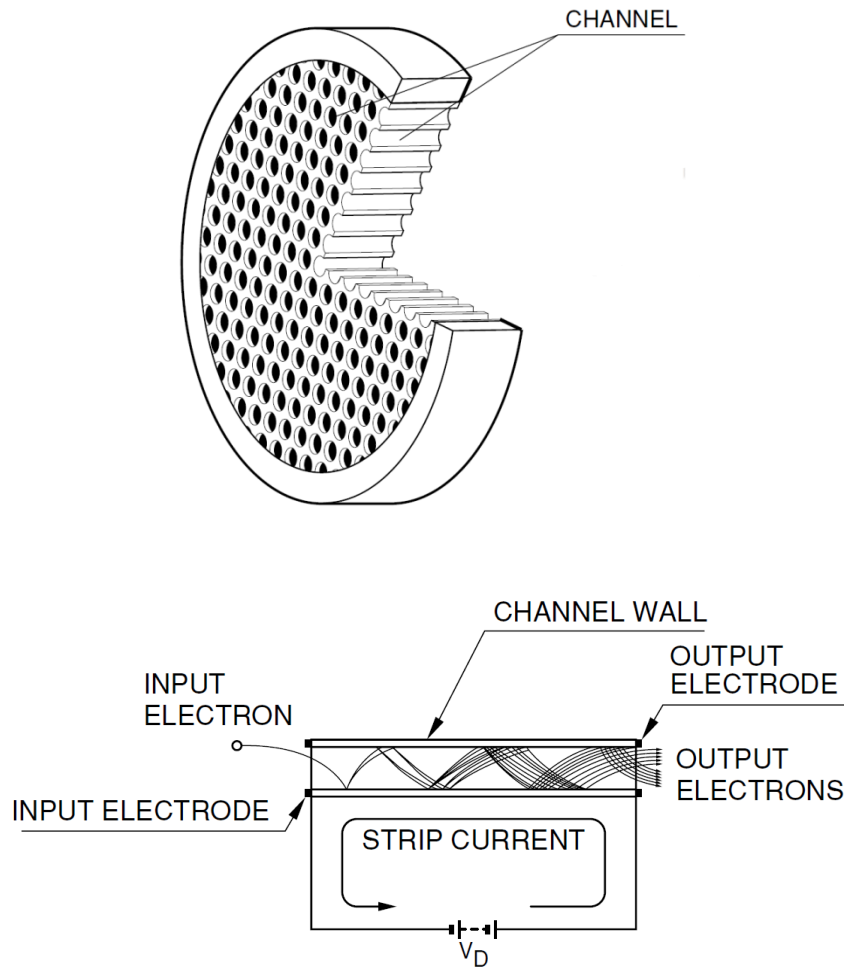
Thermo-
elektrischer
Effekt

Bolometer
Effekt

Pyro-
elektrischer
Effekt

Thermo-
pneu-
matischer
Effekt

Multi-Channel-Plate (MCP)



