



5. Szintillatoren

Detektoren in der Hochenergiephysik
Univ.Doz.DI.Dr. Manfred Krammer
Institut für Hochenergiephysik der ÖAW, Wien

5. Szintillatoren

Inhalt



5.1 Allgemeine Grundlagen

5.2 Anorganische Szintillatoren

5.2.1 Szintillationsmechanismus

5.2.2 Anorganische Kristalle

5.2.3 Gläser

5.2.4 Edelgase

5.3 Organische Szintillatoren

5.3.1 Organische Kristalle

5.3.2 Organische Flüssigkeiten

5.3.3 Plastikszintillatoren

5.4 Wellenlängenschieber

5.5 Lichtleiter

5.6 Szintillierende Fasern

5.7 Photomultiplier

5.1 Allgemeine Grundlagen

Begriffserklärung – 1



- ★ **Lumineszenz:** Überbegriff für die Emission von Photonen (sichtbares Licht, UV oder Röntgenstrahlen) infolge einer Energieabsorption.
Die absorbierte Energie kann z.B. in Form von Licht (→ Photolumineszenz), Wärme (→ Thermolumineszenz), Schall (→ Sonolumineszenz), elektrischer Energie (→ Elektrolumineszenz) oder durch mechanische Deformation (→ Tribolumineszenz) zugeführt werden. Auch chemische Reaktionen können zur Lichtemission führen (→ Chemolumineszenz, in lebenden Organismen: Biolumineszenz).
- ★ **Szintillation:** Emission von Photonen (sichtbares Licht, UV oder Röntgenstrahlen) nach Anregung von Atomen oder Molekülen des szintillierenden Materials durch energiereiche Strahlung (γ - oder Teilchenstrahlung).

5.1 Allgemeine Grundlagen

Begriffserklärung – 2



- ★ **Fluoreszenz:** Nach Absorption eines Photons wird **innerhalb von ca. 10 ns** Licht mit größerer oder zumindest gleicher Wellenlänge emittiert (Stokes'sche Regel). Im ersteren Fall spricht man von Stokes'scher Verschiebung, im zweiten Fall von Resonanzfluoreszenz.
Ausnahme von der Stokes'schen Regel: Zwei-Photon-Fluoreszenz. Hier werden 2 Photonen absorbiert und die Wellenlänge des emittierten Photons ist größer oder gleich der *halben* Wellenlänge der absorbierten Photonen.
- ★ **Phosphoreszenz:** Ähnlich der Fluoreszenz, aber die angeregten e^- kommen entweder direkt oder nach Verlust eines Teils ihrer Anregungsenergie in ein metastabiles Energieniveau. Die Rückkehr in den Grundzustand unter **Lichtemission** erfolgt dadurch **verzögert** (einige ms bis zu mehrere Stunden).
- ★ **Wellenlängenschieber:** Material welches Licht einer bestimmten Wellenlänge absorbiert und bei einer anderen (meist größeren) Wellenlänge re-emittiert.

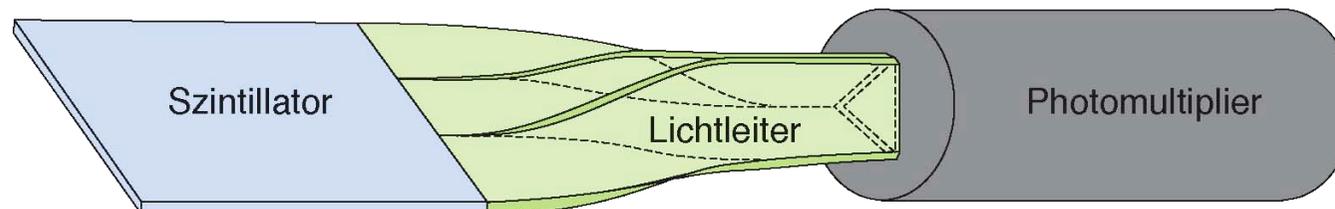
5.1 Allgemeine Grundlagen

Aufbau und Funktionsprinzip



Ein Szintillationsdetektor besteht aus dem szintillierenden Medium, einem Lichtleiter (optional) und einem Photodetektor.

1. Im **szintillierenden Medium** wird γ - oder Teilchenstrahlung in Licht (sichtbar, UV, manchmal auch Röntgenstrahlung) umgewandelt. Manchmal ist ein Wellenlängenschieber dem primären Szintillator beigemischt.
2. Der **Lichtleiter** bringt das Licht zum Photodetektor. Ein eventuell integrierter Wellenlängenschieber kann die Wellenlänge an das Ansprechverhalten der Photokathode anpassen und so die Ausbeute erhöhen.
3. Der **Photodetektor** wandelt das Licht in elektrische Ladung um und vervielfacht letztere auch meistens. Üblicherweise werden Photomultiplier verwendet, möglich sind aber auch z.B. Lawinenphotodioden und CCDs.



5.1 Allgemeine Grundlagen

Geschichtliche Anmerkungen



- ★ Der erste dokumentierte Einsatz eines Szintillators in der Kern- und Teilchenphysik ist wohl das **Spinthariskop** von **Sir William Crookes (1903)**: Ein ZnS-Schirm, welcher beim Auftreffen von α -Teilchen Fluoreszenzlicht erzeugte. Mit Hilfe einer Vergrößerungslinse konnten im Dunkeln die einzelnen Lichtblitze beobachtet und gezählt werden.*

Da das Zählen der Lichtblitze mit bloßem Auge aber sehr ermüdend war, verloren Szintillationszähler mit dem Aufkommen der Gasionisationszähler rasch an Bedeutung.

- ★ **1944** verhalfen **S. Curran und W. Baker** den Szintillationszählern zu einem Comeback, indem sie den Beobachter durch den damals neu entwickelten Photomultiplier ersetzten und so eine **elektronische Auslese** ermöglichten. Von den 1950-er Jahren bis heute gehören Szintillatoren zu den am häufigsten und vielfältigsten eingesetzten Detektoren (Kern- und Teilchenphysik, Umweltphysik, Chemie, Medizin, ...).

* Zur Erhöhung der Empfindlichkeit des Auges war der Genuß von starkem Kaffee mit einer *kleinen* Dosis Strychnin durchaus üblich. – Von einer Nachahmung sei hier allerdings abgeraten!

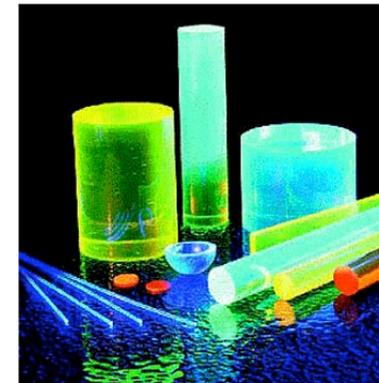
5.1 Allgemeine Grundlagen

Materialien und Anwendungsgebiete



- ★ Szintillierende Materialien:
 - Anorganische Kristalle
 - Organische Kristalle
 - Organische Flüssigkeiten
 - Plastikszintillatoren
 - Edelgase (gasförmig und flüssig)
 - szintillierende Gläser

diverse Szintillatoren



Quelle: unbekannt

- ★ Anwendungsgebiete in der Kern- und Teilchenphysik:
 - Trigger für langsamere Detektoren (z.B. Driftkammern)
 - Flugzeitspektrometer (TOF-Counter = “Time of Flight Counter”)
 - Kalorimeter
 - tw. auch als Positionsdetektoren (z.B.: szintillierende Fasern)
 - zusammen mit einem Neutronenkonverter zum Nachweis und zur Spektroskopie von thermischen und schnellen Neutronen
 - Neutrinodetektoren (besonders flüssige Szintillatoren)

5.1 Allgemeine Grundlagen

Vor- und Nachteile



★ Vorteile:

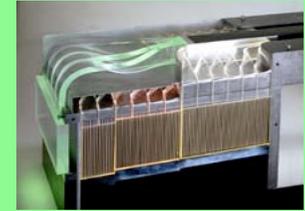
- **schnelle Ansprechzeit** (besonders organische Szintillatoren, ns-Bereich)
- **sensitiv auf die deponierte Energie**
- Herstellung und Betrieb unkompliziert → **billig, zuverlässig**

★ Nachteile:

- empfindlich gegenüber Magnetfeldern (Photomultiplier sowie manche organische Szintillatormaterialien)
- Alterungserscheinungen (besonders bei Plastiksintillatoren)
- Strahlenschäden (besonders bei Plastiksintillatoren)
- Plastiksintillatoren: Anfälligkeit gegenüber Mikrorissen (“Crazing”), welche die Lichtausbeute stark verringern. Werden oft ausgelöst durch Verschmutzung (Lösungsmittel, Öle, Fingerabdrücke).
- Anorganische Kristalle: Teilweise hygroskopisches Verhalten mit Verschlechterung der Lichtausbeute.
- Gassintillatoren: Geringe Lichtausbeute.

5.1 Allgemeine Grundlagen

Anforderungen an das szintillierende Medium



Viele Materialien zeigen eine oder mehrere Formen von Lumineszenz. Ein für einen Szintillationsdetektor gut geeignetes szintillierendes Material sollte aber überdies folgende Anforderungen erfüllen:

- ★ **Gute Lichtausbeute**, d.h. hohe Effizienz bei der Konversion von Anregungsenergie in Fluoreszenzstrahlung.
- ★ **Transparenz bezüglich seiner eigenen Fluoreszenzstrahlung**, damit das erzeugte Licht auch aus dem Detektor abgeführt werden kann.
- ★ Ein **Emissionsspektrum** welches passend zur spektralen Empfindlichkeit des nachgeschalteten Photodetektors ist.
(Mangelnde Übereinstimmung kann zwar durch Wellenlängenschieber ausgeglichen werden, dies hat aber oft eine Verminderung der gesamten Lichtausbeute zur Folge.)
- ★ Eine **kurze Zerfallskonstante** bei der Erzeugung des Signals.

5.1 Allgemeine Grundlagen

Zeitlicher Verlauf des Signals



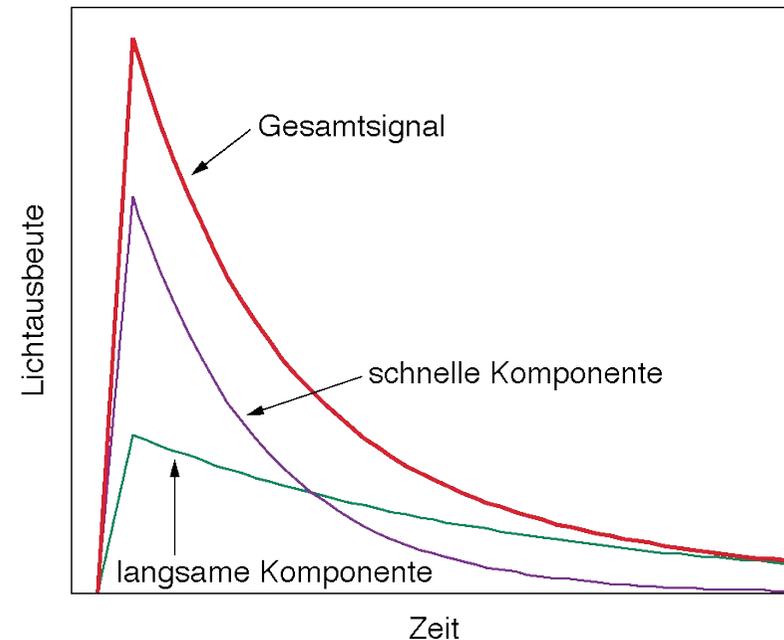
Viele Szintillatoren zeigen ein einfaches exponentielles Abklingen beim zeitlichen Verlauf der Emission. Andere haben ein komplizierteres Zerfallsschema. Eine **Überlagerung aus 2 Exponentialkurven** ist meist eine adäquate Beschreibung. Man unterscheidet dabei zw. der **“schnellen”** und der **“langsamen”** Komponente. Im Allgemeinen dominiert die schnelle Komponente. Die Anstiegszeit ist den meisten Fällen viel kürzer als die Zerfallskonstanten und kann in erster Näherung Null gesetzt werden.

$$N(t) = A \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_f}\right) + B \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_s}\right)$$

t Zeit; A, B ... Proportionalitätsfaktoren

$N(t)$... Anzahl der emittierten Photonen zur Zeit t

τ_f, τ_s ... Zerfallskonstante für die schnelle (f ... “fast”) bzw. die langsame (s ... “slow”) Komponente



Auflösung eines Szintillationssignals in eine schnelle und eine langsame Komponente.

5.1 Allgemeine Grundlagen

Energieabhängige Lichtausbeute – Allgemeines



- ★ Das erzeugte Szintillationslicht ist abhängig von der im Szintillator deponierten Energie. Abhängig vom Szintillatormaterial und vom Energiebereich ist oft ein **linearer Zusammenhang als erste Näherung** ausreichend.
- ★ Die **Lichtausbeute** beschreibt die Effizienz eines Szintillators bei der Umwandlung von deponierter Teilchenenergie in detektierbare Photonen.
- ★ Tatsächlich ist die Lichtausbeute in einem bestimmten Szintillator stets eine **komplizierte Funktion der deponierten Energie, der Teilchenart und seiner spezifischen Ionisation**.
- ★ Die Abhängigkeit der Lichtausbeute von der spezifischen Ionisation (also von dE/dx) kann verwendet werden, um anhand der Signalform verschiedene Teilchenarten zu unterscheiden. Dieses Verfahren wird "**Puls Shape Discrimination**" genannt.
- ★ Die Lichtausbeute von Szintillatoren wird oft in Prozent der Lichtausbeute von Anthracen oder jener von NaI angegeben.

