

6. Prinzipien von Szintillations-Detektoren:

- (a) Szintillationsmechanismus
- (b) Organische, anorganische Szintillatoren: Lichtausbeute, Wellenlängenschieber
- (c) Nachweiseffizienz für Strahlung: schwere Ionen, Elektronen, Gammastrahlung, Neutronen
- (d) Photomultiplier, Avalanche-Photodioden: Konstruktionsprinzipien, Einsatzgebiete, Limitierungen

Scintillations-Detektoren

Ionisation und Anregung ~~ist~~ ^{sind} die wesentlichen Mechanismen, mit denen Teilchen ihre Energie auf das Detektormaterial übertragen. Dies gilt auch für Festkörper. Allerdings wird hierbei zur Messung des Energieübertrags meist ein anderer Mechanismus als die Ladungsmessung benutzt. Und zwar wird das Licht registriert, welches als Folge von Rekombination bzw. Abregung emittiert wird. Bei transparenten Festkörpern liegt die Frequenz dieses Lichtes (mitunter weit) jenseits des UV-Bereichs, sodass erst nach einer Wellenlängeverschiebung in den sichtbaren Bereich das Licht den Festkörper verlassen und somit gemessen werden kann. Solche Lichtemission bei Bestrahlung mit Teilchen wird **Scintillation** genannt. Scintillationslicht tritt bei anorganischen wie auch organischen Substanzen auf. Die Mechanismen der Lichtentstehung sind für diese beiden Stoffklassen aber verschieden. Ein Beispiel für Scintillationslicht ist die Leuchtschicht einer Fernrohrlinse, die die Elektronen der Elektronenkanone "nachweist" durch aufleuchten.

Scintillations-Detektoren

Besondere Eigenschaften:

- kurze Antwortzeit zw. einigen 100 ps bis zu 1 μ s
- Lichtsignal proportional zur Energie deposition
- Teilchenunterscheidung durch charakt. Pulsform des Lichtsignals

Anforderungen an Scintillationsmaterial für Detektoranwendungen:

- Hohe Effizienz bei Umwandlung der Anregungsenergie in Scintillationslicht
- Transparenz für Scintillationslicht
- Lichtspektrum im geeigneten Frequenzbereich für Photokathoden der Photomultiplier
- kurze Abklingzeit des Scintillationslicht nach Energiedeposition (\rightarrow geringe Totzeit bis zur Bereitschaft, das nächste Teilchen nachzuweisen)

Anorganische Szintillatoren...

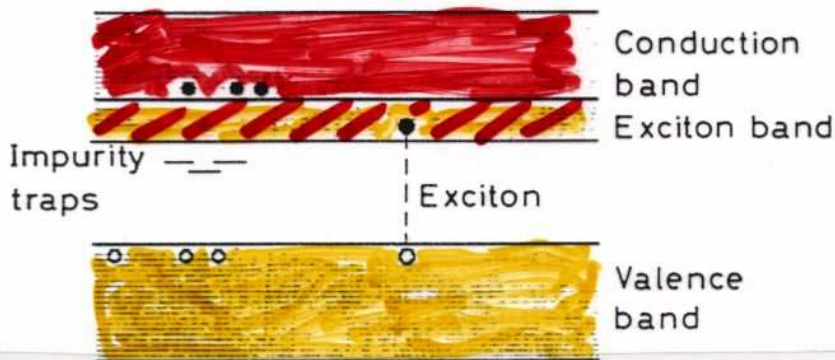


Fig. 7.7. Electronic band structure of inorganic crystals. Besides the formation of free electrons and holes, loosely coupled electron-hole pairs known as excitons are formed. Excitons can migrate through the crystal and be captured by impurity centers.

... sind meist Kristalle oder Glas, die mit Aktivator-
Zentren dotiert sind. Durch Teilchenstrahlung werden
in diesen anorg. Szintillatoren freie Elektronen, freie Löcher
und **Exitonen** (Elektron-Loch-Paare) erzeugt. Die Aktivator-
Zentren dienen zur Wellenlängenverschiebung, denn Licht aus
Rekombination & Abregung hat nur eine geringe freie Weglänge
bis zur erneuten Absorption ("Resonanzstreuung"). Freie Elektronen,
freie Löcher und Exitonen wandern durch den Kristall, treffen
auf ein Aktivator-Zentrum (Farbzentrum), übertragen ihre Energie,
die dann von Aktivator bei geringerer Frequenz abgestrahlt
wird und den Kristall verlassen kann.

Anorganische Szintillatoren

Eigenschaften (pos. & neg.):

- + kurze Strahlungslänge X_0
- + hohe Lichtausbeute (pro Energieverlust)
→ wichtig für Genauigkeit der Energiemessung
- langsame Lichtemission typ. einige 100 ns Abklingzeit
- Feuchtigkeitsempfindlichkeit (Hygroskopie) mancher Kristalle (z.B. NaI, CsI, BaF₂)

Anorganischer & organische Szintillatoren

Eigenschaften anorganischer Szintillatoren

Szintillator	NaI(Tl)	CeF ₃	CsI(Tl)	BGO Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	Ba F ₂	viele weitere ...
Dichte(g/cm ³)	3.67	6.16	4.51	7.13	4.9	
Schmelzpunkt(°C)	650		620			
Abklingzeit(ns)	230	5 20	1000	350	620	0.6
λ _{max} (Emission)(nm)	410	300 340	550	480	310	225
Ausbeute (Photonen/MeV)	4x10 ⁴		1.1x10 ⁴	2.8x10 ³	6.5x10 ³	2x10 ³
Strahlungslänge X ₀ (cm)	2.59	1.68	1.86	1.12	2.1	
Brechungsindex n	1.85		1.80	2.15	1.56	
(dE/dx) _{min} (MeV/cm)	4.2		5.1	8.07	6	
hygroscopisch	sehr	nein	etwas	nein	leicht	

Organische Fluoreszenzstoffe und Wellenlängenschieber

Primärer Fluoreszenzstoff	Struktur	λ _{max} Emission (nm)	Abkling- zeit (ns)	Ausbeute/ Ausbeute (NaI)
Naphtalen C ₁₀ H ₈		348	96	0.12
Anthracen C ₁₄ H ₁₀		440	30	0.5
p-Terphenyl C ₁₈ H ₁₄		440	5	0.25
PBD C ₂₀ H ₁₄ N ₂ O		360	1.2	

+ ...
viele
weitere

Wellenlängenschieber

POPOP C ₂₄ H ₁₆ N ₂ O ₂		420	1.6
bis-MSB		420	1.2

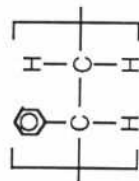
Appendix II.A

Glossary of common solvents and fluors

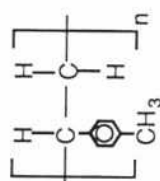
(A) Solvents

Plastics:

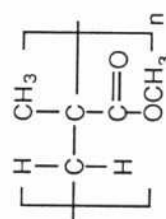
[1] PS polystyrene



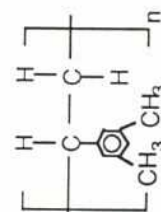
[2] PVT polyvinyltoluene



[3] PMMA polymethylmethacrylate

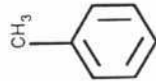


[4] PVX polyvinylxylene



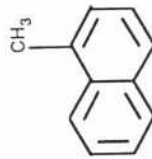
Liquid:

[5] Toluene



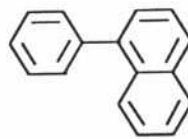
[6] 1MN

1-methyl-naphthalene

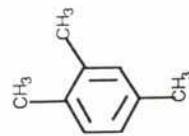


[7] 1PN

1-phenyl-naphthalene



[8] pseudocumene

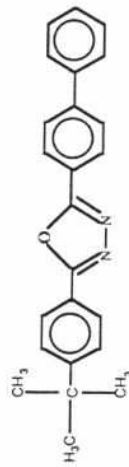
*(B) Primary Fluors*

[1] PTP

para-terphenyl

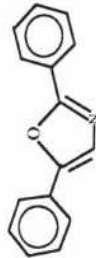


[2] BPBD

2-(4-biphenyl)-5-(4-*tert*-butylphenyl)-1,3,4-oxadiazole

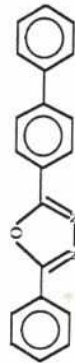
[3] PPO

2,5-diphenyloxazole

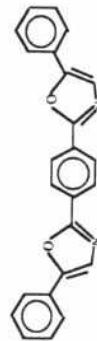


[4] PBD

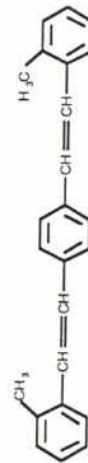
2-(4-biphenyl)-5-phenyl-1,3,4-oxadiazole

*(C) Secondary Fluors*

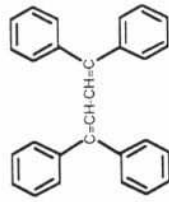
[1] POPOP

p-bis[2-(5-phenyloxazolyl)]benzene

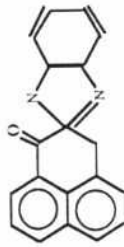
[2] bis-MSB

p-bis(*o*-methylstyryl)benzene

[3] TPB 1,1,4,4-tetra-phenylbutadiene



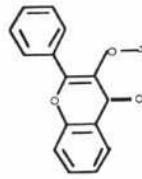
[4] BBQ 7H-benzimidazo[2,1-a]benz[de]isoquinoline-7-one



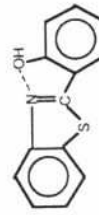
[5] Y7, K27 proprietary fluors

(D) Large Stoke Shift Fluors ($>10,000 \text{ cm}^{-1}$)

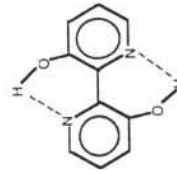
[1] 3HF 3-hydroxyflavone



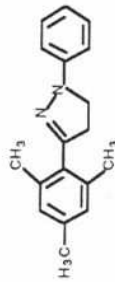
[2] HBT 2-(2'-hydroxyphenyl)-benzothiazole



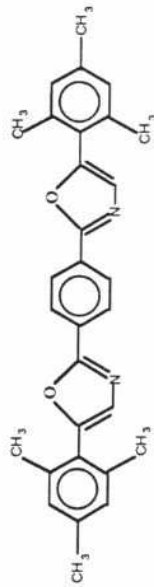
[3] BPD 2,2'-bipyridyl-3,3'-diol



[4] PMP 1-phenyl-3-mesityl-2-pyrazoline

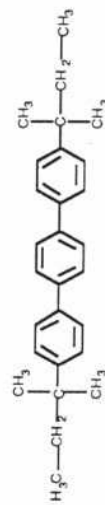


[5] MOPOM

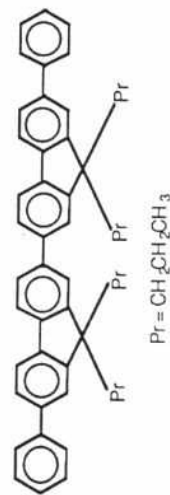


(E) Oligophenylenes

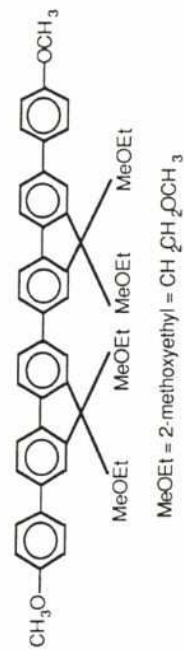
[1] DAT 4,4''-di-t-amyl-terphenyl



[2] O408 Oligo 408



[3] O415 Oligo 415



MeOEt = 2-methoxyethyl = $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_3$

Organische Szintillatoren

Im Gegensatz zu den anorganischen Szintillatoren spielt sich bei organischen Szintillatoren der Lichtentstehungsprozess innerhalb eines Moleküls ab. Dadurch kommen extrem kurze Signal-Abklingzeiten zustande (u.U. ≈ 100 ps). Allerdings ist der Lichtentstehungsprozess komplizierter als in anorg. Szintillatoren. So gibt es meist zwei Lichtkomponenten bei unterschiedlichen Wellenlängen und mit großen Unterschieden in den Abklingzeiten (schnell: ~ 1 ns; langsam: ~ 100 ns). Ursache dafür sind zwei Prozesse:

- **Fluoreszenz**: Nach Anregung durch Absorption eines Photons (z.B. aus einer Rekombination) wird diese Energie bei größerer Wellenlänge wieder abgestrahlt und zwar prompt ohne zeitliche Verzögerung (\cong erlaubter Übergang zw. zwei Energieniveaus)
- **Phosphoreszenz**: Hier wird die Anregungsenergie sehr verzögert abgegeben, weil ein (durch Multipl.-Auswahlregeln) verbotener Übergang zwischen angeregtem und Grundniveau notwendig wäre. Dieser Übergang wird erst durch die Wechselwirkung mit einem anderen Molekül (im gleichen Anregungszustand) möglich.