■ Mikrokanalplatte

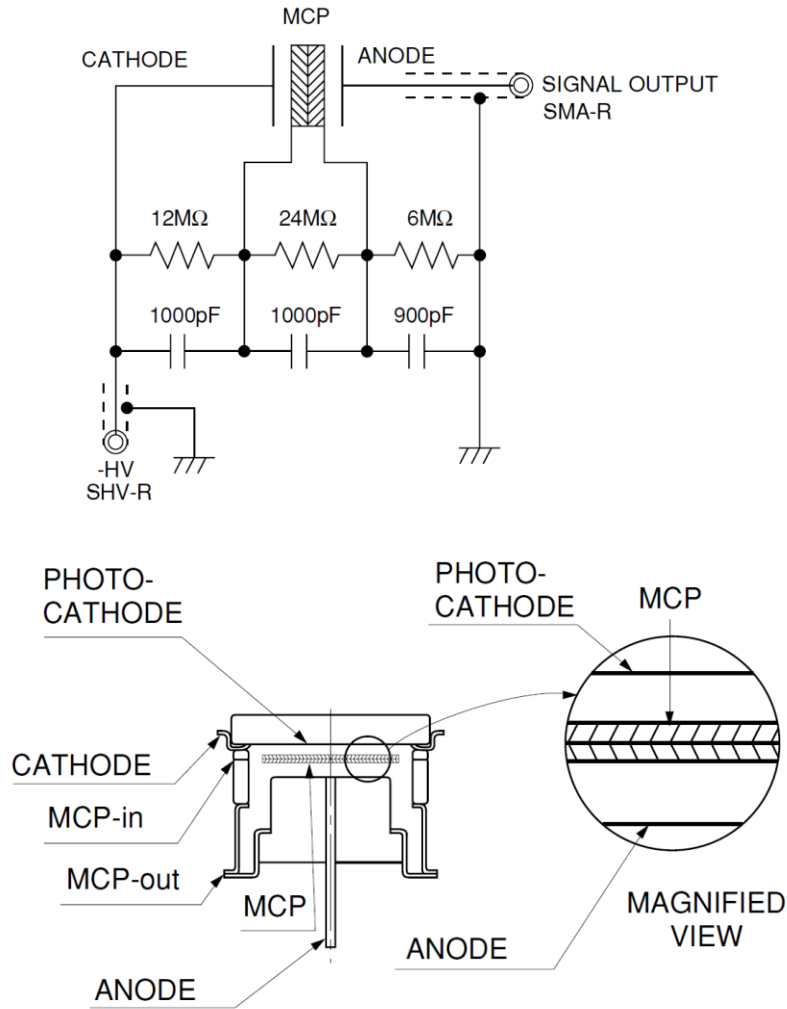
- Feine Glasröhren = PMT
- Durchmesser 6 – 20 μm
- Beschichtung der Innenwand
- Metallische Beschichtung auf den Stirnflächen

■ Eigenschaften

- Hohe Verstärkung in kleiner Bauform
- sehr schnelle Reaktionszeit
- 2D – Bilderhaltend
- unempfindlich gegen B-Felder
- empfindlich für Elektronen, UV-, X-Ray, Gamma-, Neutronenstrahlung

http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/PMT_handbook_v3aE.pdf

Beschaltung MCP



■ Prinzip

- Photokathode erzeugt Elektronen
- Elektronen werden auf MCP beschleunigt
- Sekundärelektronenvervielfachung im Kanal
- Anode empfängt Elektronenstrom

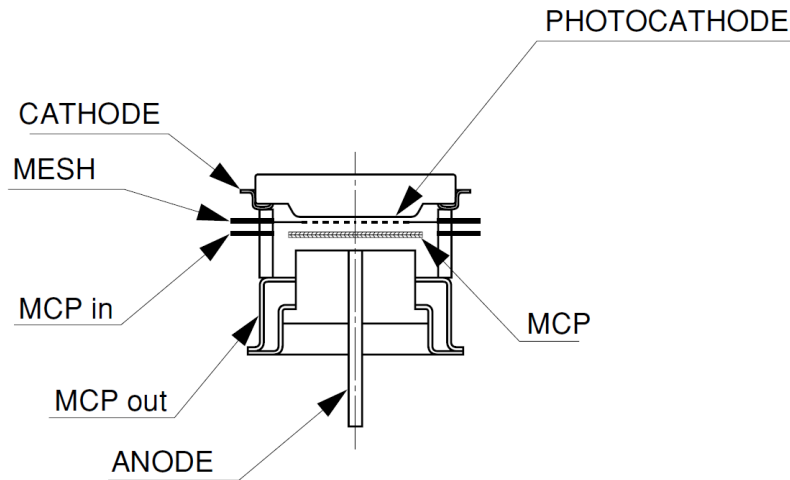
■ Aufbau

- Wand ist Dynode
- Winkel zwischen Wand und optischer Achse
- Hochspannung an Stirnflächen