5.1 Allgemeine Grundlagen

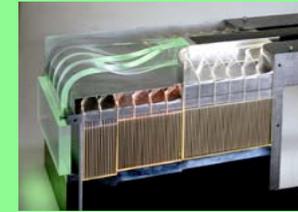
Energieabhängige Lichtausbeute – Verluste



- ★ Nur einige Prozent der deponierten Energie werden in Licht umgewandelt. Der Rest erzeugt Ionisation sowie die Anregung diverser Schwingungszustände welche durch nicht-strahlende Übergänge in den Grundzustand übergehen.
- ★ Mittlerer Energieverlust, welcher zur Erzeugung eines Photons nötig ist:
 - Anthracen ($C_{14}H_{10}$): ≈ 60 eV
 - NaI:Tl : ≈ 25 eV
 - BGO ($Bi_4Ge_3O_{12}$): ≈ 300 eV
- ★ Weiters muß berücksichtigt werden, daß die **Quanteneffizienz einer typischen Photokathode**, d.h. die Wahrscheinlichkeit mit der ein auftreffendes Photon in ein Photoelektron umgewandelt wird, nur **bei ca. 30 %** liegt.
- ★ Hinzu kommen noch **Verluste im Lichtleiter** bzw. teilweise auch im Szintillator selbst. Auch unmittelbar bei der Übertragung auf die Photokathode können durch ungünstige Geometrien Photonen verloren gehen.

5.1 Allgemeine Grundlagen

Materialeigenschaften einiger wichtiger Szintillatoren – 1



Material	Typ	Dichte [g/cm ³]	max. Emission bei λ [nm]	Lichtausbeute [% Anthracen]	Abklingzeit* [ns]
NaI	anorgan. Kristall	3.67	303 [‡]	440 [‡]	60 [‡]
NaI:TI	anorgan. Kristall	3.67	413	230	230
LiI:Eu	anorgan. Kristall	4.06	475	75	1200
CsI	anorgan. Kristall	4.51	400 [‡]	500 [‡]	600 [‡]
CsI:TI	anorgan. Kristall	4.51	580	95	1100
BaF ₂	anorgan. Kristall	4.9	310	46	620
CeF ₃	anorgan. Kristall	6.16	310–340	23	30
BGO (= Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂)	anorgan. Kristall	7.13	480	35–45	350
GSO (= Gd ₂ SiO ₅ :Ce)	anorgan. Kristall	6.71	430	45–60	≈50
PbWO ₄	anorgan. Kristall	8.28	440–500	≈2.5	5–15

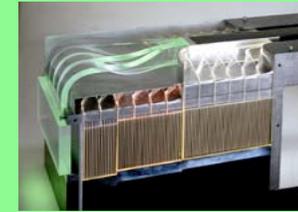
* der Hauptkomponente

‡ bei T = 77 K

Quellen, u.a.: <http://www.mkt-intl.com/crystals/scintcrystal.htm>; C. Grupen, *Teilchendetektoren*, B.I. Wissenschaftsverlag, 1993; W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer 1987

5.1 Allgemeine Grundlagen

Materialeigenschaften einiger wichtiger Szintillatoren – 2



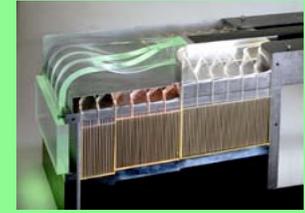
Material	Typ	Dichte [g/cm ³]	max.Emission bei λ [nm]	Lichtausbeute [% Anthracen]	Abklingzeit* [ns]
Naphtalen	organ. Kristall	1.46	348	28	11
Anthracen	organ. Kristall	1.25	440	100	30
trans-Stilben	organ. Kristall	1.16	410	50	4.5
p-Terphenyl	in flüssiger Lösung, Plastik	–	440	≈58	5
t-PBD	in flüssiger Lösung, Plastik	–	360	–	1.2
PPO	in flüssiger Lösung, Plastik	–	355	–	?

* der Hauptkomponente

Quellen, u.a.: <http://www.mkt-intl.com/crystals/scintcrystal.htm>; C. Grupen, *Teilchendetektoren*, B.I. Wissenschaftsverlag, 1993; W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer 1987

5.2 Anorganische Szintillatoren

Überblick



- ★ Arten von anorganischen Szintillatoren:
 - anorganische Kristalle
 - Glasszintillatoren
 - Edelgase (gasförmig und flüssig)
- ★ Der Szintillationsmechanismus ist für anorganische Kristalle und Gläser einerseits und Edelgase andererseits gänzlich verschieden, wodurch sich auch die stark unterschiedlichen Ansprechzeiten erklären.
- ★ Anorganische Kristalle sind im Vergleich zu organischen Szintillatoren eher langsam, Edelgase sind hingegen extrem schnelle Szintillatoren.
- ★ Gegenüber organischen Szintillatoren zeichnen sich anorganische durch eine relativ hohe Strahlenfestigkeit aus. Weiters sind Alterungseffekte von geringerer Bedeutung.

5.2.1 Anorganische Kristalle

Allgemeines



- ★ Wichtige anorganische Kristalle als Szintillatoren:
 - **NaI, CsI**: als Reinkristall oder mit Thallium dotiert ((NaI:TI),(CsI:TI))
 - **BGO**: $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$
 - **GSO**: Gadoliniumsilikat (Gd_2SiO_5), üblicherweise mit Cer dotiert
 - **BaF₂, CeF₃, PbWO₄**
- ★ Emittiertes Licht in der Regel bei **400–500 nm**. (NaI: 303 nm, CsI:TI : 580 nm)
- ★ Vorteile:
 - hohe Dichte, **kurze Strahlungslänge**
 - **gute Lichtausbeute**: $\approx 100\%$ – 400% der Ausbeute von Anthracen
 - ziemlich **strahlenresistent**: besonders: CeF_3 , GSO (schlecht: BGO)
- ★ Nachteile:
 - **langsamer als organische Szintillatoren**: Abklingzeiten meist einige hundert ns, Phosphoreszenz.
Ausnahmen: CsF_2 mit ca. 5 ns und PbWO_4 mit 5–15 ns.
 - **häufig hygroskopisch**: besonders stark: NaI.
 BGO , PbWO_4 , CeF_3 sind *nicht* hygroskopisch.

5.2.1 Anorganische Kristalle

Szintillationsmechanismus – 1



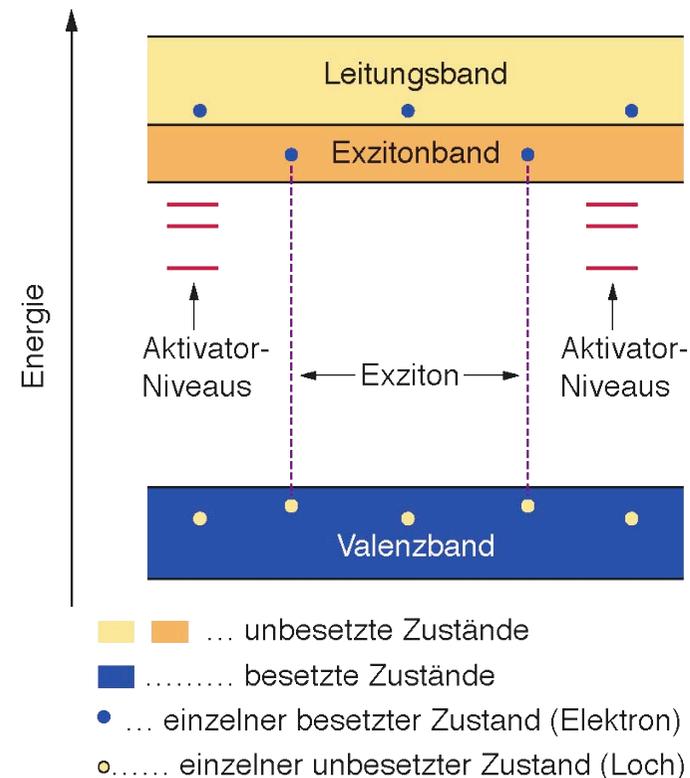
Anorganische Kristalle weisen durch ihre Regelmäßigkeit eine gut ausgeprägte Bandstruktur auf. Die **Szintillation** ist in diesem Fall nicht molekularer oder atomarer Natur, sondern läßt sich **im Rahmen des Bandschemas** beschreiben.

Die Materialien sind Isolatoren, die **Bandlücke beträgt 5–10 eV**.

Bild rechts:

Bandschema eines anorganischen Kristalls mit Störstellen durch eingebrachte Fremdatome (Aktivatorzentren).

Direkt unterhalb des Leitungsbandes liegt das Exzitonband. In ihm befinden sich e^- , deren Anregungsenergie nicht ausreicht, um sich völlig vom zugehörigen Loch zu lösen. Das Elektron-Loch-Paar ist als Quasi-Teilchen, Exziton genannt, im Kristall frei beweglich.



5.2.1 Anorganische Kristalle

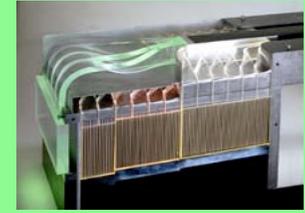
Szintillationsmechanismus – 2



- ★ Wird Energie im Kristall absorbiert, so wird ein e^- in das Leitungsband gehoben und wandert durch den Kristall bis es, im Falle einer Szintillation unter Abgabe eines (UV-)Photons, mit einem Loch rekombiniert.
- ★ Der Übergang eines Leitungselektrons in das Valenzband unter Emission eines Photons ist den meisten Materialien ein sehr ineffizienter Prozess. Bringt man in den Kristall Fremdatome, sogenannte **Aktivatorzentren** ein, so generieren diese zusätzliche Energieniveaus in der Bandlücke. Über diese Zustände kann ein angeregtes e^- nun unter Emission von sichtbarem Licht in das Valenzband zurückkehren. **Die Wahrscheinlichkeit für lumineszierende Übergänge wird dadurch stark erhöht.**
- ★ Oft wird ein e^- nicht ganz bis in das Leitungsband gehoben, sondern bleibt an das zugehörige Loch elektrostatisch gebunden. Es kann sich jedoch mit dem Loch gemeinsam durch den Kristall bewegen. Solche beweglichen e^- -Loch-Paare nennt man **Exzitonen**. Ihre Abregung kann ebenfalls Lumineszenz verursachen.

5.2.1 Anorganische Kristalle

Szintillationsmechanismus – 3



Im Detail kann die Abregung über Aktivatorzentren auf zwei Arten erfolgen:

1. **Exziton-Einfang:**

Ein driftendes e^- -Loch-Paar stößt auf ein Aktivatorzentrum und gibt seine Energie an dieses ab. Das e^- fällt zurück in das Valenzband, vom angeregten Aktivatoratom wird bei der anschließenden Abregung über erlaubte Übergänge Fluoreszenzlicht emittiert. Werden verbotene Zustände angeregt, so wird die Energie verzögert abgegeben (\rightarrow Phosphoreszenz).

2. **Loch-Einfang:**

Ein durch ein einfallendes Teilchen entstandenes Loch driftet zu einem Aktivatorzentrum und ionisiert dieses. Trifft ein freies e^- auf ein solches Ion, so wird es eingefangen und aktiviert dabei das Atom. Die Abregung des Aktivatoratoms erfolgt wieder wie unter Punkt 1.

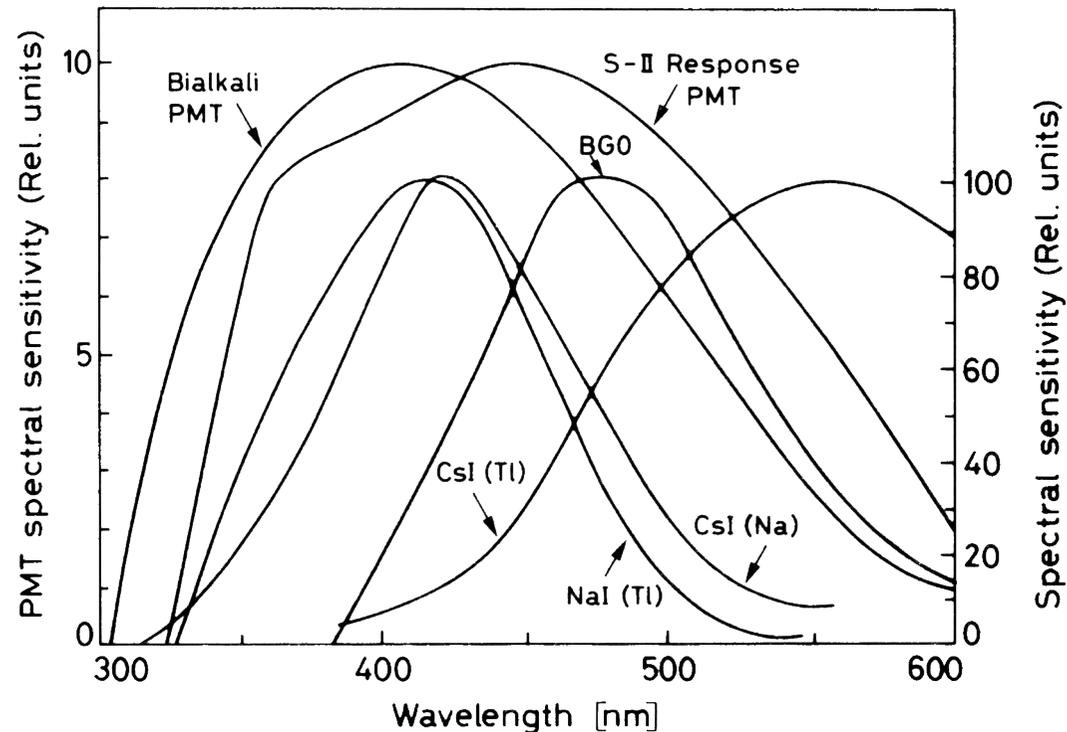
Generell sind die Emissionszeiten nicht durch den Driftprozess, sondern durch die Lebensdauern der Niveaus bestimmt.

5.2.1 Anorganische Kristalle

Spektren diverser anorganischer Kristalle



Emissionsspektren diverser anorganischer Kristalle (rechte Ordinate) sowie spektrale Sensitivität zweier Standard-Photomultiplier (linke Ordinate).



