Kapitel 3

Szintillierende Fasern

Für Anwendungen kleiner Plastikszintillatoren spielen szintillierende Fasern ('scintillating fibers') eine immer entscheidendere Rolle. Sie scheinen aufgrund ihrer einfachen Handhabung gegenüber bisher eingesetzter, ortsauflösender Detektorkomponenten eine interessante Alternative zu sein.

3.1 Funktionsweise einer Faser

Alle erhältlichen Plastikfasern sind organische Szintillatoren und setzen sich prinzipiell aus drei Komponenten zusammen (Abb. 3.1), wobei der ***core*** der Faser der eigentliche Szintillator

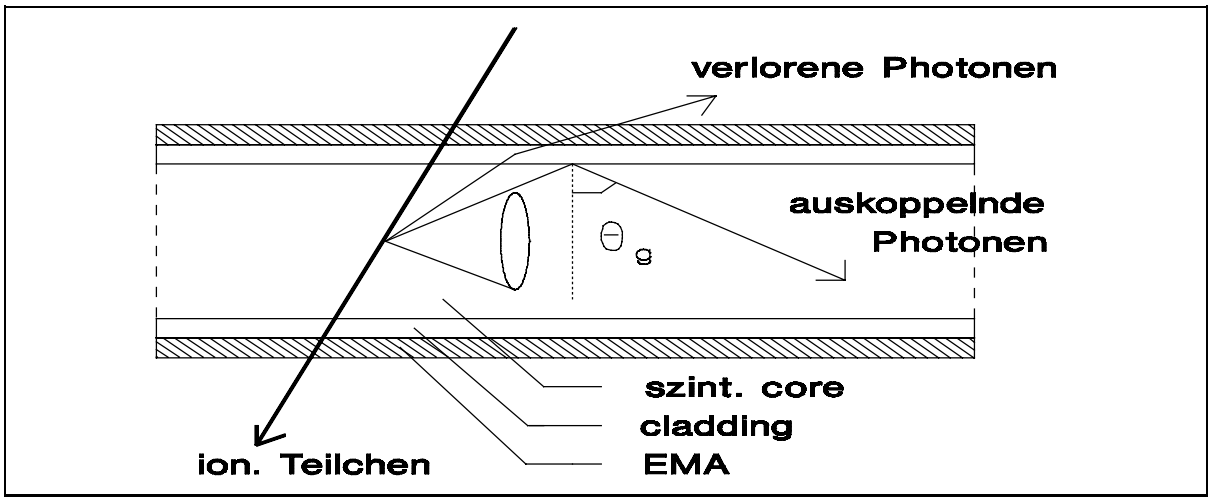

Abb. 3.1 Zusammensetzung einer Faser

ist. Dieser besteht meist aus Kohlenwasserstoffverbindungen $(CH)_X$ in Form von Benzolringketten (z.B. Polyvenyltoluene PVT und Polystyrene PS) mit einem schwach gebundenen π-Elektronen-System [BIR 53]. Beim Durchgang eines ionisierenden Teilchens durch den core werden diese π-Elektronen in angeregte Zustände versetzt und fallen entweder direkt, unter Aussendung von Licht (Fluoreszenz) oder über Zwischenzustände (Phosporeszenz) in den Grundzustand zurück.

Bei der Fluoreszenz erzeugt der Szintillator kurzwelliges Licht im UV-Bereich ($\lambda \approx 300$nm). Dieses liegt jedoch zum Teil im Absorptionsbereich des Szintillators selbst, so daß das Fluoreszenzlicht nach kürzester Weglänge wieder absorbiert wird (Autoabsorption). Da bei Fasern nur 6 % der in den gesamten Raumwinkel 4π emittierten Photonen durch Totalreflektion eingefangen werden, muß diese sich wiederholende Emission und Absorption unterdrückt werden (z.B. würde schon bei einer zweiten Absorption und Emission die ursprüngliche Intensität auf 0.4 % abnehmen).

Die Autoabsorption kann jedoch mit Hilfe von Wellenlängenschiebern (WLS), in geringen Konzentrationen dem Szintillator beigemischt, reduziert werden. Man unterscheidet hierbei zwischen dem ersten und zweiten WLS.