Abklingverhalten von Szintillatoren

7.2 Organic Scintillators

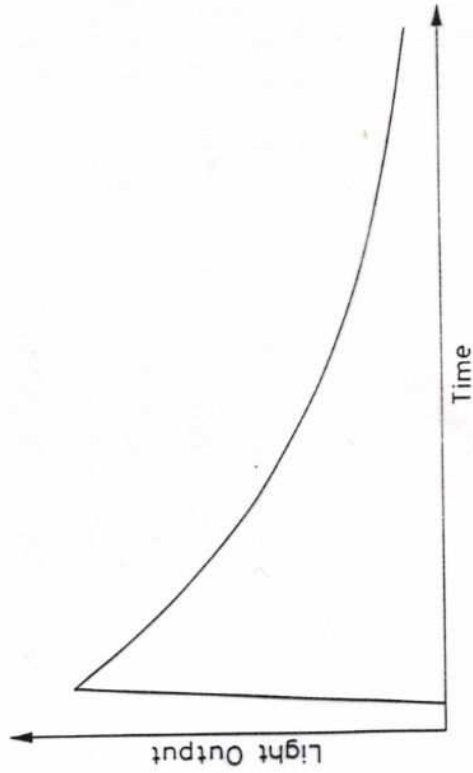


Fig. 7.2. Simple exponential decay of fluorescent radiation. The rise time is usually much faster than the decay time

$$N(t) = A \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

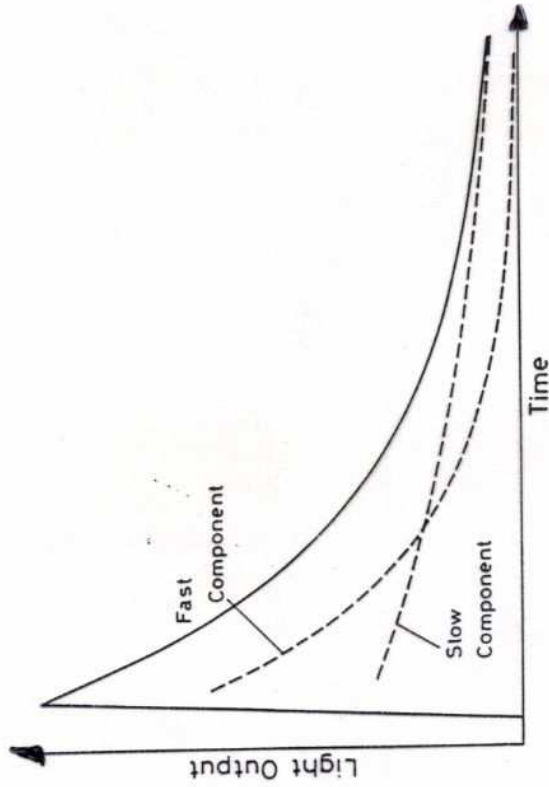
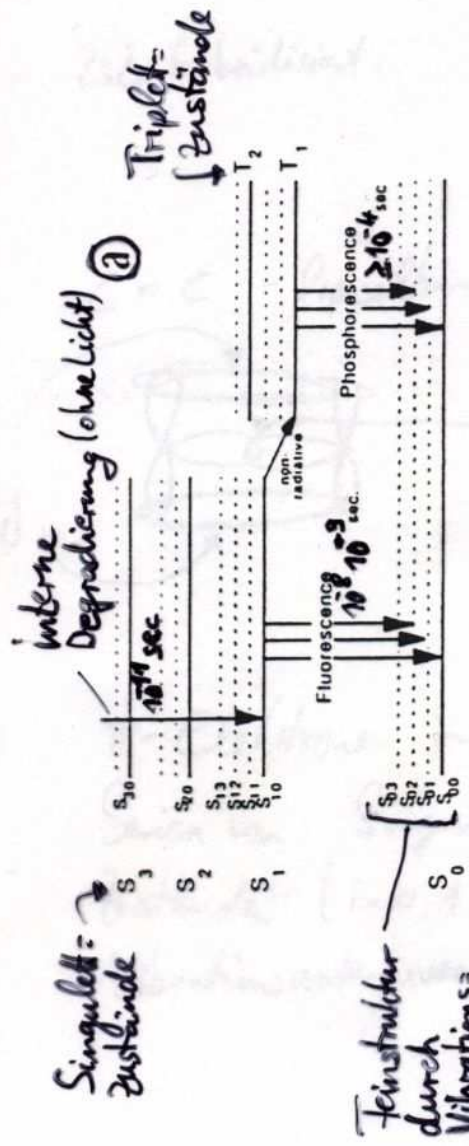


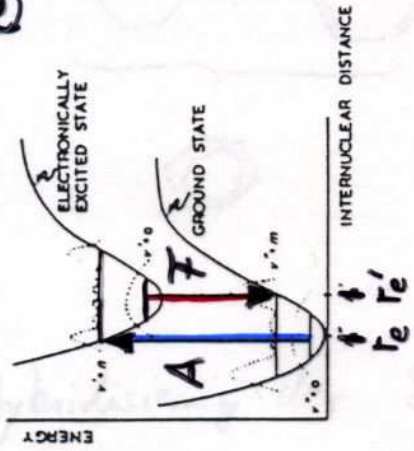
Fig. 7.3. Resolving scintillation light into fast (prompt) and slow (delayed) components. The solid line represents the total light decay curve

$$N(t) = A \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{Fast}}}\right) + B \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{Slow}}}\right)$$

Scintillation in organischer Medien



Wellenlängenschiebung zw. Absorption & Emission durch Abstandsänderung im angeregten Molekül



$$\text{STOKES LOSS} = (A - F) / 2$$

Stokes-Verschiebung der Energie $\frac{1}{2}(A - F)$ (Absorption-Fluoreszenz)

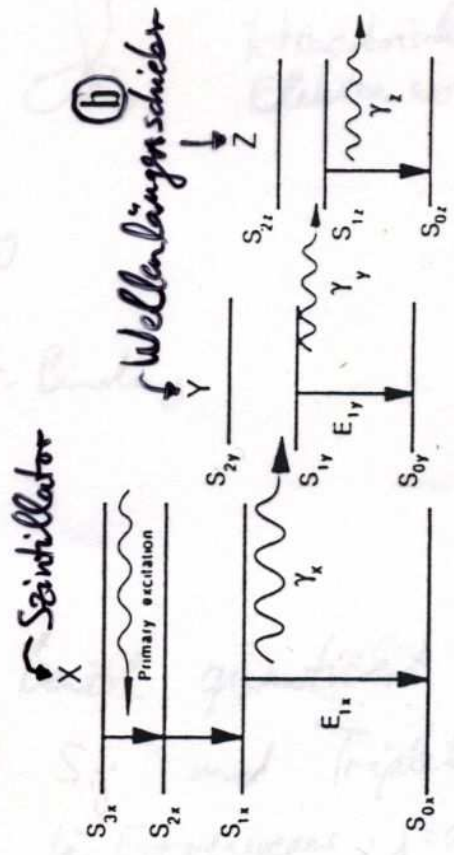
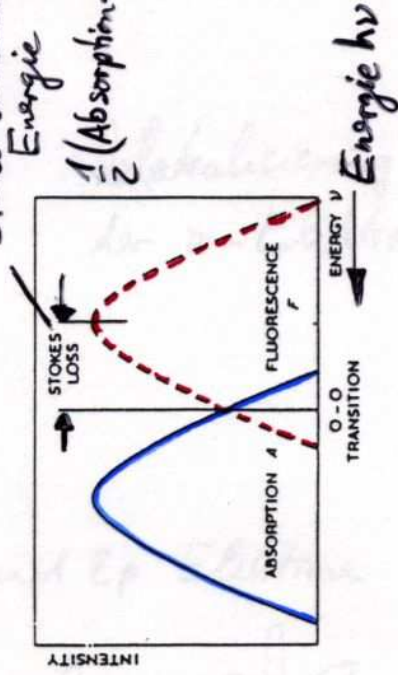


FIGURE 3: (a) The p electron energy levels. (b) An energy level representation of energy transfer in a scintillator composed of a solvent (X) plus two wavershifters (Y & Z). At higher concentrations (10^{-2} M), the dominant mode of energy transfer between X and Y becomes the non-radiative dipole-dipole interaction instead of the radiative mode shown in the figure. (c) Illustration of how the Frank-Condon principle creates a shift between fluorescent absorption and emission. Note the definition of the Stokes shift. Figures 3(a) and (b) are adapted from reference [17]. Figure 3(c) is adapted from reference [19].