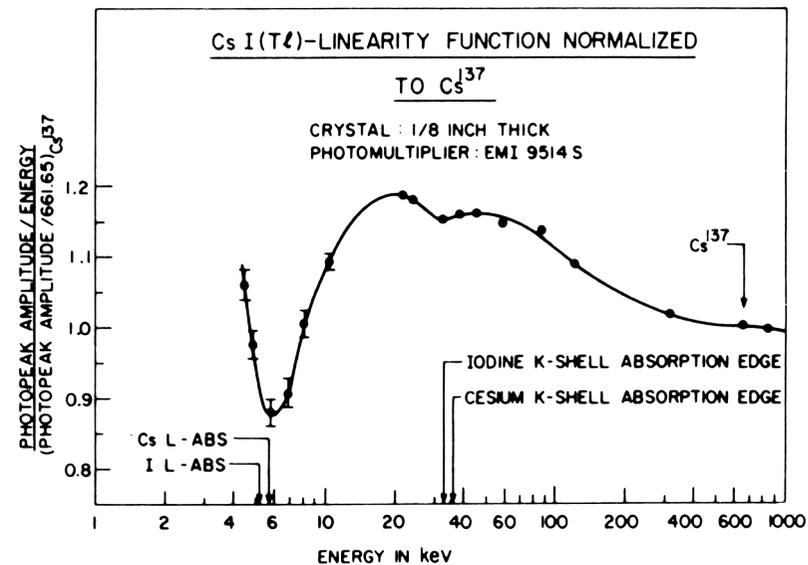
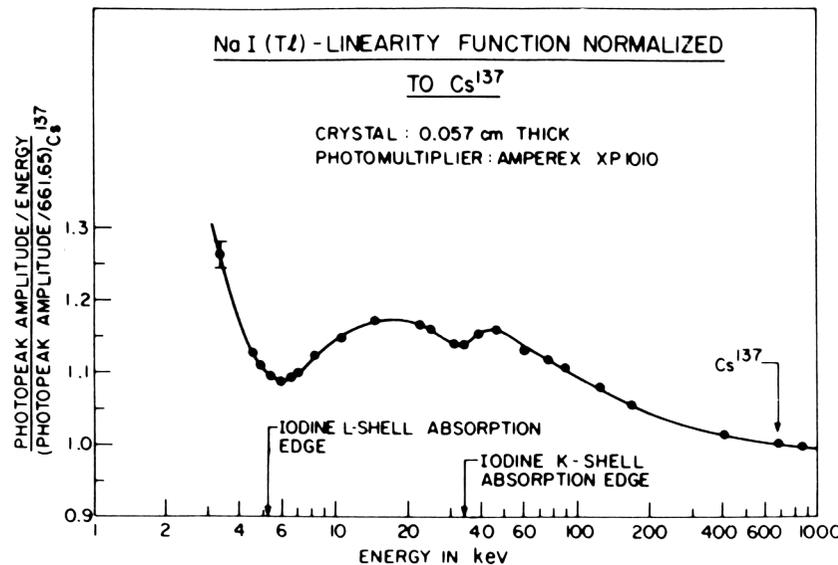
Quelle: W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer, 1987

5.2.1 Anorganische Kristalle

Energieabhängige Lichtausbeute



- ★ In anorgan. Szintillatoren ist die Lichtausbeute bei der Detektion von hoch-energetischen Teilchen **oft in guter Näherung linear zur deponierten Energie**.
- ★ Bei niedrigen Energien treten allerdings signifikante Abweichungen auf. So erfolgt z.B. in NaI und in CsI bei ca. 400 keV ein deutlicher Abfall in der Lichtausbeute, zusammen mit einer **“Feinstruktur”** aus mehreren Peaks (siehe Bilder unten). Dieses Verhalten entsteht **durch die atomare Schalenstruktur**.



Ansprechen von NaI:TI (links) und CsI:TI (rechts) auf die 661 keV Linie von ¹³⁷Cs.

Quelle beider Bilder: W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer, 1987

5.2.1 Anorganische Kristalle

Anwendungsbeispiele



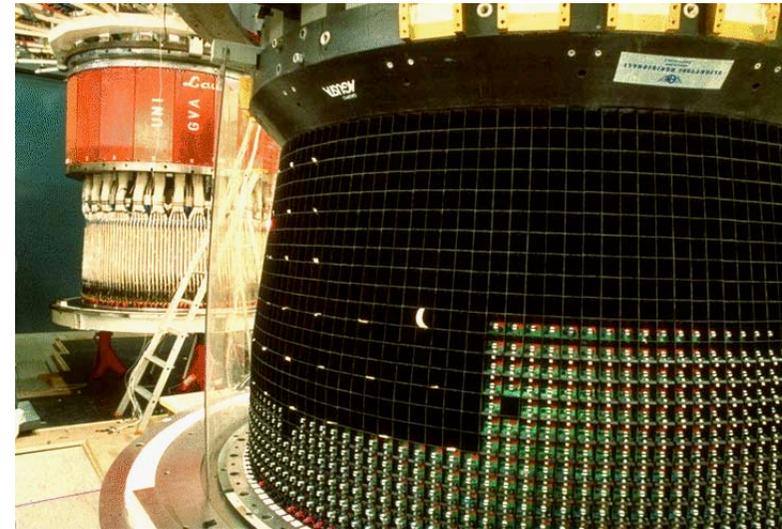
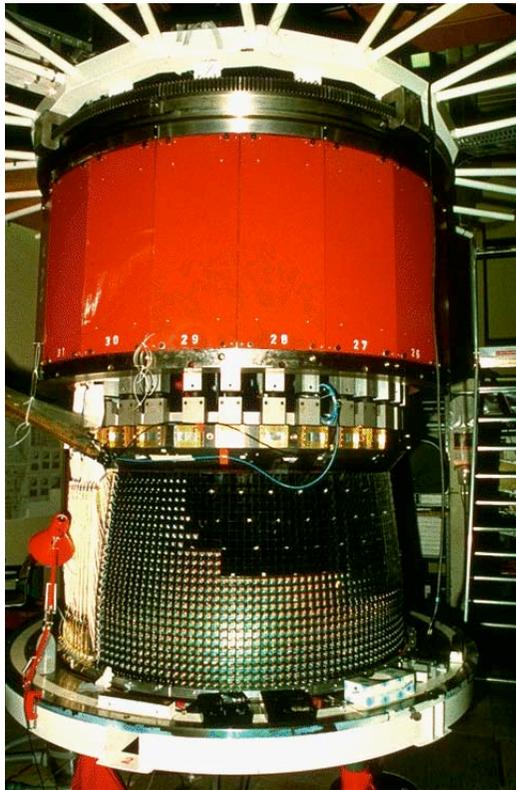
- ★ In der Hochenergiephysik werden anorganische Szintillationskristalle überwiegend in (elektromagnetischen) Kalorimetern eingesetzt (**Kristallkalorimeter**).
- ★ **Das bisher größte Kristallkalorimeter war das elektromagnetische Kalorimeter des L3-Experiments am LEP (CERN), für welches BGO-Kristalle verwendet wurden.** Vorteil: Besonders geringe Strahlungslänge (1.11 cm). Nachteil: Große Temperaturabhängigkeit (-1.5% pro °C bei Raumtemperatur). **BGO** ist allerdings nicht für eine stark strahlenbelastete Umgebung geeignet, wie sie in zukünftigen Hadronkollisionsmaschinen (z.B. LHC) vorherrschen wird. Mit einer **Strahlenfestigkeit von nur ca. 10 Gy** ist BGO von den üblichen anorganischen Szintillatoren am empfindlichsten.
- ★ **PbWO₄** wird im **Elektromagnetischen Kalorimeter von CMS** verwendet. Dazu werden über 80000 Kristalle benötigt.
Die Vorteile von **PbWO₄** sind eine kurze Strahlungslänge und Molier Radius, die Geschwindigkeit und die Strahlungsfestigkeit.

5.2.1 Anorganische Kristalle

Beispiel: Das L3-BGO-Kalorimeter



Bilder unten: Photos vom elektromagnetischen Kalorimeter des L3-Experimentes (LEP, CERN) während der Montage. Als Szintillator dienen BGO-Kristalle.



Queller beider Bilder: L3-Cooperation, CERN.
(<http://l3.web.cern.ch/l3/photos/detectors.html>)

5.2.2 Szintillierende Gläser



- ★ Glasszintillatoren sind meist **mit Cer aktivierte Lithium- oder Borsilikate**. Letztere haben allerdings nur weniger als ein Zehntel der Lichtausbeute von Lithiumsilikaten und werden daher weniger oft verwendet.
- ★ Glasszintillatoren werden **vorwiegend zur Neutronendetektion** eingesetzt, sind aber auch auf andere Strahlungsarten sensitiv (β, γ).
- ★ Hoher Schmelzpunkt und extrem große Widerstandskraft gegenüber einer Vielzahl von organischen und anorganischen Substanzen (Ausnahme: Flußsäure). → **Besonders geeignet für den Einsatz unter extremen Bedingungen**.
- ★ Die **Ansprechzeiten** liegen zwischen denen von organischen Szintillatoren und jenen von anorganischen Kristallen, typischerweise **bei einigen -zig ns**.
- ★ Die **Lichtausbeute** ist allerdings nicht optimal und erreicht nur **25–30% jener von Anthracen**.
- ★ Die **Sensitivität auf langsame Neutronen** kann erhöht werden, indem die Lithiumkomponente **mit ^6Li** angereichert wird.

5.2.3 Edelgase als Szintillatoren



- ★ Hauptsächlich werden die Edelgase Helium, Xenon, Krypton und Argon verwendet, teilweise wird auch Stickstoff in Gasszintillatoren eingesetzt.
- ★ Die Fluoreszenz in Gasszintillatoren ist ein **rein atomarer Prozess**, die Lebensdauer der angeregten Zustände ist sehr gering.
- Sehr schnelle Detektoren mit **Ansprechzeiten von ≤ 1 ns**.
- ★ Das emittierte Licht liegt generell im **UV-Bereich**, ein Frequenzbereich in welchem die meisten Photomultiplier nicht effizient arbeiten.
Dieser Nachteil kann durch Beschichtung der Behälterwände mit einem Wellenlängenschieber welcher UV absorbiert und grün-blaues Licht re-emittiert (z.B. Diphenylstilben) umgangen werden.
- ★ Die **Lichtausbeute** bei gasförmigen Szintillatoren ist aufgrund der niedrigen Dichte **relativ gering**.
Dies kann durch erhöhten Druck (bis zu 200 atm) tw. ausgeglichen werden.
- ★ Edelgase als Szintillatoren werden häufig auch in flüssiger Form eingesetzt.

5.3 Organische Szintillatoren

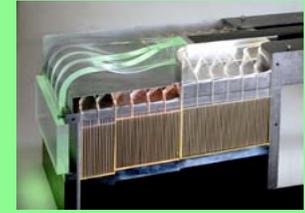
Allgemeines



- ★ Organische Szintillatoren sind aromatische Kohlenwasserstoffverbindungen welche **Ringverbindungen vom Benzoltyp** enthalten.
- ★ Schnelle Detektoren mit **Ansprechzeiten von einigen ns oder sogar ≤ 1 ns**.
- ★ Die **Szintillation** kommt **durch den Wechsel eines freien Valenzelektrons zw. Molekülorbitalen** verschiedener Energie zustande.
- ★ Arten von organischen Szintillatoren:
 - **organische Kristalle**
 - **Plastikszintillatoren**
 - **organische Flüssigkeiten**
- ★ Flüssigkeits- und Plastikszintillatoren bestehen meist aus 2–3 Komponenten:
 - primärer Szintillator
 - sekundärer Szintillator als integrierter Wellenlängenschieber (optional)
 - Trägermedium
- ★ Organische Kristalle haben hingegen nur eine Komponente, primärer Szintillator und Trägermedium sind hier ident.

5.3 Organische Szintillatoren

Szintillationsmechanismus – 1



- ★ Verantwortlich für die Szintillation sind **delokalisierte Valenzelektronen**, welche nicht einem bestimmten Atom innerhalb des Moleküls zugeordnet werden können, sondern sogenannte **molekulare π -Orbitale** besetzen. Typischerweise sind das innerhalb eines Benzolrings umlaufende Elektronen.
- ★ Der Grundzustand ist ein Singlett (S_0). Darüber liegen die angeregten Singlettzustände (S^* , S^{**} , ...) sowie die Triplettzustände (T_0 , T^* , T^{**} , ...). Jeder Zustand hat überdies eine "Feinstruktur" welche den diversen Vibrationsmoden des Moleküls entspricht.
Die Energieunterschiede zw. den diversen Energieniveaus des π -Elektrons betragen einige eV, jene zw. den Vibrationszuständen nur einige Zehntel eV.
- ★ Einfallende Strahlung regt üblicherweise sowohl elektronische Niveaus als auch Vibrationsmoden an.
- ★ Viele Szintillatoren zeigen eine **schnelle und eine langsame Komponente** bei der Emission, wobei **erstere durch angeregte Singlett- und zweitere durch Triplettzustände** entsteht.