Der erste WLS (z.B. PBD) hat die Funktion, das Szintillatorlicht mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zu absorbieren, in Richtung größerer Wellenlänge zu 'schieben' (STOKES-shift) und dann Photonen mit dieser größeren Wellenlänge zu emittieren. Die Absorptionwahrscheinlichkeit dieser Photonen durch den Szintillator vermindert sich drastisch.

Voraussetzung für eine optimale Wirkungsweise des ersten WLS sind dabei sowohl ein großer, überlappender Bereich zwischen dem Emissions- und Absorptionsspektrums von Szintillator und WLS als auch ein hoher STOKES-shift (als Folge davon ergibt sich ein geringerer Überlapp von Absorptions-und Emissionsspektrum des WLS selbst). Um die Lichtausbeute einer Faser mit nur einem WLS weiter zu erhöhen, dotiert man den Szintillator des cores zusätzlich mit einem zweiten WLS.

Die Funktion des zweiten WLS (z.B. POPOP; Abb. 3.2) besteht darin, das Licht des ersten WLS zu absorbieren und in einer größeren Wellenlänge zu emittieren. Da der zweite WLS in wesentlich geringeren Konzentrationen als der erste dem Szintillator beigemischt ist, ist die Autoabsorption bei diesem auch wesentlich kleiner.

Der Nachteil eines zweiten WLS allerdings ist, daß sich das Übersprechen zwischen zwei direkt aneinanderliegenden Fasern vergrößert. Sind zwei Fasern nicht durch ein lichtdichtes

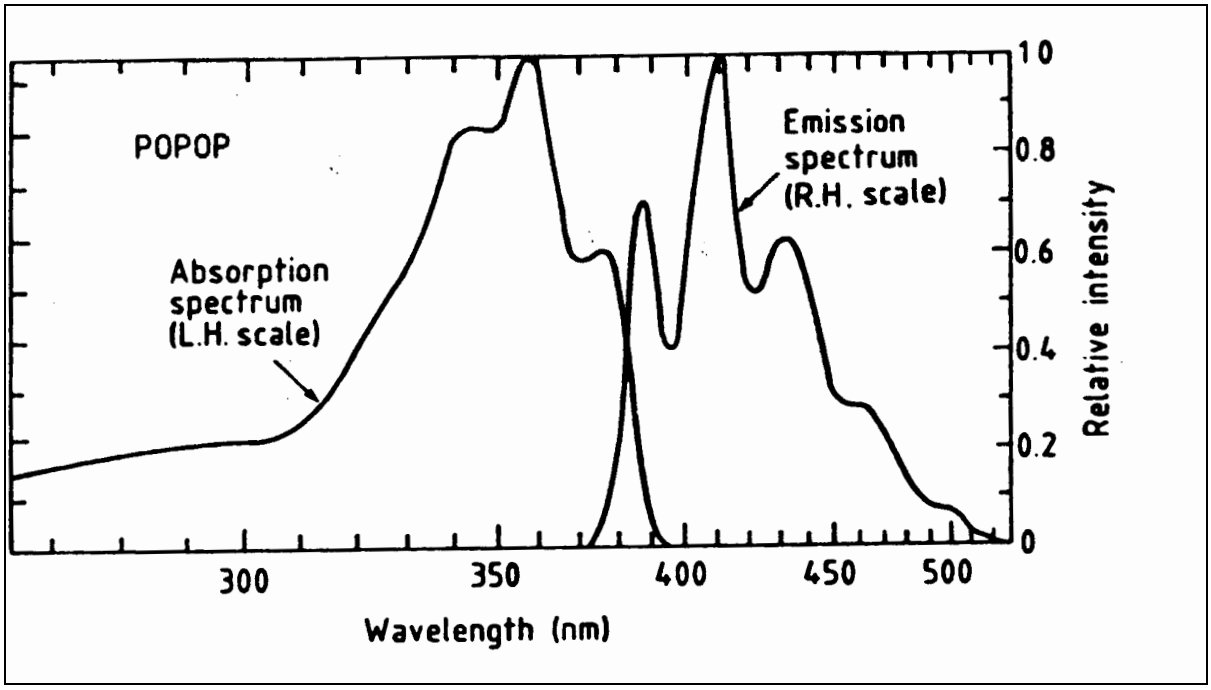

Abb. 3.2 Emissions- und Absorptionsspektrum von POPOP [KIR 87]