Organische Szintillatoren

Die Hauptemission des Fluoreszenz- und Phosphoreszenz-Lichtes der organischen Szintillatoren liegt im UV-Bereich, wo diese organischen Medien nur mässig transparent sind. Daher werden den organischen Szintillatoren häufig weitere organische Stoffe beigemischt, die als Wellenlängenschieber fungieren. Solche Stoffe absorbieren bei kürzeren Wellenlängen aber sie emittieren (Erklärung durch das Frank-Condon-Prinzip: Im angeregten Zustand verschieben sich die Atome etwas, sodass die Abregung in ursprüngliche niedrige Energieniveaus nicht mehr möglich ist, da die Wellenfunktionen zw. angeregtem und Grundniveau keinen Überlapp mehr aufweisen.) Größe der Energieverschiebung wird als Stokes-Verschiebung bezeichnet, die durch $\frac{1}{2}(E_{\text{Absorption}} - E_{\text{Emission}})$ gegeben ist.) bei längeren Wellenlängen.

Um eine optimale Anpassung an die spektrale Empfindlichkeit der Photokathode des Photomultipliers zu erreichen, werden oft mehrere Stufen von Wellenlängenschiebern kombiniert. Dies kann innerhalb des gleichen Szintillators passieren oder durch optische Kopplung des Szintillators an einen Wellenlängenschieber.

* Im Englischen werden die Wellenlängenschieber-Substanzen als Fluor bezeichnet, was nichts mit dem Element Fluor zu tun hat.

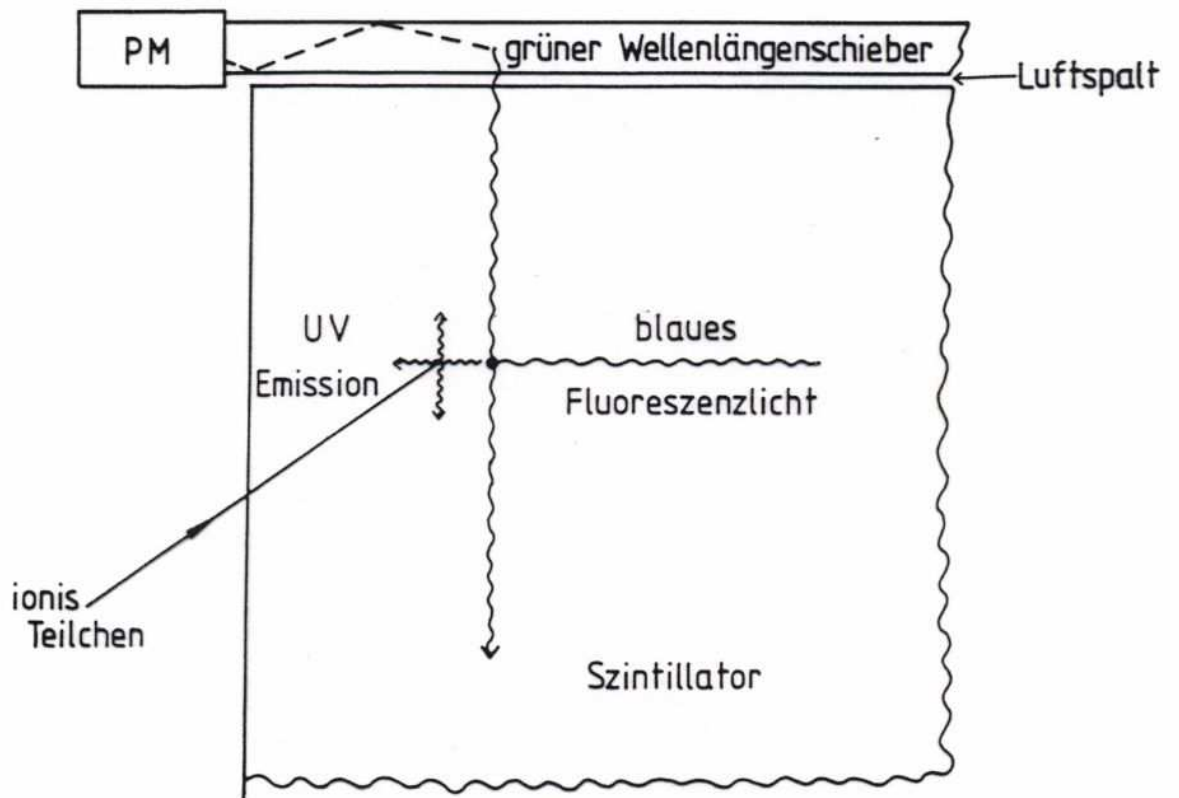


Fig.4.11: Prinzip der Lichtsammlung beim Szintillator mit Wellenlängenschieber-Auslese