5.3 Organische Szintillatoren

Szintillationsmechanismus – 2

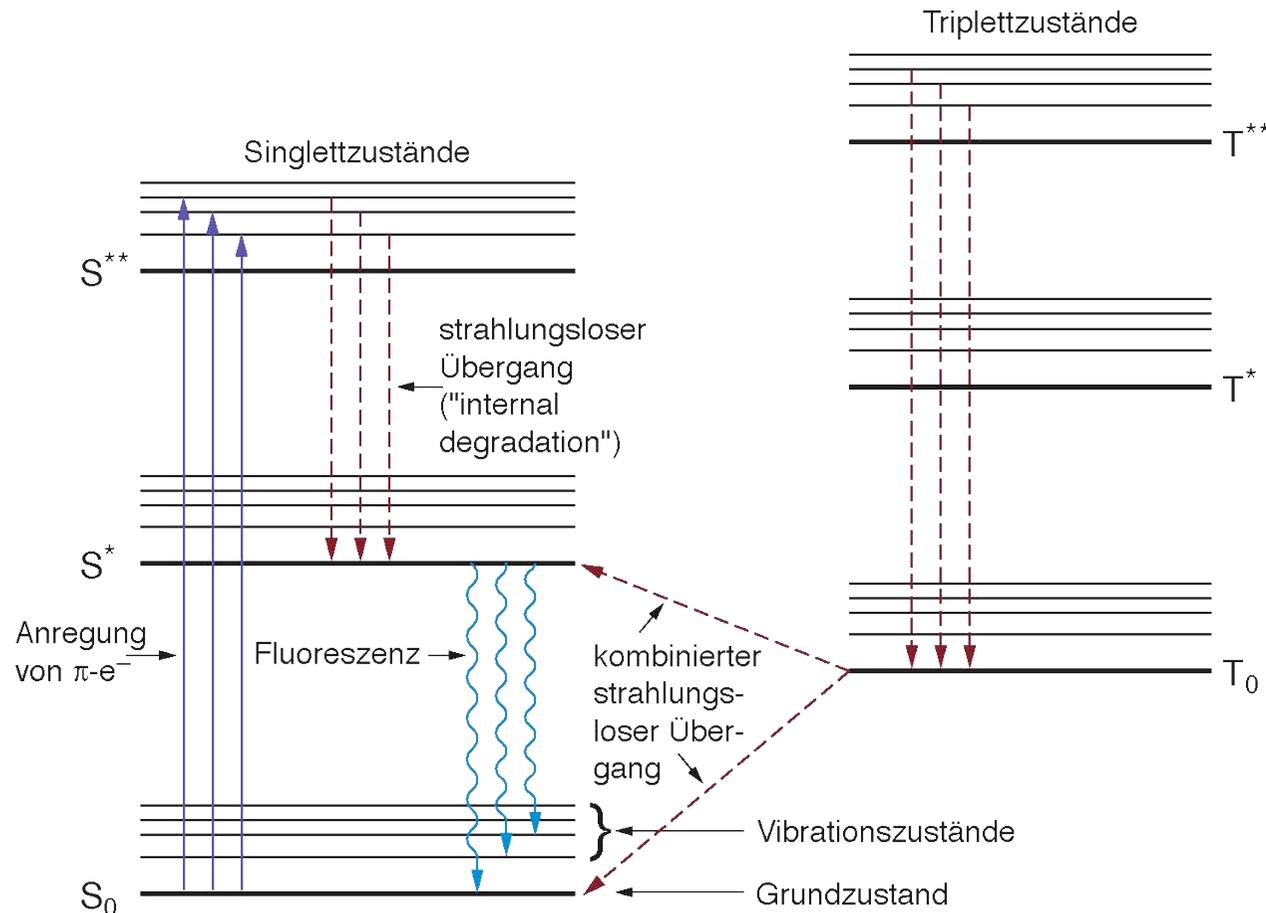


Bild links:
Energiediagramm für die π -Orbitale eines organischen Szintillators mit einigen eingezeichneten Möglichkeiten für strahlende und nicht strahlende Übergänge.
Zwecks größerer Klarheit sind die Tripletzustände getrennt von den Singlettzuständen gezeichnet.

5.3 Organische Szintillatoren

Szintillationsmechanismus – 3



Szintillation über Singlettzustände:

1. Einfallende Strahlung hebt π -Elektronen auf S^* oder höhere angeregte Niveaus und regt zugleich meist Vibrationsmoden an.
 2. S^{**} und höhere Anregungen zerfallen in der Regel innerhalb von einigen ps via strahlungslose Übergänge in den S^* -Zustand (“**internal degradation**”).
 3. Der S^* -Zustand zerfällt dann üblicherweise in wenigen ns unter Emission von Fluoreszenzstrahlung.
- ★ Der fluoreszente Zerfall über Singlettzustände ergibt die **schnelle (“prompte”) Komponente** des Szintillationssignals.
 - ★ Große Wahrscheinlichkeit, daß der Übergang von S^* nicht direkt im untersten Subniveau von S_0 endet sondern in einem Vibrationszustand.
 - Die emittierte Strahlung hat dann eine geringere Frequenz als für eine Anregung $S_0 \rightarrow S^*$ nötig ist, d.h. das Emissionsspektrum ist gegenüber dem Absorptionsspektrum zu kleineren Energien hin verschoben (**Stokes-Shift**).
 - **Der Szintillator ist dann für seine eigene Emissionsstrahlung transparent.**

5.3 Organische Szintillatoren

Szintillationsmechanismus – 4



Szintillation über Tripletzustände:

1. Einfallende Strahlung hebt π -Elektronen auf diverse Triplet-Niveaus und regt zugleich meist Vibrationsmoden an.
2. T^* und höhere Anregungen zerfallen via strahlungslose Übergänge in den niedrigsten Tripletzustand (T_0), welcher ein metastabiles Niveau ist.
3. Direkte Zerfälle $T_0 \rightarrow S_0$ sind von den Multipol-Auswahlregeln her sogenannte verbotene Übergänge und somit extrem unwahrscheinlich.

Statt dessen erfolgt der T_0 -Zerfall meist durch eine Wechselwirkung mit einem anderen T_0 -angeregten Molekül:



4. Der S^* -Zustand zerfällt dann wieder unter Emission von Photonen.
- ★ Die Anregung von Tripletzuständen und der anschließende Zerfall führen zur **langsamen (“verzögerten”) Komponente** des Szintillationssignals.
 - ★ Der Beitrag der langsamen Komponente zum Gesamtsignal spielt allerdings nur bei wenigen organischen Szintillatoren eine nennenswerte Rolle.

5.3 Organische Szintillatoren

Energieübertragung in Mehrkomponenten-Szintillatoren



Besteht ein Szintillator aus einem in einem Trägermedium (Grundmaterial) gelösten Fluoreszenzstoff, so wird ein Großteil der Energie eines einfallenden Teilchens erst im Trägermedium deponiert und muß von dort auf den primären Szintillator übertragen werden.

Dies kann je nach Materialkombination und Konzentration des primären Szintillators auf verschiedene Arten erfolgen:

- ★ Transfer durch Strahlung (Konzentration $> 10^{-4}$ Molanteil).
- ★ Strahlungsloser Transfer durch Dipol-Dipol-Wechselwirkung (Förster-Mechanismus, Konzentration $> 10^{-2}$ Molanteil).
- ★ Direkte Übertragung vom angeregten Zustand eines Trägermoleküls auf unmittelbar benachbarte Szintillatormoleküle.
- ★ Transfer durch Stoß diffundierender angeregter Moleküle (bei Flüssigkeitsszintillatoren).

5.3 Organische Szintillatoren

Energieabhängige Lichtausbeute



- ★ Besonders in organischen Szintillatoren ist eine lineare Abhängigkeit der Lichtausbeute von der deponierten Energie oftmals *keine* gute Näherung.
- ★ **Semi-empirische Formel von Birks:** Abweichung von der Linearität wird mit einem **“Quenching” Effekt** der angeregten Moleküle entlang der Teilchenspur erklärt: Eine hohe Dichte von angeregten Molekülen führt zur gegenseitigen Beeinflussung der Moleküle und begünstigt strahlunglose Abregungen gegenüber von Lumineszenz. Es kommt zur **Sättigung bei der Lichtausbeute**. Das Ausmaß des Quenching wird durch die Birks´sche Konstante beschrieben, welche dE/dx mit der Dichte der Ionisationszentren verknüpft und die in der Praxis empirisch durch einen Fit an die experimentellen Daten bestimmt wird. Typische Werte für K_B : $10^{-4} - 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2\text{MeV})$.

Birks´ches Gesetz:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{A \frac{dE}{dx}}{1 + K_B \frac{dE}{dx}}$$

dL/dx ... Lichtausbeute pro Weglänge
 dE/dx ... Energieverlust pro Weglänge
 A absolute Szintillationseffizienz
 K_B Birks´sche Konstante

5.3.1 Organische Kristalle

Allgemeines, verwendete Materialien



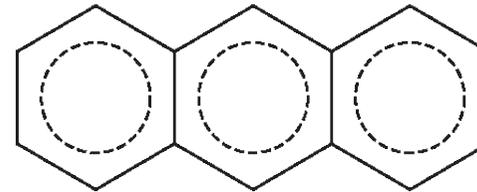
- ★ Wichtige organische Kristalle als Szintillatoren:
 - **Naphtalen** ($C_{10}H_8$)
 - **Anthracen** ($C_{14}H_{10}$)
 - **trans-Stilben** ($C_{14}H_{12}$)
- ★ Emittiertes Licht in der Regel bei **350–450 nm**.
- ★ Vorteile:
 - **schnelle Fluoreszenzzeiten**: wenige ns (Ausnahme: Anthracen ≈ 30 ns)
 - **mechanisch widerstandsfähig** (Ausnahme: Stilben ist etwas brüchig)
- ★ Nachteile:
 - **anisotrope Lichtausbeute**: durch “channelling” Effekte in den Kristallen
 - **mechanisch oft schwierig zu schneiden**: das Anfertigen einer bestimmten Form ist komplizierter als bei Plastiksintillatoren
- ★ Von allen organischen Szintillatoren hat **Anthracen die höchste Lichtausbeute**. Es wird daher gerne als **Referenzmaterial** genommen.

5.3.1 Organische Kristalle

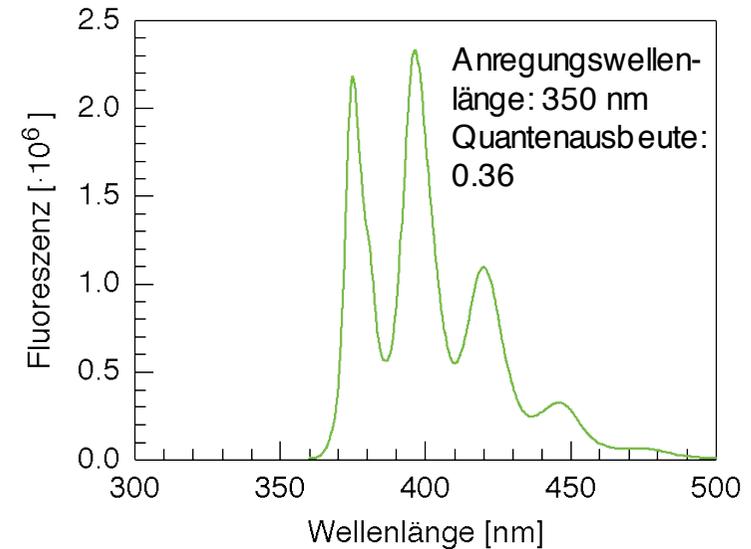
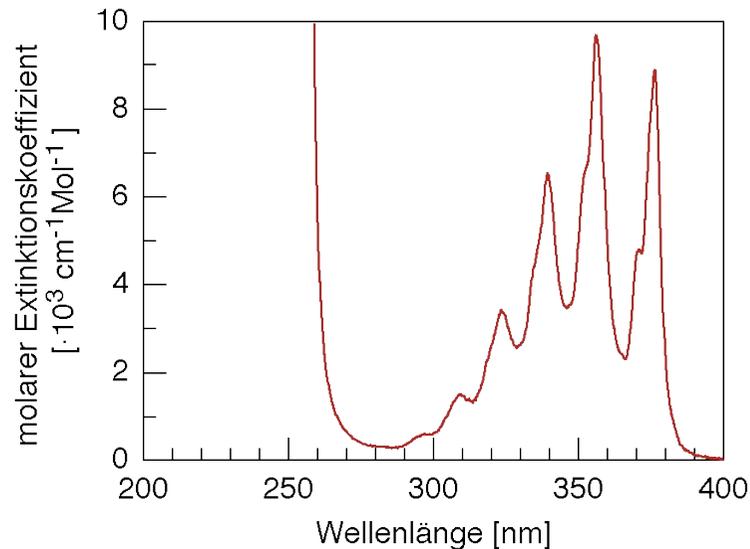
Beispiel Anthracen – Struktur und Spektren



Bild rechts: Chemische Strukturformel von Anthracen



Bilder unten: Spektren für den molaren Extinktionskoeffizienten (links) und die Fluoreszenzemission (rechts) von Anthracen (gelöst in Cyclohexan).



Quelle: <http://omlc.ogi.edu/spectra/PhotochemCAD/html>; Spektren generiert mit dem PhotoChemCAD-Paket von Jonathan Lindsey (H. Du, R. A. Fuh, J. Li, A. Corkan, J. S. Lindsey, *Photochemistry and Photobiology*, **68**, 141-142, (1998)).

5.3.2 Organische Flüssigszintillatoren

Allgemeines



- ★ In solchen Detektoren werden Gemische aus einem oder mehreren organ. Szintillatoren und einem organischen Lösungsmittel verwendet. Typische Konzentrationen des primären Szintillators sind ≈ 3 g pro Liter Lösungsmittel.
- ★ Die Energie eines einfallenden Teilchens wird hier größtenteils an das Lösungsmittel abgegeben, welches sie dann an den primären Szintillator weitergibt.
- ★ Vorteile:
 - schnelle Fluoreszenzzeiten: ca 3–4 ns
 - beliebige Detektorform
 - können sehr gut mit Additiven versetzt werden um sie an bestimmte Anwendungen anzupassen (z.B. Wellenlängenschieber, Zusätze zur Erhöhung des Neutronenwirkungsquerschnittes, ...)
- ★ Nachteile:
 - extrem empfindlich auf Verunreinigungen: besonders kritisch ist gelöster Sauerstoff

5.3.2 Organische Flüssigszintillatoren

Verwendete Materialien



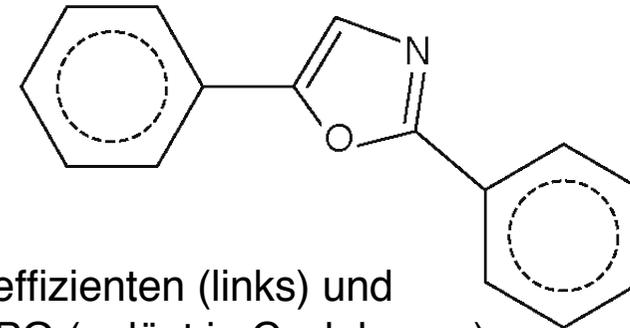
- ★ Wichtige primäre Szintillatoren:
 - **p-Terphenyl** ($C_{18}H_{14}$)
 - **PPO** (2,5-Diphenyloxazol; $C_{15}H_{11}NO$)
 - **PBD** (2-Phenyl,5-(4-Biphenyl)-1,3,4-Oxadiazol; $C_{20}H_{14}N_2O$)
- ★ Wichtige Lösungsmittel:
 - **Benzol** (C_6H_6)
 - **Toluol** (C_7H_8)
 - **Xylol** (C_8H_{10})
 - **Phenylcyclohexan** ($C_{12}H_{16}$)
 - **Triethylbenzol**
 - **Decalin** ($C_{10}H_{18}$)
- ★ Wichtige Wellenlängenschieber:
 - **POPOP** (1,4-bis-[2-(5-Phenyloxazolyl)]-Benzen; $C_{24}H_{16}N_2O_2$)
 - **bis-MSB** (1,4-bis(2-Methylstyryl)-Benzen; $C_{24}H_{22}$)
 - **BBQ** (Benzimidazo-Benzisochinolin-7-on)
- ★ Weitere Zusätze:
 - **Bor-11**: zur Erhöhung der Empfindlichkeit auf **Neutronen**
 - **Naphtalen, Biphenyl**, etc.: zur Erhöhung der **Lichtausbeute** (vermindern durch andere Zusätze verursachtes “Quenching”)