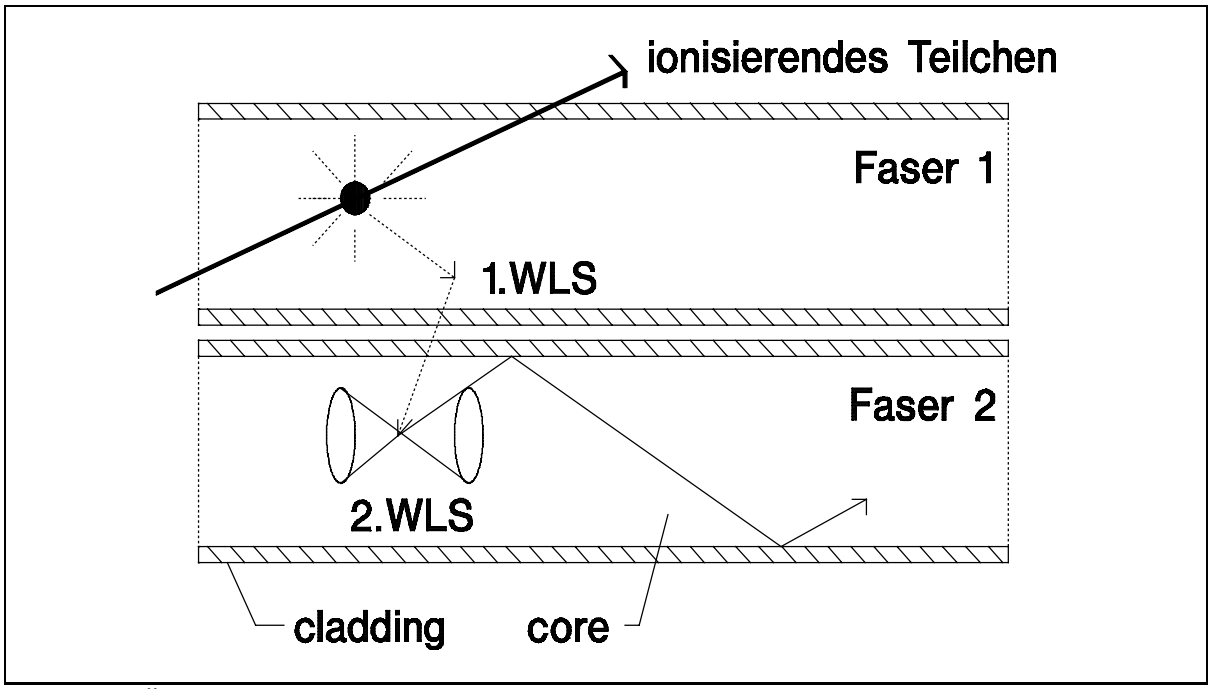

Abb. 3.3 Übersprechen zweier Fasern ohne EMA aufgrund des zweiten Wellenlängenschiebers

Material voneinander abgeschirmt, so besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, daß das Licht des ersten WLS (freie Weglänge ≈ 100-300 μm) der einen Faser vom zweiten WLS der anderen Faser absorbiert wird (Abb. 3.3).

Je nach Zusammensetzung bezeichnet man den Szintillator als binär (Szintillator + 1 WLS) bzw. ternär (Szintillator + 2 WLS). Die Art, Anzahl und Konzentration der WLS im core bestimmen also entscheidend die Lichtausbeute der Faser.

Die Schicht, die den core der Faser umgibt, ist das sogenannte ***cladding*** (10-50 μm dick). Es bietet dem Szintillator Schutz vor mechanischen und chemischen Beschädigungen und bildet ein Oberflächenmaterial mit konstantem Brechungsindex n_{clad} ($n_{clad} \approx 1.41\text{-}1.49$; Tabelle 3.1). Das Verhältnis n_{clad} / n_{core}, das den Grenzwinkel Θ_g der Totalreflektion bestimmt (Formel 3.1), legt unter anderem die Anzahl der erzeugten, totalreflektierenden Photonen fest.