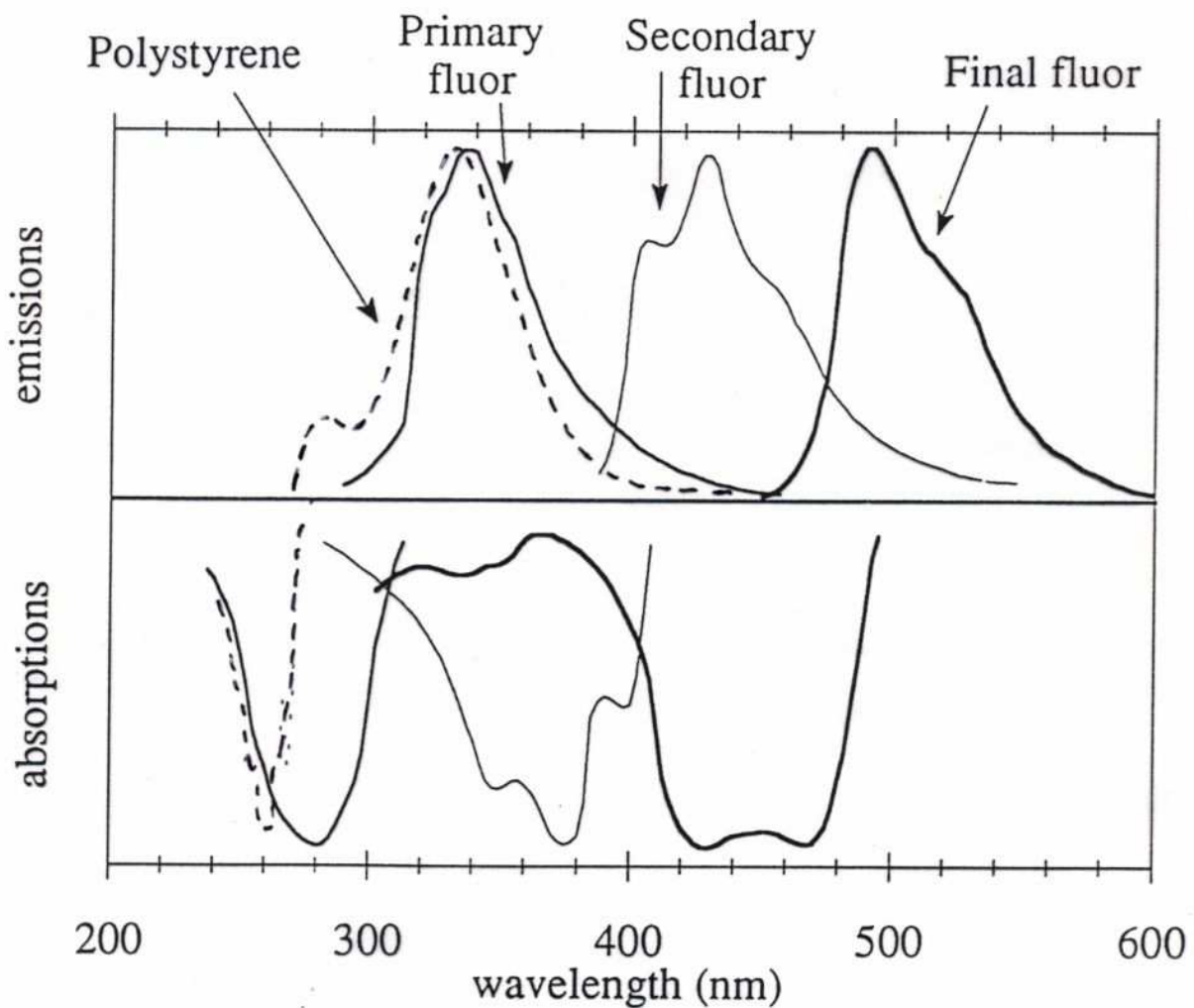


FIGURE 5: Illustration of how the matching of absorption and emission spectra create a green-emitting scintillator.

Organische Szintillatoren

Eigenschaften (pos. & neg.):

- + schnelle Lichtemission durch Fluoreszenz
- + Szintillations- & Fluoreszenzmechanismen unabhängig von der geometrischen Form des Szintillators und vom Aggregatzustand (fest, flüssig, gasförmig)
→ leicht zu verarbeiten, z.B. als Plastikmaterial, und billig
- + hoher Anteil von Wasserstoff (→ Nachweis von Neutronen)
- zusätzliche langsame Phosphoreszenz-Komponente
- große Strahlungslänge λ_0 (→ für totale Absorption kaum geeignet, zusätzl. Material notwendig)
- teilweise geringe Lichtausbeute (typ. 30% der Lichtausbeute von NaI(Tl))

Organische vs. Anorganische Szintillatoren

z.B. γ -Absorption im Szintillator:

Anorganisch: NaI ; Organisch: NE102A (Plastik)

Absorptions-
koeffizient
 μ

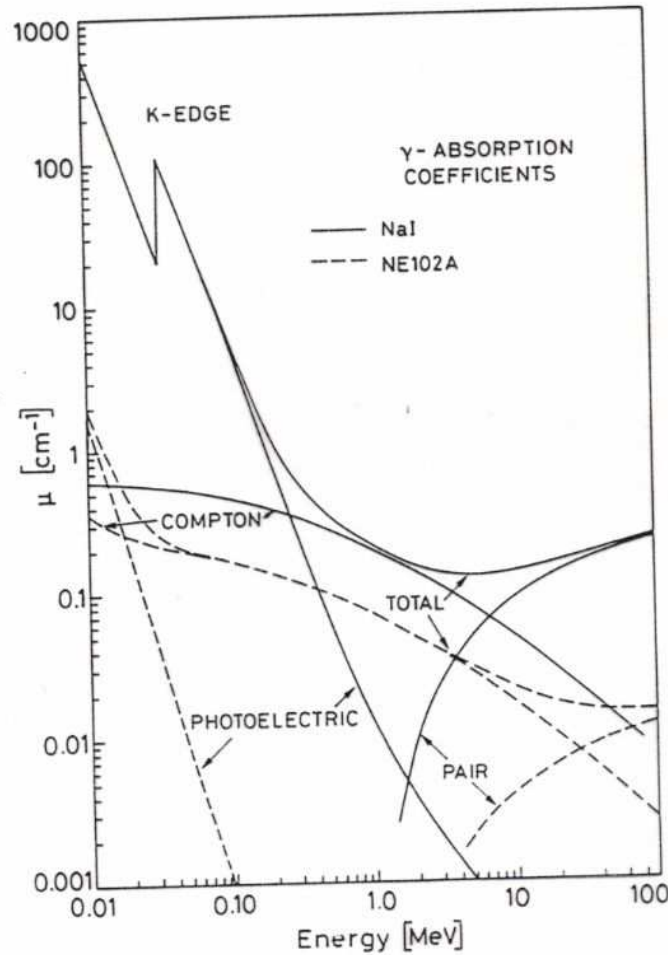


Fig. 7.13. Gamma-ray absorption coefficients for NaI and NE102A plastic scintillator. Note the difference in the relative magnitudes of the photoelectric and Compton cross sections

NB: Photoeffekt $\sim Z^5$
 Paarzeugung $\sim Z^2$
 Compton $\sim Z$

Scintillator & Photomultiplier

Die typische Anwendung des Scintillators ist zusammen mit einer Photokathode und einem Photomultiplier



Um das Szintillationslicht möglichst effektiv nachweisen zu können, müsse Emissionsspektrum des Scintillators und spektrale Empfindlichkeit der Photokathode optimal aufeinander abgestimmt sein.

Ein Photomultiplier besteht aus:

- **Photokathode** die meist aus Alkali-Metallen oder Erd-^{bzw. Schichtungen}alkali-Metalle sowie Mischungen davon (z.B. Bialkali), die alle eine geringe Elektronenaustrittsarbeit besitzen, aufgebaut ist
- **Sekundärelektronenvervielfacher** (SEV oder Photomultiplier PM) ist eine Folge von Elektroden (Dynoden) auf ansteigendem positivem elektrischen Potential. Auftreffende Elektronen schlagen Sekundärelektronen heraus und verstärken dadurch das Signal