5.3.2 Organische Flüssigszintillatoren

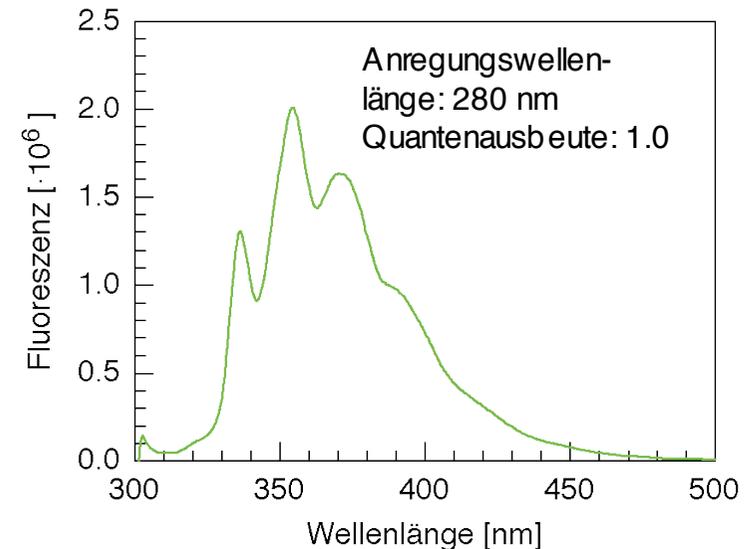
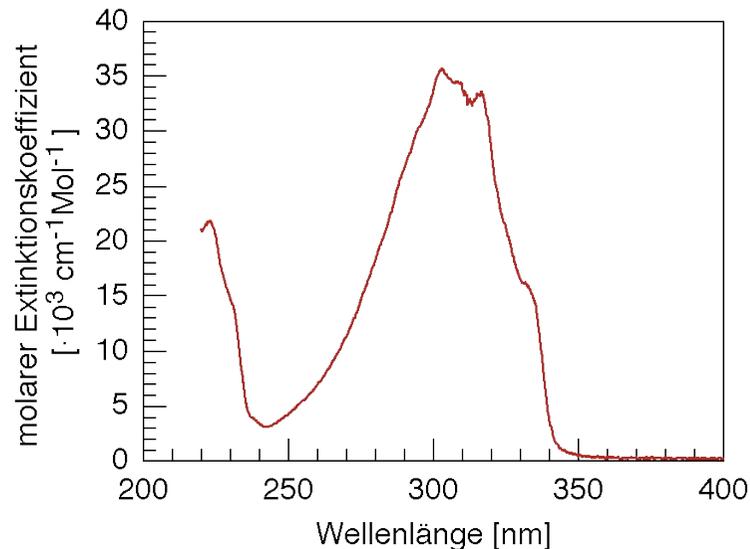
Beispiel PPO – Struktur und Spektren



Bild rechts: Chemische Strukturformel von PPO (2,5-Diphenyloxazol; $C_{15}H_{11}NO$)



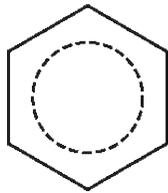
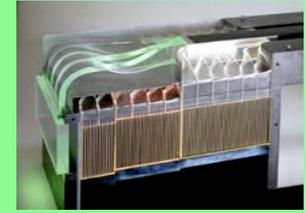
Bilder unten: Spektren für den molaren Extinktionskoeffizienten (links) und die Fluoreszenzemission (rechts) von PPO (gelöst in Cyclohexan).



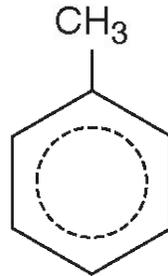
Quelle: <http://omlc.org/spectra/PhotochemCAD/html>; Spektren generiert mit dem PhotoChemCAD-Paket von Jonathan Lindsey (H. Du, R. A. Fuh, J. Li, A. Corkan, J. S. Lindsey, *Photochemistry and Photobiology*, **68**, 141-142, (1998)).

5.3.2 Organische Flüssigszintillatoren

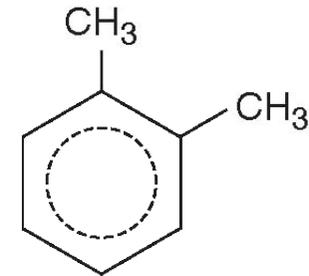
Chem. Struktur einiger wichtiger Lösungsmittel



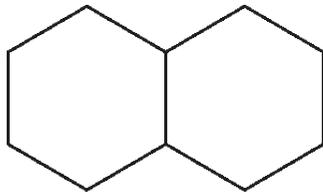
Benzol



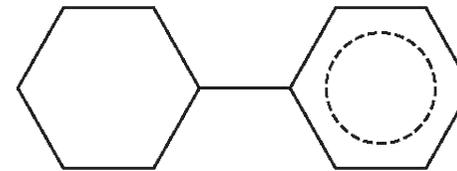
Toluol (Methylbenzol)



o-Xylol (ortho-Dimethylbenzol)



Decalin (Decahydronaphtalen)



Phenylcyclohexan

5.3.3 Plastikszintillatoren

Allgemeines – 1



- ★ Plastikszintillatoren sind heutzutage die in der beschleunigerbasierten Teilchenphysik und in der Kernphysik wahrscheinlich am häufigsten eingesetzten organischen Szintillatoren.
- ★ Analog zu Flüssigszintillatoren werden **gelöste organische Szintillatoren** zusammen mit anderen organischen Additiven verwendet, nur daß nun die **Trägersubstanz eine polymere Festkörpermatrix** (Plastik) ist. Typische Konzentrationen des primären Szintillators sind ≈ 10 g pro Liter Lösungsmittel.
- ★ Vorteile:
 - **schnelle Fluoreszenzzeiten**: ≤ 3 ns
 - **nahezu beliebige Dektorform** (Blöcke, Platten, dünne Folien, Fasern)
 - **einfach herzustellen, billig**
 - **resistent gegenüber Wasser, Silikonfett und niedermolekularen Alkoholen**
- ★ Nachteile:
 - **empfindlich auf organische Lösungsmittel** (z.B.: Aceton)
 - in der Regel **nicht besonders strahlungshart**

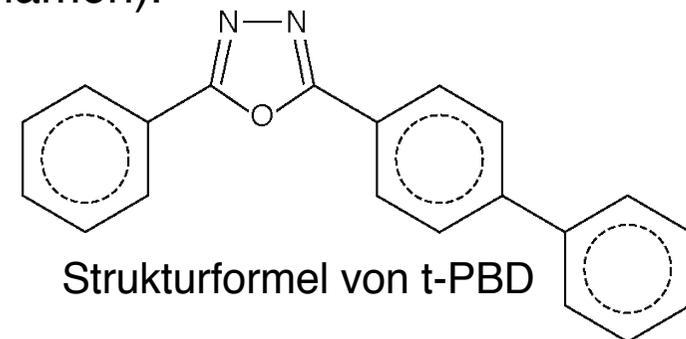
5.3.3 Plastikszintillatoren

Allgemeines – 2, Verwendete Materialien



- ★ Trotz relativ guter chemischer Stabilität sollten bei der Handhabung von Plastikszintillatoren Schutzhandschuhe getragen werden, da Schweiß und Körperfette das Plastik angreifen und in der Folge **Mikrorisse** (“**Crazing**”) verursachen können, welche die Lichtausbeute stark verringern.
- ★ Wegen der kurzen Abklingzeiten kann die Anstiegszeit oft nicht mehr vernachlässigt werden. Statt der Birks-Formel wird zur Beschreibung des Signals oft eine Faltung aus einer Gauß- und einer Exponentialfunktion verwendet.
- ★ Primärszintillatoren und Wellenlängenschieber sind **oft die gleichen wie in organischen Flüssigkeitsszintillatoren**. Meist werden diverse Gemische verwendet (firmenspezifisch, etliche Markennamen).

- primäre Szintillatoren:
p-Terphenyl, PPO, t-PBD, ...
- Wellenlängenschieber:
POPOP, BBQ, ...



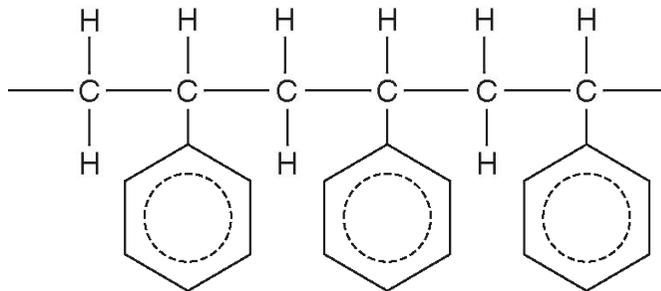
- ★ Wichtige Trägersubstanzen:
 - **Polyvinyltoluol, Polyphenylbenzol, Polystyrol, PMMA**

5.3.3 Plastiksintillatoren

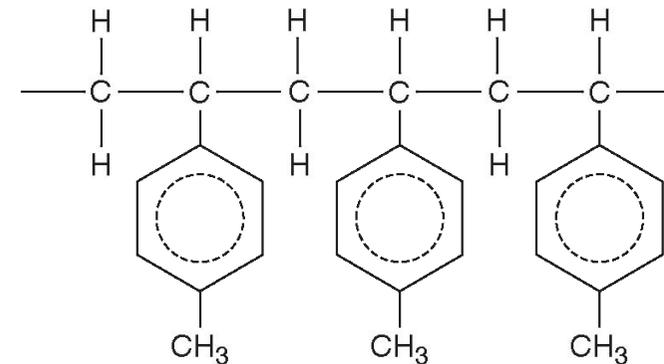
Chem. Struktur einiger wichtiger Polymere



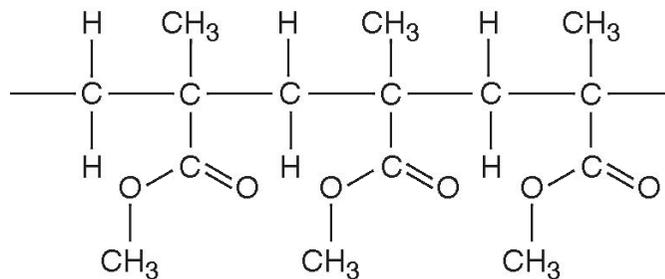
Polystyrol (= Polyvinylbenzol)



Polyvinyltoluol (= Polyvinylmethylbenzol)



PMMA (= Polymethylmethacrylat)

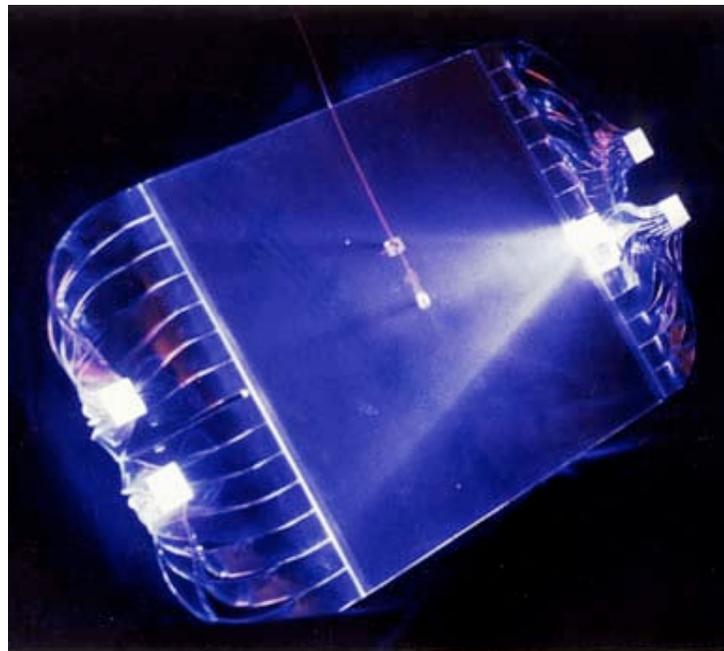


5.3.3 Plastiksintillatoren

Beispiel



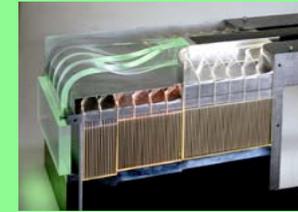
Szintillatorplatte mit angeklebtem PMMA-Lichtleiter und einer Eichquelle für ein Gammastrahlen-Experiment



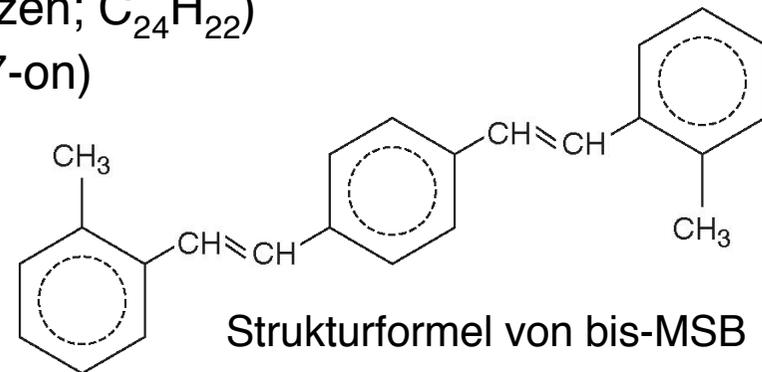
Quelle: Max-Planck-Institut für extraterrest. Physik,
http://www.mpe.mpg.de/mechanics/Pages/Kunststofflabor/Kunstlab_bild.html

5.4 Wellenlängenschieber

Allgemeines



- ★ Viele primäre Szintillatoren emittieren im UV-Bereich oder bei kurzwelligem sichtbaren Licht, während die meisten Photokathoden bei etwas größeren Wellenlängen die optimale Quantenausbeute* aufweisen. Um diese Diskrepanz auszugleichen verwendet man sogenannte Wellenlängenschieber.
- ★ Wellenlängenschieber absorbieren bevorzugt Licht einer bestimmten Wellenlänge und re-emittieren es bei einer anderen (meist größeren) Wellenlänge.
- ★ Wichtige Wellenlängenschieber:
 - **POPOP** (1,4-bis-[2-(5-Phenyloxazolyl)]-Benzen; $C_{24}H_{16}N_2O_2$)
 - **bis-MSB** (1,4-bis(2-Methylstyryl)-Benzen; $C_{24}H_{22}$)
 - **BBQ** (Benzimidazo-Benzisochinolin-7-on)
- ★ Wellenlängenschieber können entweder als Additiv **direkt dem Szintillator beigemischt** oder **in einen externen Lichtleiter integriert** werden.