$$\sin(\Theta_g) = n_{clad} / n_{core} \tag{3.1}$$

Bezeichnnung	BICRON BCF™ -10	OPTECTRON S 101 A/D	KYOWA SCSF-81
Material: core	Polystyrene	Polystyrene	Polystyrene
Material: WLS	? (vom Hersteller nicht angegeben)	1.0 % PBD 0.02 % POPOP	1.0 % PBD 0.02 % BDB
n_{clad} / n_{core}	1.49 / 1.60	1.41 / 1.592	1.49 / 1.59
Grenzwinkel Θ_g	68.63°	62.34°	69.57°
Dichte	1.032 g/cm^3	1.03 g/cm^3	1.03 g/cm^3
Peak des Emissionsspektrums	431 nm	im Bereich 430 nm	im Bereich 430 nm
Biegsamkeit (qualitativ)	gut	schlecht	gut

Tabelle 3.1: Materialkonstanten für Fasern verschiedener Hersteller

Desweiteren hat das cladding die Aufgabe, die Laufzeitunterschiede des Lichtes in der Faser zu reduzieren. Photonen, an einer Position der Faser generiert, werden unter verschiedenen Winkeln Θ emittiert. Falls sie die Totalreflexionsbedingung erfüllen ($\Theta > \Theta_g$), haben sie am auskoppelnden Ende der Faser unterschiedliche Wege zurückgelegt. Dies macht sich in einer endlichen Zeitauflösung bemerkbar. Vergrößert man mit dem cladding den Grenzwinkel Θ_g (z.B gegenüber Luft mit $n_{Luft} = 1$), so vermindern sich die Laufzeitunterschiede, und die Zeitauflösung verbessert sich.

Als dritter Bestandteil einer Faser sei das ***EMA*** (**e**xtra-**m**ural-**a**bsorber) genannt (s. Abb. 3.1). Dieser Teil der Faser umschließt core und cladding, wobei Teflon oder aufgedampftes Aluminium gebräuchliche Materialien sind.

Die Funktion des EMAs bei ternären Szintillatoren (= Szintillator + 2 WLS) ist die Verminderung des Übersprechens zwischen zwei Fasern. Spiegelnde EMAs haben zusätzlich die Aufgabe, das vom ersten WLS erzeugte, aus dem core austretende Licht (das nicht der Totalreflexion unterliegt) wieder in Richtung des cores zu reflektieren. Dieses Licht kann dann vom zweiten WLS derselben Faser absorbiert werden, wodurch sich die gesamte Lichtausbeute der Faser erhöht.

Die im Rahmen dieser Arbeit getesteten Fasern der Firmen BICRON, OPTECTRON und KYOWA sind in Tabelle 3.1 mit ihren jeweilig angegebenen Daten zusammengefaßt.

3.2 Behandlung und Halterung der Faser

Da fast alle Fasertypen in unbehandeltem Zustand geliefert werden, ist eine spezielle Oberflächenbehandlung der Faserenden nötig. Optimalen Kontakt auf dem Multiplierfenster und gute Lichtauskopplung aus der Faser erfordern plane, hochpolierte Endflächen der Fasern. Um dies zu erreichen, ist nach einigen Versuchen eine schnelle und sehr effektive Polierprozedur entwickelt worden.

Die Faser wird in einem Loch entsprechender Fasergröße eines PVC-Behälters fixiert, ohne dabei das cladding zu beschädigen. Ein Weichgummi preßt sich durch Druck gegen die Oberfläche der Faser und hält diese somit in ihrer Position fest. Der Druck wird durch zwei