Photomultiplier

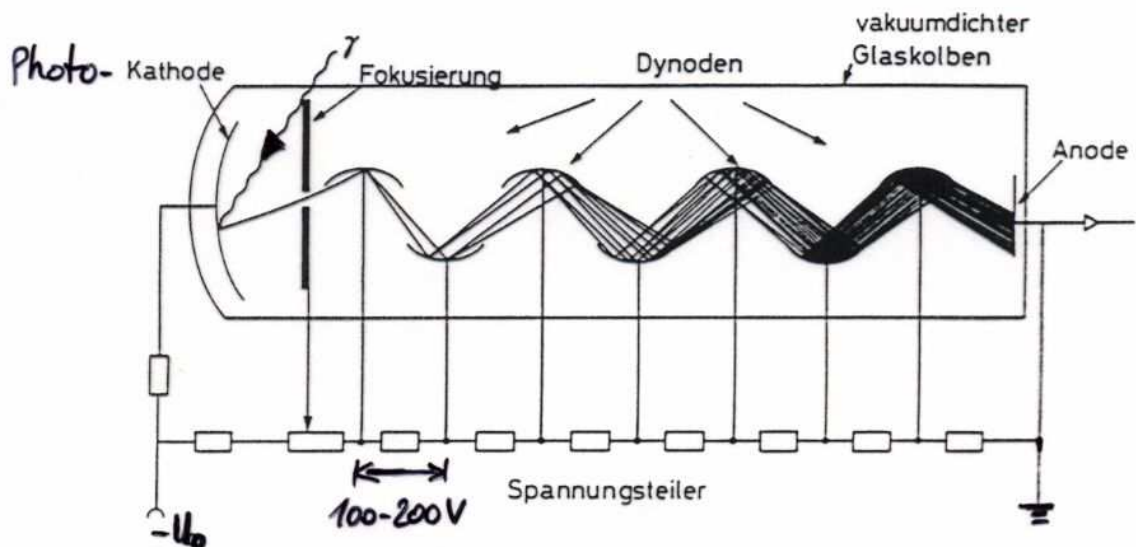
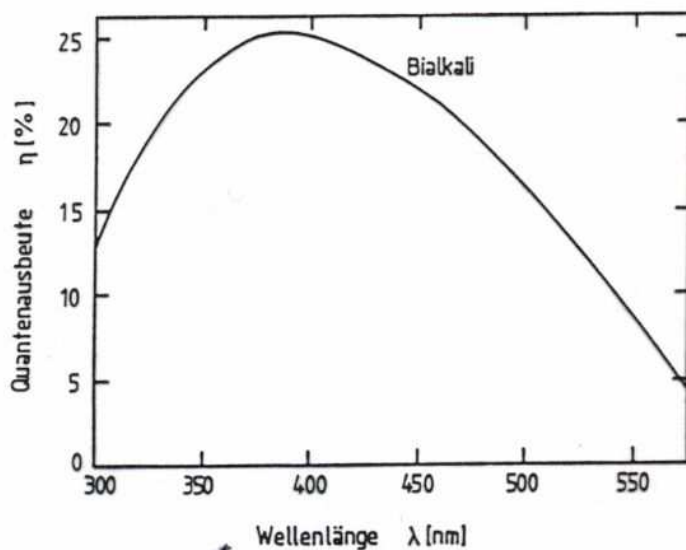


Abb. 5.1 Prinzipieller Aufbau eines Photomultipliers. Das Elektrodensystem befindet sich in einem evakuierten Glaskolben. Der Photomultiplier wird meist durch einen Mu-Metall-Zylinder aus hochpermeablem Werkstoff gegen magnetische Streufelder abgeschirmt (auch gegen das Erdmagnetfeld).

typ. werden 3-5 Sekundärelektronen emittiert



Bi-alkali:

- $K_2 Cs Sb$
- $\lambda_{\text{Peak}} \approx 380 \text{ nm}$
- Quantenausbeute an Peak $\approx 25\%$
- Wellenlängenbereich 170 - 600 nm

Abb. 5.2 Quantenausbeute einer Bi-alkali-Kathode als Funktion der Wellenlänge [79].

* Anzahl der Photoelektronen pro 100 einfallende Photonen

Photonmultiplier

existieren in vielen Bauformen, mit denen gewisse Probleme minimiert werden sollen:

Jitter im Signal durch unterschiedliche Flugzeiten der Photo-Elektronen von der Photokathode zur ersten Dynode. Gründe:

- Variation der Photo-Elektronengeschwindigkeit beim Austritt aus der Kathode. Spektrum der kinetischen Energien bei Bestrahlung mit Licht von 400-430nm reicht von 0 bis 1.8 eV bei einer Bialkali-Kathode (K_2CsSb) mit häufigstem Wert von 1.2 eV ($\delta t \approx 0.2 \text{ ns}$ ^{typ})
- Unterschiedlich lange Wegstrecken von Photokathode zur ersten Dynode. Bauform ist dafür entscheidend. (typ. $\delta t \approx 0.2 - 0.7 \text{ ns}$)

Der Jitter im Signal begrenzt die Zeitauflösung, mit der das Auftreten von Szintillationslicht nach einem Teilchendurchgang bestimmt werden kann.

Photomultiplier

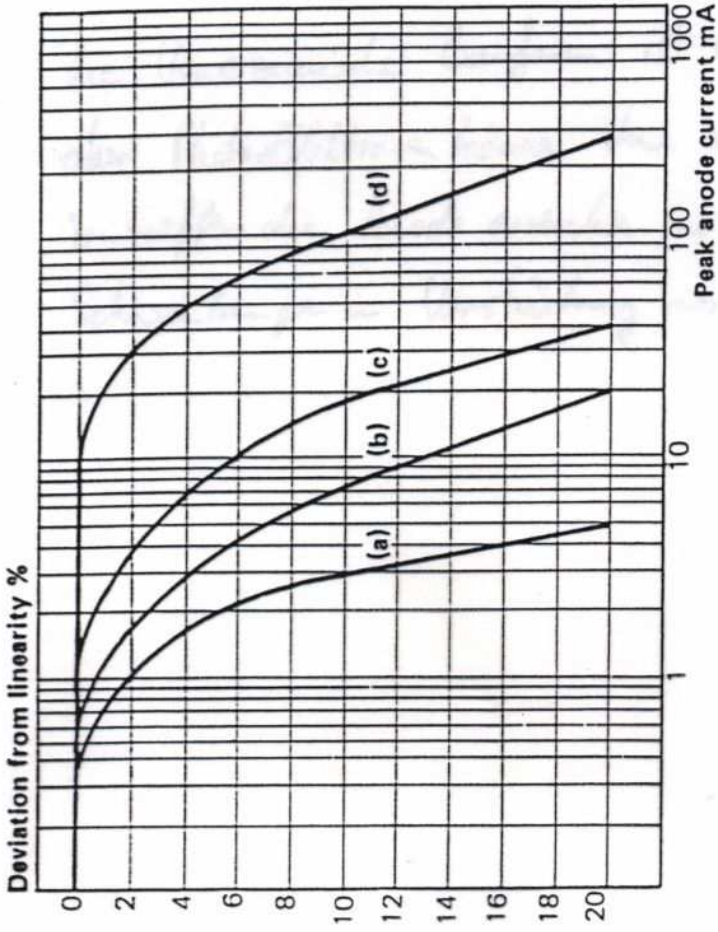


Fig. 8.5. Linearity of different dynode configurations: (a) box and grid, (b) venetian blind with standard voltage divider, (c) venetian blind with high current voltage divider, (d) linear focused with very high current divider (from *EMI Catalog* [8.2])