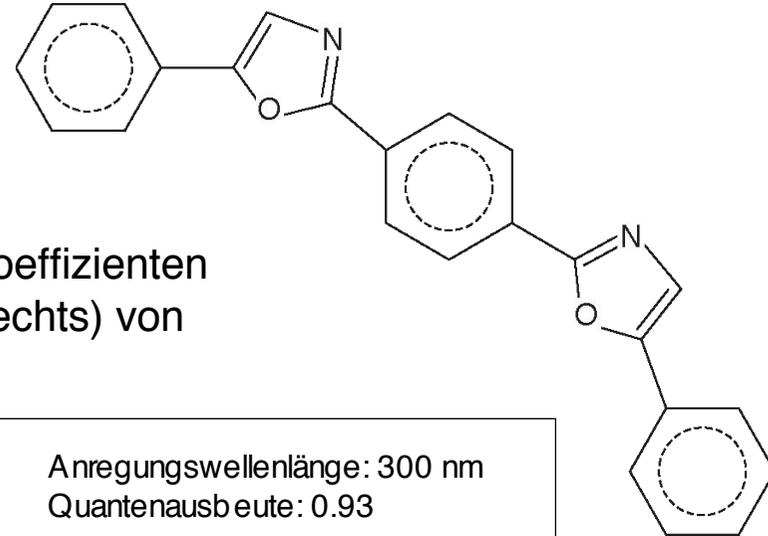
- bei Photokathoden: Wahrscheinlichkeit der Emission eines Photoelektrons pro einfallendem Photon
bei Wellenlängenschieber: Wahrscheinlichkeit der Emission eines sekundären Photons pro einfallendem Photon

5.4 Wellenlängenschieber

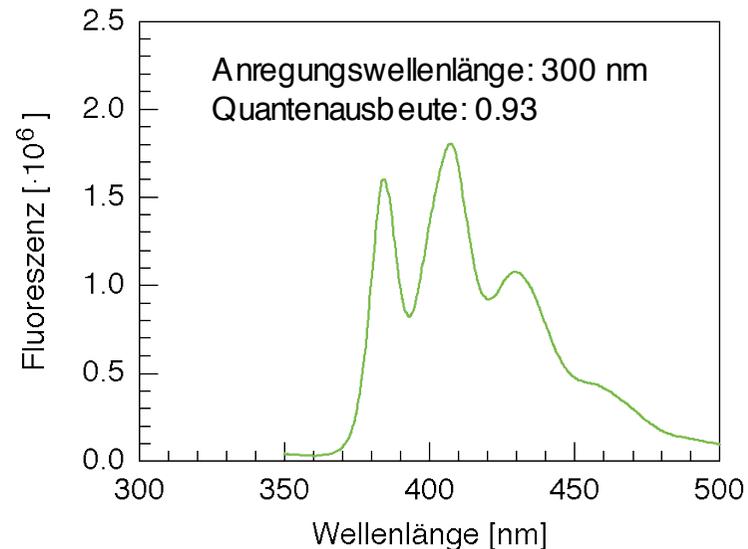
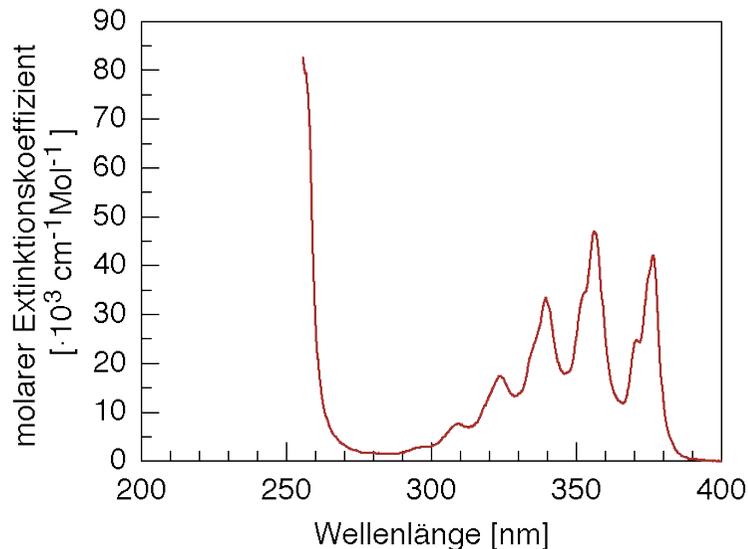
Beispiel POPOP – Struktur und Spektren



Bild rechts: Chem. Strukturformel von POPOP
(1,4-bis-[2-(5-Phenyloxazolyl)]-
Benzen; $C_{24}H_{16}N_2O_2$)



Bilder unten: Spektren für den molaren Extinktionskoeffizienten
(links) und die Fluoreszenzemission (rechts) von
POPOP (gelöst in Cyclohexan).



Quelle: <http://omlc.org/spectra/PhotochemCAD/html>; Spektren generiert mit dem PhotoChemCAD-Paket von Jonathan Lindsey (H. Du, R. A. Fuh, J. Li, A. Corkan, J. S. Lindsey, *Photochemistry and Photobiology*, **68**, 141-142, (1998)).

5.5 Lichtleiter

Allgemeines



- ★ In vielen Experimenten ist es nicht möglich oder wünschenswert, den Photomultiplier (i. A. Photodetektor) direkt an den Szintillator zu koppeln (z.B. wegen Platzmangel oder magnetischer Felder vor Ort). Häufig passen auch die Form des Szintillators und jene der Photokathode nicht zueinander und brauchen daher einen “Adapter” dazwischen. Dann werden sogenannte **Lichtleiter (“Light Guides”)** eingesetzt, um die Verbindung zw. Szintillator und Photodetektor herzustellen.
- ★ Lichtleiter bestehen üblicherweise aus einem hochgradig transparenten Plexiglas. **Das Licht wird durch (Total-)Reflexion an der Innenseite der Wände im Lichtleiter gehalten und so dort entlanggeführt.**
- ★ Für optimale Reflexionsbedingungen auch außerhalb des Totalreflexionswinkels werden die Wände des Lichtleiters meist poliert und/oder verspiegelt. Trotzdem kommt es natürlich real stets zu Verlusten.
- ★ Häufig verwendetes Material für Lichtleiter: **PMMA (Polymethylmethacrylat)**
- ★ Oft werdem dem Lichtleiter auch Zusätze beigemischt, damit er gleichzeitig als Wellenlängenschieber fungiert.

5.5 Lichtleiter

Einfluß der Querschnittsflächen auf die Lichtübertragung



- ★ Phasenraumargumente (Liouville Theorem) zeigen, das die **Flußdichte der Photonen im Lichtleiter nicht “komprimierbar”** ist. D.h., der *maximal* übertragbare Anteil an Licht wird durch das Verhältnis der Querschnittsfläche am Lichtleiterausgang zu jener am Lichtleitereingang beschränkt. Optimal sind daher Lichtleiter mit gleich großer Querschnittsfläche an beiden Enden:

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} \leq \frac{A_{out}}{A_{in}} \quad (A_{out} \leq A_{in})$$

A_{in} ... Querschnittsfläche am Übergang zum Szintillator

A_{out} ... Querschnittsfläche am Übergang zum Photodetektor

I_{in} ... gesamte Lichtintensität bei Eintritt in den Lichtleiter

I_{out} ... gesamte Lichtintensität bei nach Übertragung durch den Lichtleiter

- ★ Die Form des Querschnitts spielt hingegen *keine* Rolle für die Lichtübertragung, sofern scharfe Knick und zu starke Biegungen im Verlauf des Lichtleiters vermieden werden (“**adiabatische Lichtleiter**”). D.h., man kann die Form des Querschnittes graduierlich verändern und sie so an beiden Enden optimal anpassen.

5.5 Lichtleiter

Abschwächungslänge



- ★ Durch Absorption im Lichtleiter selbst einerseits und durch Verluste bei der Reflexion an den Wänden andererseits kommt es zur Abschwächung der Lichtintensität während der Übertragung:

$$I(z) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{z}{\lambda_{att}}\right)$$

$$\frac{1}{\lambda_{att}} = \frac{1}{\lambda_{abs}} + \frac{1}{\lambda_{refl}}$$

- z ... Position innerhalb des Lichtleiters (Übertragungsstrecke)
- I_0 ... Lichtintensität am Ursprungsort ($z = 0$, bei Eintritt in den Lichtleiter)
- λ_{att} ... Abschwächungslänge
- λ_{abs} ... Absorptionslänge (durch Verluste im Lichtleitermaterial)
- λ_{refl} ... Reflexionslänge (durch Verluste bei Reflexion an den Wänden)

- ★ Die Absorptionslänge kann durch vorhandene Fremdstoffe (Verunreinigungen, eingebrachte Wellenlängenschieber) stark vermindert werden.
- ★ Üblich sind Abschwächungslängen von mehreren Metern.

5.5 Lichtleiter

Beispiele für verschiedene Geometrien



Bild rechts:
Lichtleiter in
sogenannter
Fischschwanz-
geometrie. Das
flache Ende
dient zur Kopp-
lung an einen
Szintillator, das
runde Ende zur
Kopplung an
einen Photo-
multitplier.



Quelle: <http://www.brantacan.co.uk/LightGuide1.jpg>

Bild unten: Adiabatischer Lichtleiter in Form
eines sogenannten "Twisted Light Guide".



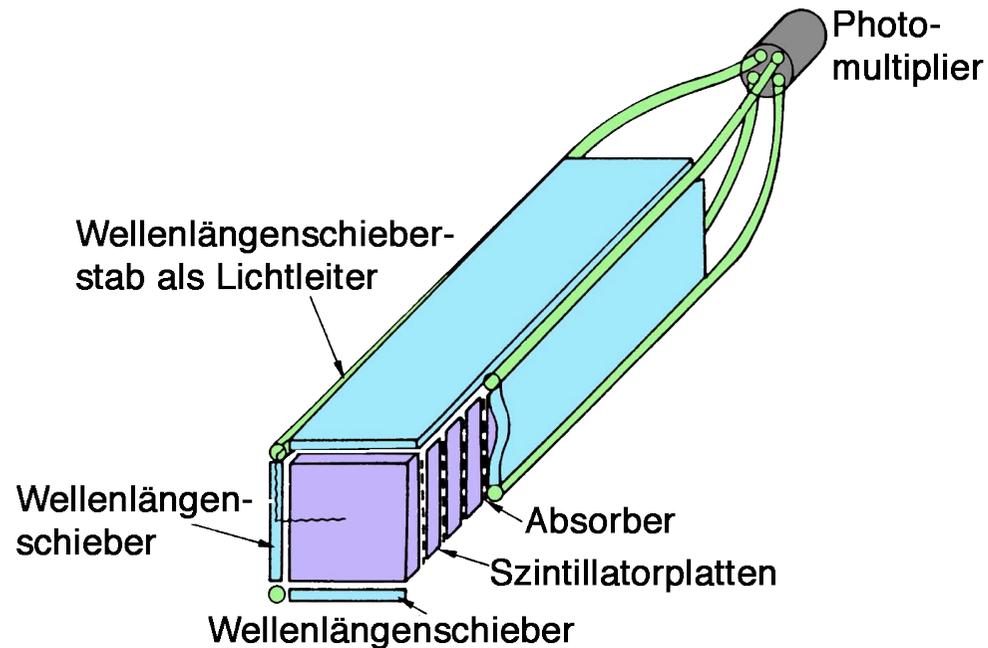
Quelle: CERN Microcosm Ausstellung, Photo: M. Krammer

5.4. Lichtleiter

Lichtleiter als Wellenlängenschieber



Szintillatorplatten (in einem Kalorimeter mit zwischenliegenden Absorberplatten) mit zweistufiger Auslese über zwei aufeinander abgestimmte Wellenlängenschieber.



Quelle: C. Grupen, *Teilchendetektoren*, B.I. Wissenschaftsverlag, 1993

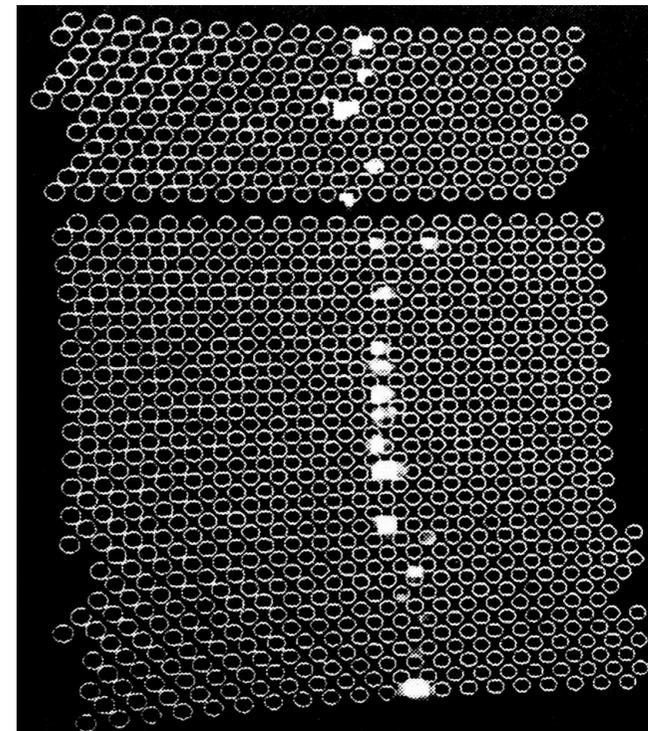
5.6 Szintillierende Fasern

Allgemeines



- ★ Für den Bau von Szintillationsdetektoren mit guter Ortsauflösung ($\leq 100 \mu\text{m}$) können szintillierende Fasern verwendet werden. Im Prinzip sind verschiedene Arten von Fasern einsetzbar:
 - Plastikfasern
 - Glasfasern
 - Kapillare, gefüllt mit szintillierender Flüssigkeit
- ★ Durch die Möglichkeit, relativ kostengünstig immer dünnere Plastikfasern herzustellen, gewinnen aber Plastikfasern gegenüber den anderen Arten immer mehr an Bedeutung.