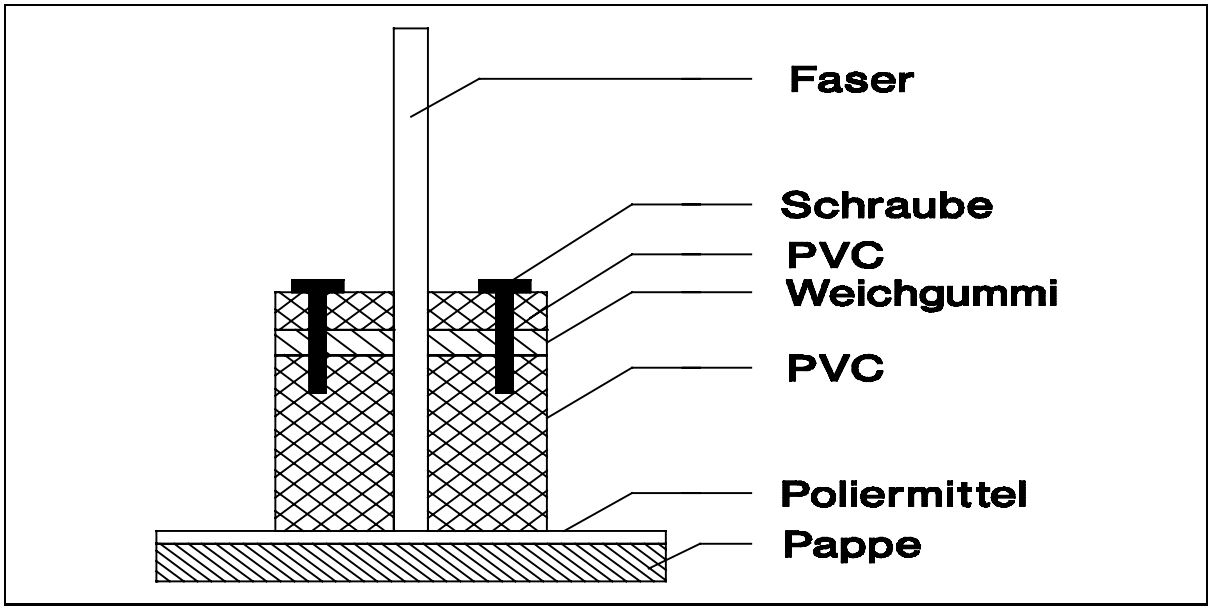

Abb. 3.4 Polierhalterung

Schrauben zwischen Deckel und Sockel des Behälters aufrechterhalten (Sandwich-Behälter; Abb. 3.4). Fixiert in dieser Halterung wird die Faser zuerst mit einem wasserfesten Sandpapier (600 bis 1000er Körnung) geschliffen und dann poliert. Als geeignetste Polierunterlage erwies sich weiche Pappe bzw. (leicht erhältlich) nicht hart gepresste Bierdeckel. Auf diese wird Poliermittel [UNIPO] aufgerieben, und darauf anschließend die Oberfläche der Faser, achterförmig kreisend, mit leichtem Druck bewegt. Die fertige Politur erkennt man an einer spiegelnden Oberfläche.

Die behandelte Faser auf dem Multiplier zu positionieren, kann z.B. durch Kleben in einer geeigneten Halterung erfolgen. Der Nachteil dabei allerdings ist, daß die Fasern im Schadensfall nicht austauschbar sind.

Daher wurde eine möglichst universelle Halterung entworfen und aufgebaut, mit der mehrere Fasern gleichzeitg fixiert und jederzeit ausgetauscht werden können. Sie ähnelt dem Prinzip des Polierbehälters mit dem Unterschied, daß mehrere Schrauben den entsprechend größeren erforderlichen Druck aufbringen. In diversen Messungen bewährte sich diese Halterung ohne erkennbare Probleme. Dabei wurden bis zu 16 Fasern gleicher Größe bzw. bis zu acht unterschiedlicher Größe und Formen gleichzeitig auf dem Multiplierfenster des VALVO XP 4702 befestigt. Das Problem, alle Faserenden in konstantem Abstand zur Unterseite des

Sandwich-Behälters zu fixieren, konnte mit einer zusätzlichen mechanischen Halterung gelöst werden. Die Toleranzen betrugen dann nur noch maximal 0.2 mm.

Ob Abstände dieser Größenordnung zwischen Faserende und Multiplierfenster die Ausgangssignale des Multipliers beeinflussen, wurde in einer Messung ermittelt.

Der Versuchsaufbau gleicht dem in Abschnitt 2.3 beschriebenen mit der zusätzlichen Möglichkeit, den Lichtleiter entlang seiner axialen Achse verfahren zu können. Das Ergebnis zeigt (Abb. 3.5), daß Abstände von 1 mm das Ausgangssignal nur um 10-20 % verkleinern. Abstände von nur 0.2 mm ergaben keine meßbaren Änderungen.