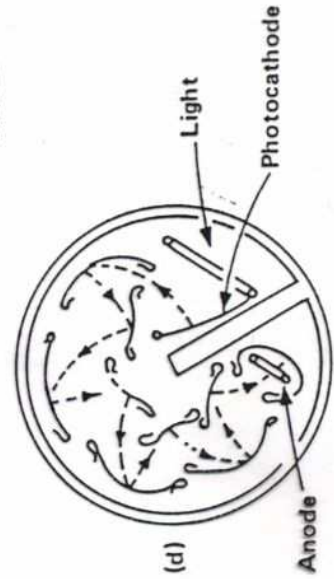
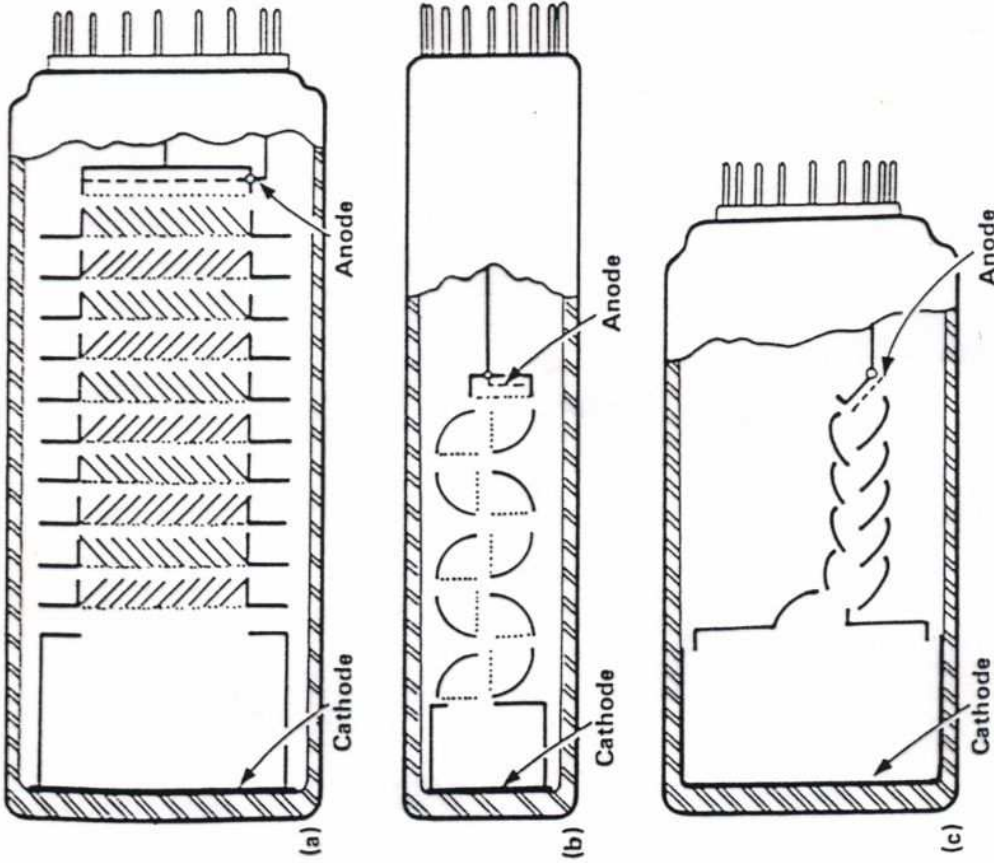


Fig. 8.4 a - d. Various dynode configurations for PM's (from *EMI Catalog* [8.2]): (a) venetian blind, (b) box and grid, (c) linear focused, (d) side-on configuration

Mikrokanal - Multiplier

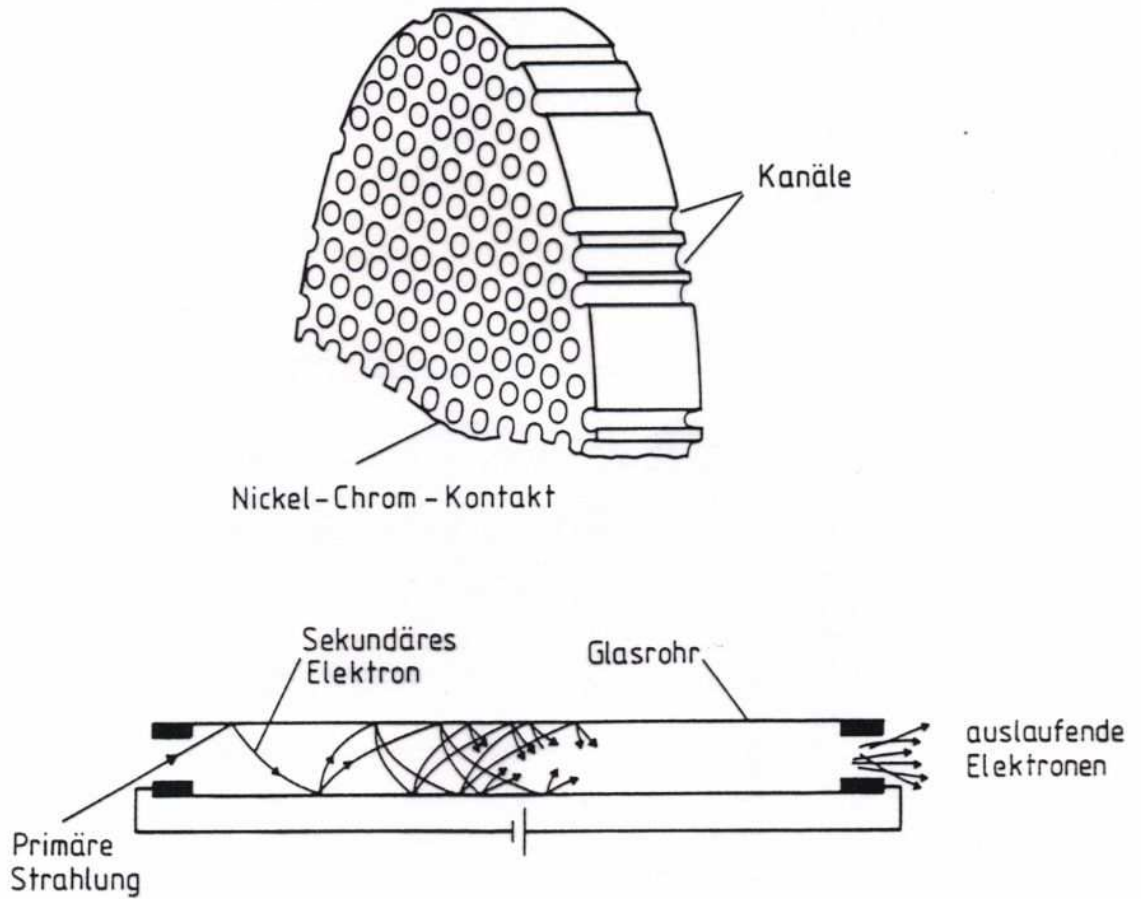
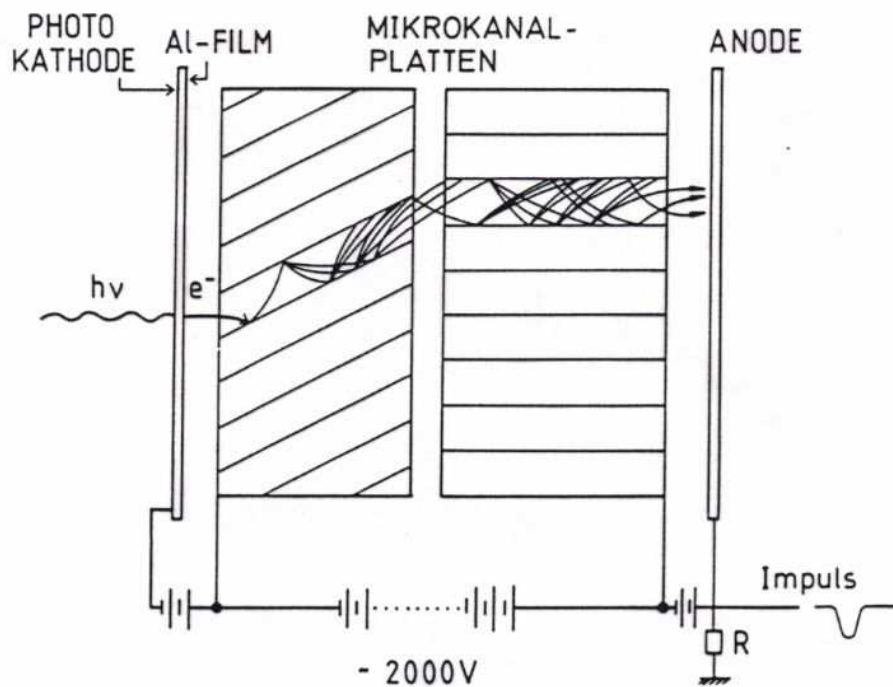