Teilchenspür in einem Stapel szintillierender Fasern.
Faserdurchmesser 1 mm.



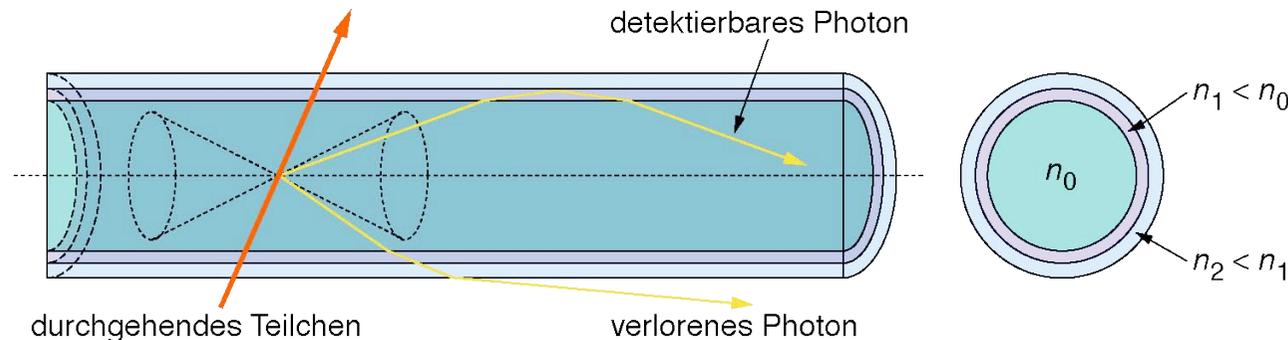
Quelle: C. Grupen, *Teilchendetektoren*,
B.I. Wissenschaftsverlag, 1993

5.6 Szintillierende Fasern

Aufbau



- ★ Der Kern, mit einem Brechungsindex n_0 , besteht z.B. aus Polystyrol oder Polyvinyltoluol, welches mit dem primären Szintillator sowie meist einem Wellenlängenschieber versetzt ist.
- ★ Umgeben ist der Kern von (mindestens) einem dünnen Mantel, welcher einen Brechungsindex $n_1 < n_0$ hat, sodaß es am Übergang Kern–Mantel zur Totalreflexion kommen kann.
- ★ Man beachte, daß nur ein relativ kleiner Teil des entstehenden Lichtes in der Faser bleibt und durch Totalreflexion weitergeleitet wird.



Längs- und Querschnitt einer szintillierenden Faser mit doppeltem Mantel. Eingezeichnet sind ein einfallendes Teilchen und 2 dadurch erzeugte Photonen sowie der erlaubte Öffnungswinkel für durch Totalreflexion weitergeleitete Photonen.

5.6 Szintillierende Fasern

Anwendungen



- ★ Szintillierende Faser finden ihre Anwendungen in:
 - Kalorimetern
 - “Pre-shower”-Detektoren
 - Positionsdetektoren
- ★ Der UA2 Detektor (1978–1990 Experiment am Proton-Antiproton Collider SPS, CERN) hatte einen Positionsdetektor aus 60000 Plastikfasern (mehrere Lagen, Verlauf der Fasern parallel zum Strahlrohr). Jede Faser hatte einen Durchmesser von 1 mm und eine Länge von 2.1 m. Primärer Szintillator war PBD, als Wellenlängenschieber diente POPOP. Die Auslese erfolgte mittels Bildverstärker (“image intensifiers”) und CCDs (“charge coupled devices”). Die erreichte Positionsauflösung pro Lage betrug $390 \mu\text{m}$.
- ★ Für zukünftige Experimente wurden bereits Mikrofasern mit Durchmessern von $15\text{--}30 \mu\text{m}$ getestet. Die Auslese kann über positionsempfindliche Photomultiplier (“multianode PMs”) bzw. über Arrays aus Silizium-Dioden erfolgen.

5.6 Szintillierende Fasern

Beispiele



Szintillierende Fasern aus dem em. Kalorimeter des CHORUS Detektors (SPS, CERN)



Quelle: CERN Photodatabase, Photo number: CERN-EX-9201043, <http://cdsweb.cern.ch/>

Szintillierende Fasern für den MINOS Detektor (Fermilab), Faserdurchmesser 1 mm, min. Biegeradius 1.7 cm.



Quelle: Leon Mualem, Presentation at the 2nd NuMI Off-Axis Experiment Detector Workshop, Argonne National Laboratory, April 2003

5.7 Photomultiplier

Allgemeines



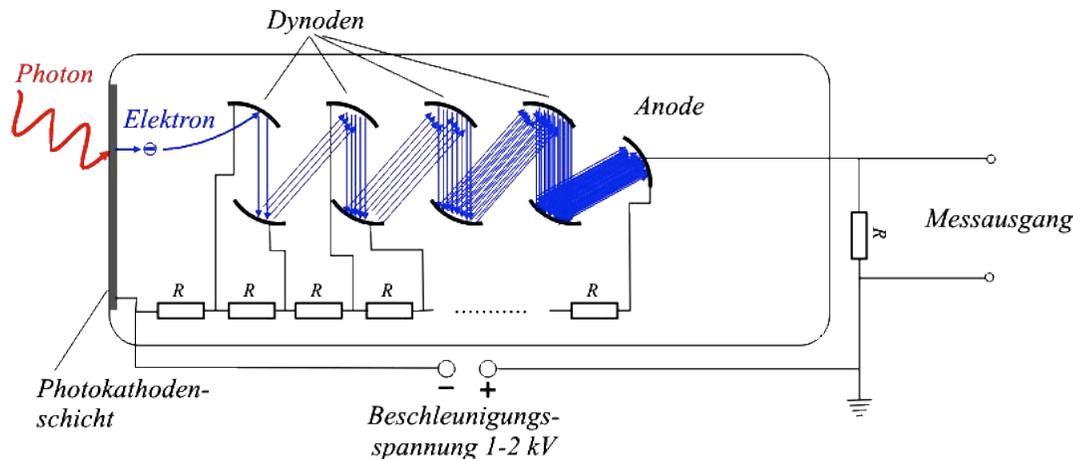
- ★ Obwohl inzwischen auch vermehrt optoelektronische Bauelemente auf Halbleiterbasis eingesetzt werden (z.B. Avalanche-Photodioden, CCDs), sind, zumindest in der Hochenergiephysik, **Photomultiplier (PM) nach wie vor die am häufigsten benutzten Geräte zur Umwandlung des von Szintillatoren erzeugten Lichtes in elektrische Signale.**
- ★ Vorteile:
 - **hohe Verstärkungsfaktoren (10^4 – 10^7) → sensitiv auf einzelne Photonen**
- ★ Nachteile:
 - **empfindlich auf Magnetfelder**
- ★ Ein Photomultiplier besteht im Prinzip aus einer **evakuierten Glasröhre** in welcher sich diverse Elektroden befinden: eine **Photokathode**, eine **Anode**, sowie mehrere **Dynoden (= Sekundäremissionselektroden)**, welche “stufenförmig” auf elektrischen Potentialen zw. jenem der Kathode und dem der Anode liegen.

5.7 Photomultiplier

Funktionsprinzip



Photonen treffen auf die **Photokathode** und lösen dort mittels **photoelektrischem Effekt** Elektronen heraus. Diese e^- werden durch die anliegenden Spannungsunterschiede auf die erste **Dynode** geführt und dabei so stark beschleunigt, daß sie dort mittels **Sekundärelektronenemission** weitere Elektronen herauslösen. Anschließend wiederholt sich der Vorgang entlang der “Potentialtreppe” von Dynode zu Dynode, wobei jedes Mal eine Elektronenvervielfachung erfolgt. Letzte Stufe ist die **Anode**, wo die eintreffenden e^- gesammelt und als Signal **ausgelesen** werden.

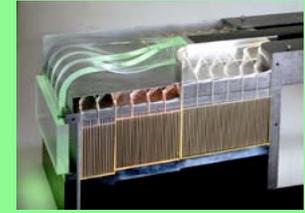


Schema zur prinzipiellen Funktionsweise eines Photomultipliers: Licht fällt auf die Photokathode (links) und wird in e^- umgewandelt, welche durch die Dynoden vervielfacht und anschließend an der Anode ausgelesen werden (rechts).

Quelle: Jkrieger, Beitrag zur Wikipedia (deutsch); <http://de.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier/>, (Bild leicht modifiziert)

5.7 Photomultiplier

Eintrittsfenster und Schirmung



- ★ Das Eintrittsfenster ist meist aus normalem Glas, Borsilikatgläsern oder aus **Quarzglas**. Letzterem wird wegen seiner Durchlässigkeit für UV-Licht oftmals der Vorzug gegeben. Ein weiterer Vorteil von Quarzglas ist die besonders geringe thermische Ausdehnung.
- ★ Um die Empfindlichkeit gegenüber Magnetfeldern zu senken, verwendet man entlang der Elektronen-Beschleunigungsstrecke eine Abschirmung aus sogenanntem **μ -Metall** (Markennamen: **Permalloy**, MuMetal, HyMu-80, Hipernom). Dies ist ein extrem weichmagnetisches Material, welches daher sehr effizient Magnetfelder abschirmt. Es besteht aus einer Nickel-Eisen-Legierung ($\approx 77\%$ Ni, $\approx 15\%$ Fe) mit Beimengungen von Kupfer und Molybdän.

5.7 Photomultiplier

Photokathode – 1



- ★ Die Kathode besteht aus photosensitivem Material, und wird meist in Form eines dünnen Films direkt auf die Innenseite des Eintrittsfensters aufgetragen.
- ★ Ein wichtiger Parameter der Photokathode ist die **Quantenausbeute** (“quantum efficiency”) $\eta(\lambda)$. Das ist die **Wahrscheinlichkeit, daß ein einfallendes Photon ein Photoelektron erzeugt**. Sie ist abhängig vom Kathodenmaterial und von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes.
- ★ In Metallen verlieren durch Photonen angeregte e^- durch Stöße mit den zahlreichen Leitungselektronen rasch an Energie. Dadurch werden sie vor Erreichen der Oberfläche oft so stark abgebremst, daß sie die Kathode nicht verlassen können. Metalle sind daher in der Regel *keine* guten Photokathoden (max. Quantenausbeute $\eta_{peak} \approx 0.1\%$, d.h. nur jedes 1000. Photon mit “optimaler” Wellenlänge erzeugt ein Photoelektron).
- ★ Die meisten **Photokathoden** werden daher aus Halbleitern gemacht, in der Regel diverse **Antimonidverbindungen mit einem Alkalimetall oder Bialkaliverbindungen**. Diese erreichen maximale **Quantenausbeuten von 10–30%**.

5.7 Photomultiplier

Photokathode – 2

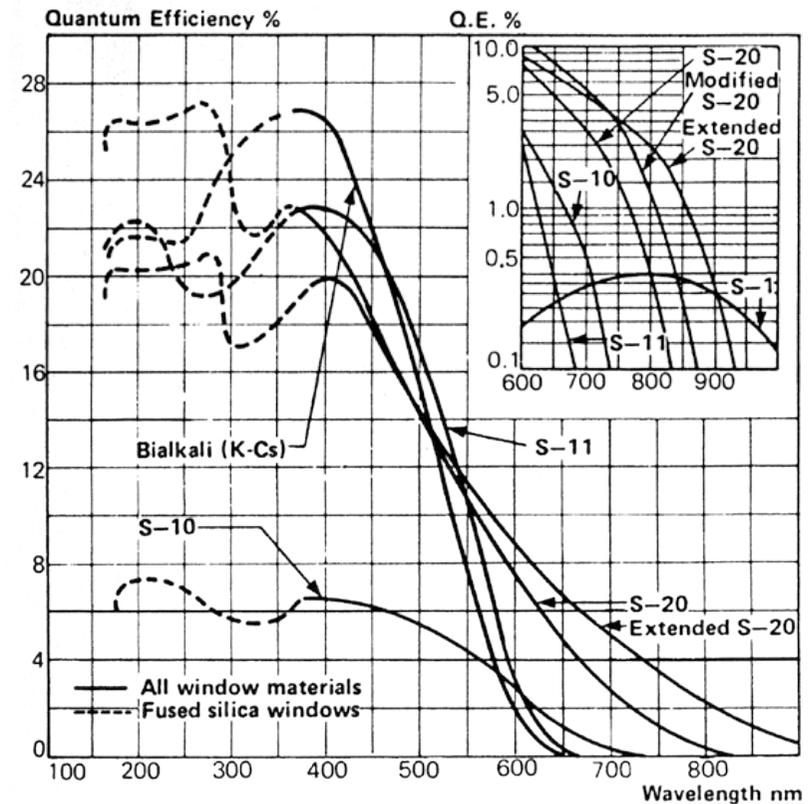


Tabelle: Wellenlänge für optimale Effizienz und maximale Quantenausbeute (quantum efficiency, Q.E.) einiger Legierungen für Photokathoden:

Material	max. Emission bei λ_{peak} [nm]	Q.E. @ λ_{peak} [%]
Ag-O-Cs	800	0.36
SbCs	400–440*	16–22*
SbNa-KCs	420–550*	8–20*
SbRb-Cs	420	26
Sb-K-Cs	400	26
Cs-Te	235	10

*je nach Mischungsverhältnis und Herstellungsprozess

Bild : Quantenausbeute als Funktion der Wellenlänge für einige kommerziell erhältliche Photokathoden:



Quelle (Bild und Tabelle) : W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer 1987

5.7 Photomultiplier

Dynodenkette und Anode – 1



- ★ Die von der Photokathode emittierten e^- müssen beschleunigt und auf die 1. Dynode fokussiert werden. Dies wird durch eine geeignete Konfiguration elektrischer (und ev. magnetischer) Felder erreicht. Wichtige Anforderungen:
 - Möglichst alle Photoelektronen sollen die 1. Dynode erreichen.
 - Die Zeit, welche ein e^- von der Photokathode zur 1. Dynode braucht, soll möglichst unabhängig vom Emissionspunkt auf der Kathode sein.
- ★ Die von der 1. Dynode emittierten Sekundärelektronen werden wiederum beschleunigt und auf die 2. Dynode fokussiert. Wiederum sind **hohe Effizienz** und **Zeitunabhängigkeit vom Emissionsort** essentiell. Der Vorgang wiederholt sich entlang der Dynodenkette von Dynode zu Dynode, bis schließlich die von der letzten Dynodenstufe erzeugten e^- an der Anode gesammelt werden.
- ★ Das Potentialgefälle entlang der Dynodenkette wird üblicherweise über einen **Spannungsteiler** angelegt. In der Regel liegen **zw. Kathode und Anode Spannungen von 1–2 kV**. Ein handelsüblicher Photomultiplier hat ca. 10–14 Stufen, d.h. zw. den einzelnen Dynoden beträgt die Potentialdifferenz meist ungefähr 100–200 V.