Da Lichtleiter und Szintillatoren gleicher Form und Größe gleiche optische Eigenschaften besitzen, gelten die Ergebnisse in Abb. 3.5 auch für szintillierende Fasern.

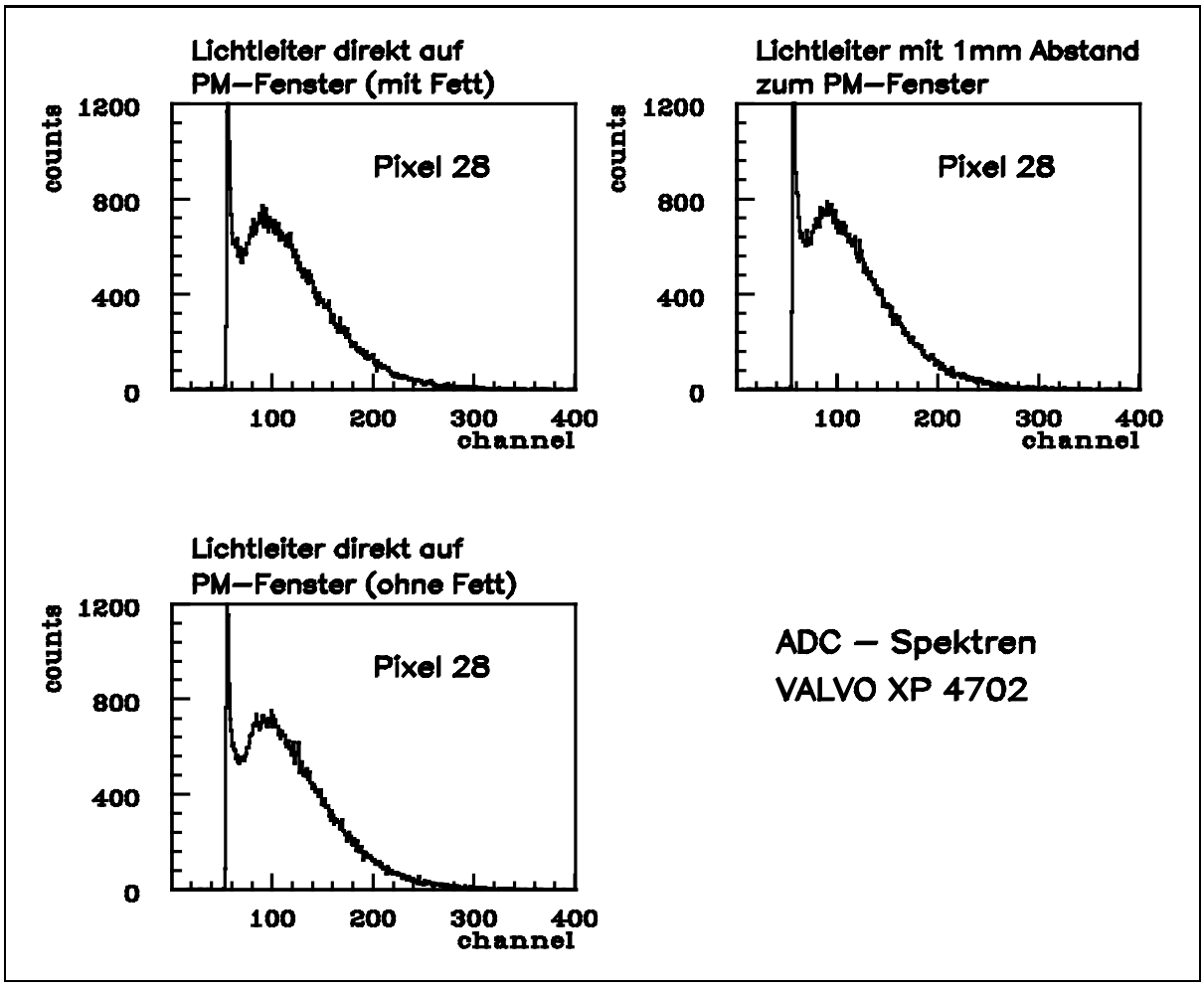

Abb. 3.5 Faserankopplung unter verschiedenen Bedingungen