http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/PMT_handbook_v3aE.pdf

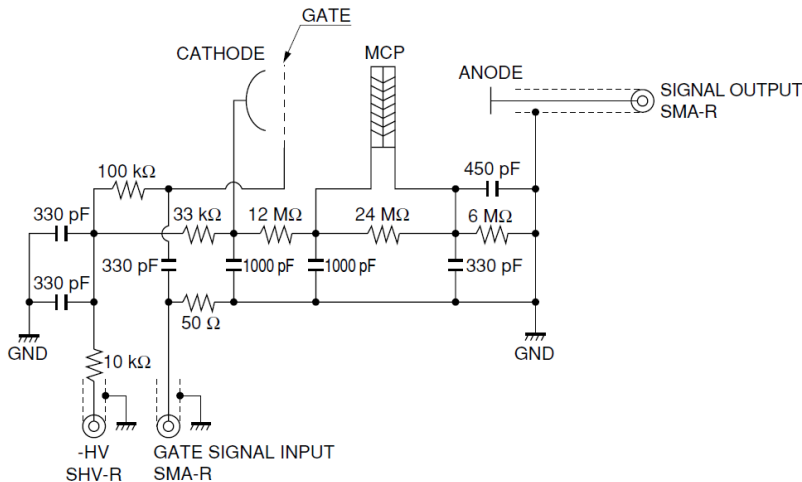
MCP als optischer Schalter

- MCP als sehr schneller optischer Schalter
- Verstärkungsspannung $\sim 8\text{kV}$ an MCP dauerhaft an.
- Rise / Fall-Time 150ps bis 700ps
- Transsitzzeit des MCP $\sim 400\text{ps}$



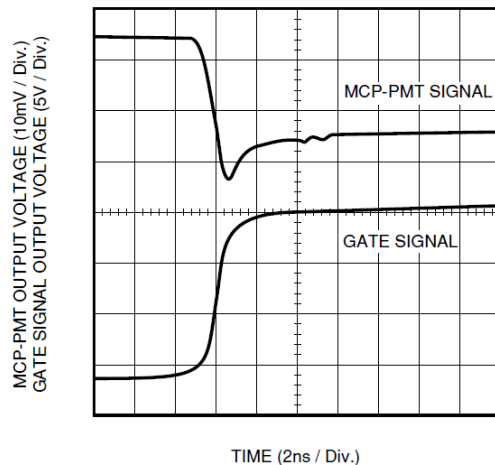
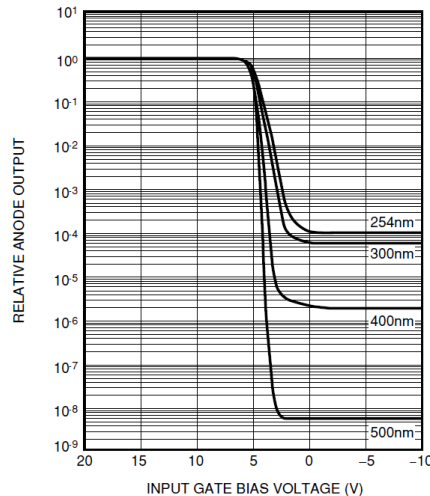
■ Schaltzustände

- AUS: Photokathode positiv ($\sim 10\text{V}$) gegenüber Gateelektrode (Bremsung)
- EIN: Photokathode negativ ($\sim 10\text{V}$) gegenüber Gateelektrode (Beschleunigung)



http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/PMT_handbook_v3aE.pdf

MCP als optischer Schalter



- Gate-Elektrode kann nur Elektronen beeinflussen.
 - Photonen hoher Energie können direkt MCP anregen.
 - Hoher Dunkelstrom bei kurzen Wellenlängen
 - Blockrate wellenlängenabhängig.
-
- MCP kann mit kleinen Spannungshüben schnell geschaltet werden.
 - Schaltzeiten abhängig von Spannungsquelle und Aufbau im ns bis Sub-ns Bereich.

http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/PMT_handbook_v3aE.pdf