Fig.4.4: Prinzip eines Mikrokanal-Multipliers [DH 77].



Schematischer Aufbau eines zweistufigen Mikrokanal-Vervielfachers in Winkel-Form ("Chevron").

Photo- und Mikrokanal-Multiplier

eine kleine Auswahl:

	Amperex XP 2020	RCA 8854	Hamamatsu R 647-01	ITT F 4129	Hamamatsu R1564U
Verstärkung	$>3 \times 10^7$	3.5×10^8	$>10^6$	1.6×10^6	5×10^5
Hochspannung Anode-Kathode(V)	2200	2500	1000		
Mikrokanal- Spannung (V)				2500	3400
Anstiegszeit τ_R (ns)	1.5	3.2	2	0.35	0.27
Elektronen- laufzeit τ_T (ns)	28	70	31.5	2.5	0.58
Laufzeitschwankung (HWB) für ein Photo- elektron τ_s (ns)	0.51	1.55	1.2	0.20	0.09
Laufzeitschwankung (HWB) für viele Photo- elektronen τ_s' (ns)	0.12		0.40	0.10	
Anzahl Photoelektronen bei Messung von τ_s'	2500		100	800	
Quantenausbeute (%)	26	27	28	20	15
Photokathoden- durchmesser (mm)	44	114	9	18	18
Dynodenmaterial	Cu Be	GaP/BeO			

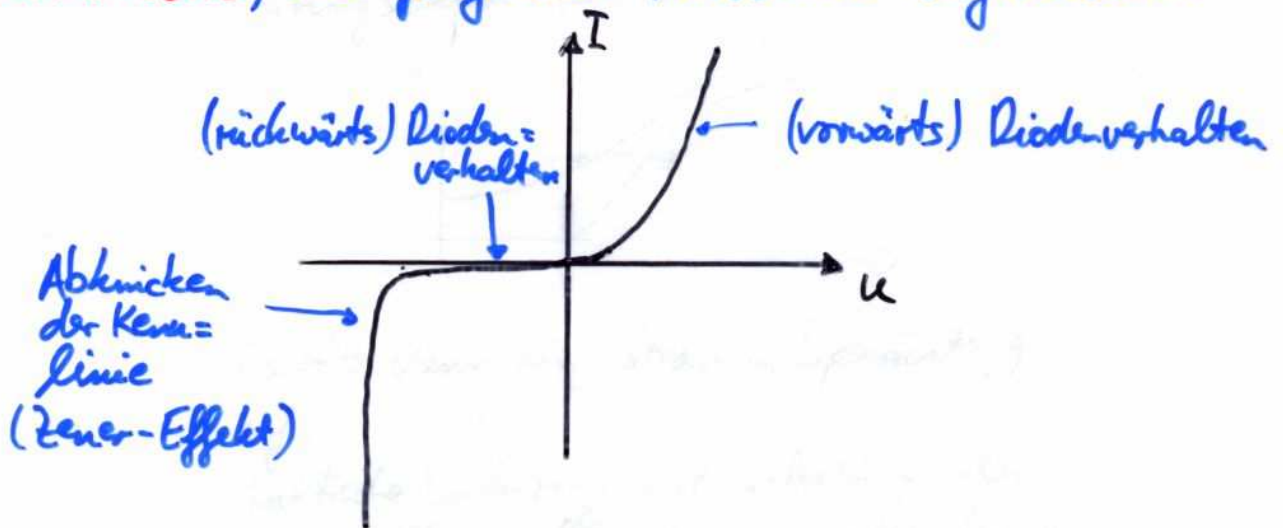
Es gibt weitere Bauformen, z.B. für das Superkanalende
Experiment wurden Photomultiplier mit 50 cm Photokathode
von Hamamatsu angefertigt



Photomultiplier, Avalanche-Dioden

Ein wesentlicher Nachteil der Photomultiplier ist, dass sie sehr empfindlich auf Magnetfelder reagieren (i.v. Abfall der Verstärkung). Sollen PMs in Magnetfeldern betrieben werden, so müssen sie in geeignete Abschirmungen (z.B. μ -Metall) eingebaut werden.

Alternativ gibt es sehr empfindliche Lichtdetektoren aus Halbleitermaterial, so genannte **Avalanche-Photodioden**, die folgende Kennlinie aufweisen:



Beim Zener-Effekt leiten Elektronen des Sperrstroms den Lawinen-Effekt ein. Bei Avalanche-Photodioden sind es durch Photonen erzeugte Elektron-Loch-Paare, die den Lawinen-Effekt auslösen.

Zusammenfassung: Szintillatoren

- Energieverlust eines Teilchens erzeugt **Szintillationslicht**
- Szintillations-Effekt tritt in Kristallen und dotiertem Glas auf (Exzitonen-Mechanismus)
- ... und in organischen Stoffen mit Benzolringen ☺
(Fluoreszenz, Phosphoreszenz)
- Lichtsignal klingt i.A. recht schnell ab
→ Szintillatoren zur **Zeitmessung** geeignet
- **Wellenlängenschieber** passen Emissionsspektrum an spektrale Empfindlichkeit der **Photokathode** an
- **Photomultiplier** verstärken das Signal einzelner Photoelektronen bis zur Messbarkeit