5.7 Photomultiplier

Dynodenkette und Anode – 2



- ★ Die wichtigsten Anforderungen an das Dynodenmaterial sind folgende:
 - **hoher Sekundäremissionsfaktor δ** , das ist die mittlere Anzahl der pro einfallendem e^- emittierten Sekundärelektronen,
 - **Stabilität** der Sekundäremission auch bei hohen Strömen,
 - **geringe thermionische Emission**, d.h. geringes thermisches Rauschen.
- ★ Analog zur Situation bei der Photokathode haben Metalle meist einen zu geringen Sekundäremissionsfaktor um als Dynodenmaterial brauchbar zu sein. Daher findet man auch bei Dynoden meist Halbleiter u. Isolatoren als Material.
- ★ Allerdings muß entlang der Dynodenkette ein elektrisches Feld aufrechterhalten werden. D.h., das nicht oder nur schlecht leitende Material zur Sekundäremission muß sich auf einem leitenden Untergrund befinden. Für diesen Zweck wird meist eine **Legierung aus einem relativ edlem Metall und einem Alkali- oder Erdalkalimetall** gewählt. Die (Erd-)Alkali-Komponente oxidiert, wodurch sich eine dünne isolierende Oxidschicht auf einer gut leitenden Unterlage ausbildet. Verwendet werden meist Ag–Mg, Cu–Be und Cs–Sb.

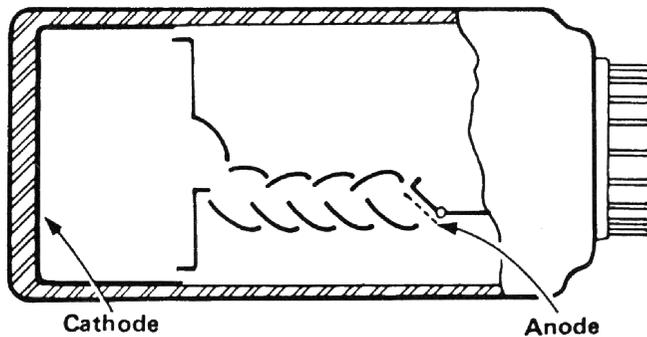
5.7 Photomultiplier

Diverse Geometrien

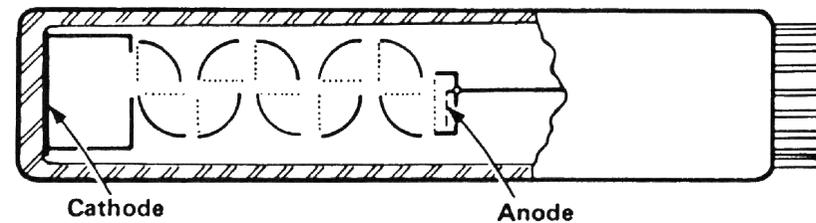


Diverse Geometrien für Photomultiplier.

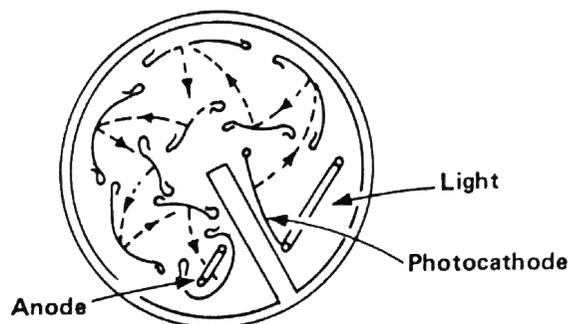
Linear focused PM



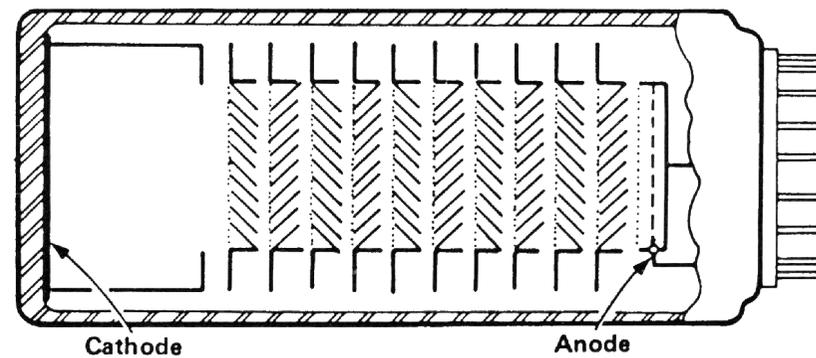
Box and Grid PM



Circular Cage, Side-on PM



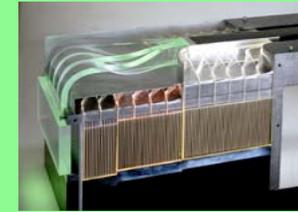
Venetian Blind PM



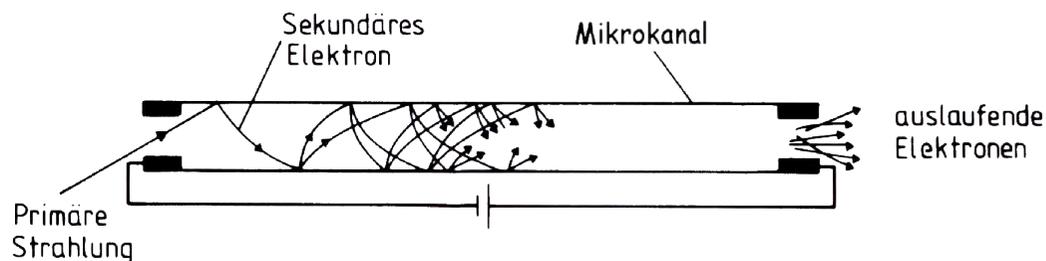
Quelle: W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer 1987

5.7 Photomultiplier

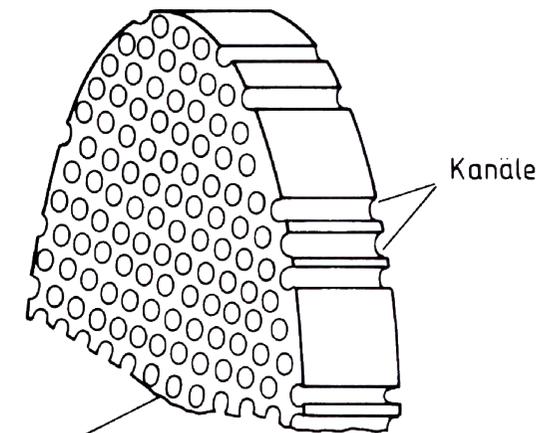
Mikrokanal-Multiplier



- ★ Hier dienen **Bleiglasplatten mit mikroskopischen Kanälen** zur e^- -Multiplikation. Die Bleiglasplatte inkl. der Kanalinnenwände wird mit dem gewünschten Dynodenmaterial beschichtet. Durch Anlegen einer Spannung zw. Plattenvorderseite und -rückseite, wird jeder Mikrokanal zu einer “kontinuierlichen” Dynode.
- ★ Meist werden 2–3 Platten hintereinander geschaltet. → Verstärkung bis zu 10^7 .
- ★ Dieses Design bietet:
 - relativ **hohe Unempfindlichkeit gegenüber Magnetfeldern (bis zu 0.2 T)**,
 - geringe Transitzeiten und extrem kleine Laufzeitunterschiede
→ **sehr hohe Zeitauflösung (≤ 100 ps)**.



Teil einer Mikrokanalplatte (rechts) und einzelner Mikrokanal im Querschnitt (oben).

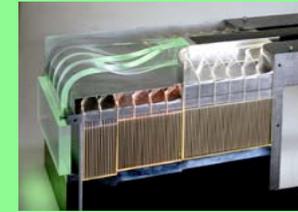


Quelle: K. Kleinknecht, *Detektoren für Teilchenstrahlung*, B.G. Teubner 1992

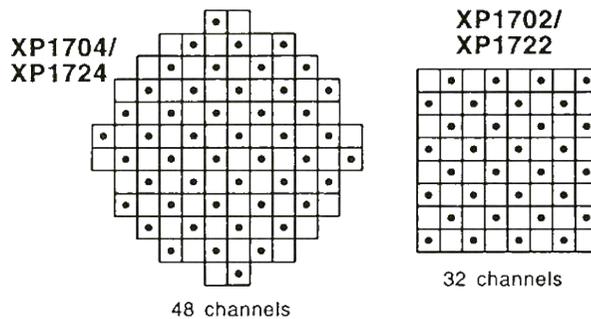
Nickel-Chrom-Kontakt

5.7 Photomultiplier

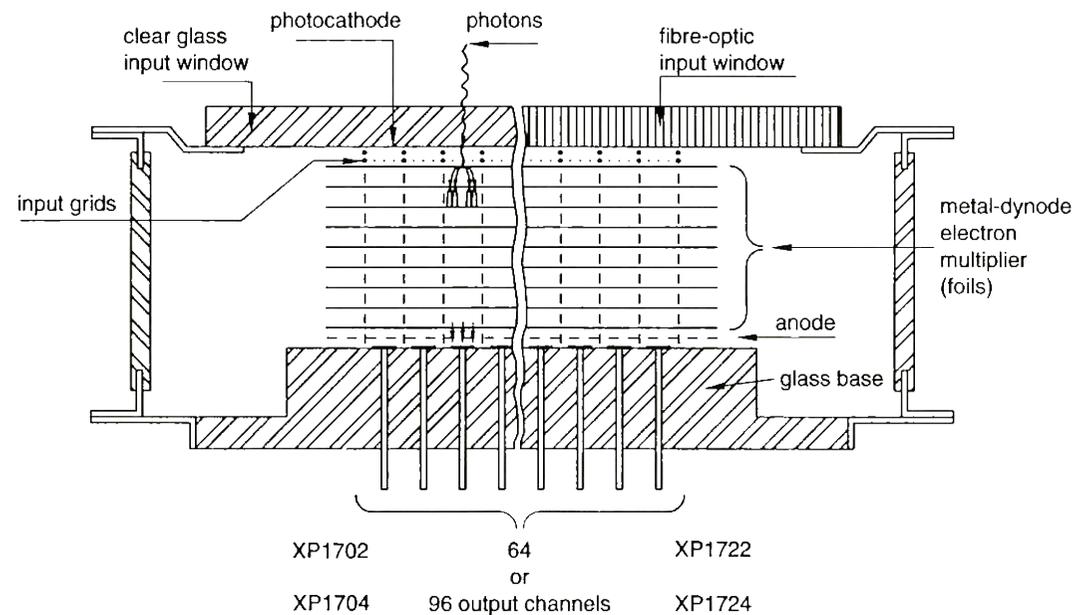
Multi-Anoden Photomultiplier



- ★ Bei Multi-Anoden PMs sind Dynodenkette und Anode segmentiert, um eine positionsempfindliche Detektion zu ermöglichen.
- ★ Um ein Übersprechen zw. einzelnen Anodenpixeln zu vermeiden, werden oft manche Teile der Anode nicht ausgelesen sondern als "Guard"-Strukturen verwendet.



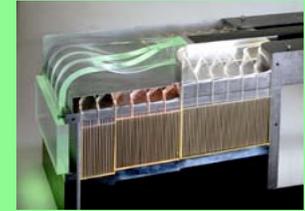
Beispiele für segmentierte Anoden. Die gepunkteten Pixel werden ausgelesen, die nicht markierten sind Guardstrukturen.



Schema eines PM mit segmentierter Anode

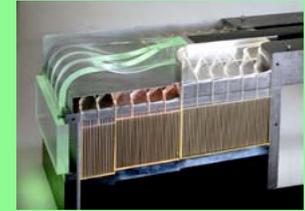
Quelle: Firma Photonis, Broschüre "Multi-Channel Photomultiplier XP1700", 2004

Nützliche Referenzen – 1



- ★ Buch allgemein über experimentelle Kern- und Teilchenphysik mit guten Kapiteln über Szintillatoren und Photomultiplier:
W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer, 1999
- ★ Allgemeines Detektorbuch, mit weiteren Informationen über Szintillatoren:
C. Grupen, *Teilchendetektoren*, B.I. Wissenschaftsverlag, 1993
- ★ Emissions- und Absorptionsspektren diverser Farbstoffe und anderer, insbesondere in der Lasermedizin wichtiger, Stoffe:
<http://omlc.org.edu/spectra/PhotochemCAD/html>
- ★ S. E. Derenzo, M. J. Weber, E. Bourret-Courchesne, and M. K. Klintenberg, *The Quest for the Ideal Inorganic Scintillator*, Nucl. Instr. Meth. A **505**, 111 (2003)

Nützliche Referenzen – 2



- ★ Zwei der Firmen, welche Szintillatoren und Zubehör anbieten – auf den Unterseiten finden sich auch allgemeine Informationen zu Szintillatoren:
<http://www.scionixusa.com>, <http://www.detectors.saint-gobain.com>
- ★ Zwei der Firmen, welche u.a. Photomultiplier anbieten – auf den Unterseiten finden sich auch allgemeine Informationen:
<http://www.hamamatsu.com>, <http://www.photonis.com/>
- ★ O. Nähle, Diplomarbeit über szint. Fasern für das COMPASS-Experiment:
<http://www.iskp.uni-bonn.de/gruppen/compass/dipnaehle/inhalt.html>
- ★ Etliche Diplomarbeiten zu den Themen Szintillatoren, Wellenlängenschiebern und Kalorimetern finden sich z.B. unter:
<http://maren.desy.de/diplomarbeiten/menu.html>