Untersuchungen von Szintillationsfasern für ein Spaghettikalorimeter

Diplomarbeit
von
Rainer Barschke

II. Institut für Experimentalphysik
der Universität Hamburg
im Februar 1994

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

Eine der grundlegendsten Fragen im menschlichen Streben nach Erkenntnis ist die nach dem Aufbau der Materie. Trotz großartiger Erfolge der Physik in diesem Jahrhundert ist diese Frage noch nicht abschließend beantwortet. Heutige Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Elementarteilchenphysik versucht weiter in die Materie einzudringen und ihren Aufbau zu ergründen.

Seit 1991 steht am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg die Hadronen-Elektronen-Ringanlage HERA, die weltweit einzige ihrer Art, für Streuversuche von Elektronen an Protonen zur Verfügung. Mit Hilfe einer Reihe von Vorbeschleunigern werden Elektronen und Protonen in die 6.3 km lange unterirdische Ringanlage gegenläufig eingeschossen. Die Elektronen werden auf eine Energie von 30 GeV und die Protonen auf eine Energie von 820 GeV beschleunigt. In den Wechselwirkungszonen der Teilchendetektoren Zeus und H1 kollidieren die beiden Teilchensorten mit einer Schwerpunktsenergie von 314 GeV. Damit erschließt HERA einen großen kinematischen Bereich u.a. für die Untersuchung der Partonenstruktur des Protons.

Der H1-Detektor war zunächst hauptsächlich darauf ausgerichtet, Ereignisse mit möglichst hohen Viererimpulsüberträgen Q^2 zu untersuchen. Großes Interesse galt deshalb der Spurrekonstruktion und der Kalorimetrie in Vorwärtsrichtung der Protonen. Seitdem die Aufmerksamkeit verstärkt der tiefinelastischen Streuung bei kleinen Bjorken-x-Werten gilt — im Quark-Parton-Bild kann x als der Teil der Nukleonenenergie interpretiert werden, der vom wechselwirkenden Parton getragen wird — gewinnt auch der rückwärtige Detektorbereich an Bedeutung. Hier müssen sowohl das gestreute Elektron, als auch zum Teil der hadronische Endzustand nachgewiesen werden.

Um das physikalische Ziel, Messung von kleinen x-Werten von 10^{-5} (10^{-4}) bei Werten des quadratischen Impulsübertrages von 1 (10) GeV^2, zu erreichen, bedarf es einer Verbesserung der rückwärtigen Detektorregion. Vorgesehen ist ein neues Kalorimeter — ein Spaghettikalorimeter. Dessen Name leitet sich von den in eine Bleimatrix eingelegten Szintillationsfasern her. Der Vorteil dieses Kalorimeters ist die doppelte Funktion der Fasern: Lichterzeugung und Lichtleitung. Gegenüber konventionellen Blei-Szintillator-Sandwichkalorimetern sind keine Wellenlängenschieberplatten, die Inhomogenitäten in der Struktur darstellen, zur Lichtleitung nötig.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Untersuchungen von Szintillationsfasern für ein solches Spaghettikalorimeter. Im 2. Kapitel werden zuerst einige Grundlagen der Kalorimetrie erläutert. Ebenso wird das bisherige Kalorimeter der rückwärtigen Region, sowie das geplante neue Kalorimeter vorgestellt. Das 3. Kapitel führt dann in die grundlegenden Eigenschaften der Szintillationsfasern ein. Das 4. Kapitel schildert die experimentelle Durchführung der eigenen Untersuchungen. Im 5. Kapitel werden schließlich deren Ergebnisse diskutiert. Der 6. und letzte Abschnitt stellt die Zusammenfassung dieser Arbeit dar.

Kapitel 2

Ein neues Kalorimeter für den H1-Detektor

Dieses Kapitel beschreibt nach einer Einführung in die Grundlagen der Kalorimetrie das gegenwärtige Kalorimeter der rückwärtigen Region des H1-Detektors. Danach wird eine verbesserte Lösung für diese rückwärtige Region vorgestellt — ein Spaghetti-Kalorimeter.

Der Schluß des Abschnitts schildert die Forderungen des Spaghettikalorimeters an die Szintillationsfasern.

2.1 Grundlagen der Kalorimetrie

Kalorimeter dienen in der Hochenergiephysik zur Messung von Teilchenenergien. Die jeweiligen Teilchen werden im Detektor absorbiert und geben dabei ihre Energie an das Detektormaterial ab, indem sie es anregen oder ionisieren. Zum Nachweis gebräuchliche sogenannte aktive Materialien setzen diese Energie dann in Ladungen oder Licht um. Die Ladungen werden gesammelt, bzw. das Licht wird mit Hilfe von Photodioden oder Photomultipliern in elektrische Pulse umgewandelt und verarbeitet.

Die Bedeutung von Kalorimetern zur Energiemessung hat mit der Bereitstellung von immer höheren Schwerpunktsenergien und damit nachzuweisenden Teilchenenergien stetig zugenommen. Denn gerade mit steigender Teilchenenergie nimmt die erreichbare Energieauflösung gemäß

$$\delta E/E = \sqrt{\frac{a^2}{E} + \frac{b^2}{E^2} + c^2}$$

zu. Die Parameter a, b und c seien kurz erklärt:

Parameter a beschreibt im wesentlichen die Fluktuationen der im Kalorimeter gemessenen Energie. Diese sind auf die Schwankungen der Schauerentwicklung zurückzuführen.

Parameter b wird durch das elektronische Rauschen bestimmt, dessen Größe unabhängig von der Energie ist.

Parameter c beinhaltet verschiedene energieabhängige Größen wie Energieverluste durch inaktives Material, Leckverluste und mangelnde Kalibration zwischen einzelnen Detektorkanälen.

Die Kalorimeter müssen zwei Hauptanforderungen genügen: Sie sollen erstens die gesamte nachzuweisende Energie absorbieren und zweitens eine möglichst genaue Absolutkalibration gewährleisten.

In der praktischen Anwendung sind zwei unterschiedliche Bauarten: das homogene Kalorimeter und das Sampling-Kalorimeter.

Homogene Kalorimeter bestehen aus einem Material, das zugleich Absorber und aktives Nachweismedium ist. Als Beispiel sei Bleiglas genannt; der hohe Bleianteil mit $Z = 82$ sorgt für die schnelle Energieabsorption und die Einbettung in Glas für die Entstehung und Weiterleitung von Čerenkov-Licht. Die Energieauflösung ist im wesentlichen durch Photoelektronenstatistik, Inhomogenitäten des Materials und transversale und longitudinale Leckverluste begrenzt.

In Sampling-Kalorimetern finden für jede Teilaufgabe unterschiedliche Materialien Verwendung. Als passive Absorber dienen z.B. Blei, Uran oder Eisen. Aktive Medien für die Signalbildung mittels Ladungen können der Halbleiter Silizium oder Flüssigkeiten oder Gase sein. Für die Signalbildung durch Licht werden in der Regel Plastikszintillatoren genutzt. Das Sampling-Kalorimeter registriert nur den Teil der im aktiven Nachweismedium deponierten Energie. Der Anteil der registrierten Energie an der insgesamt deponierten Energie wird Sampling-Fraction genannt. Durch die Statistik der Energieverteilung im Kalorimeter bedingt, begrenzen deshalb hauptsächlich die Sampling-Fluktuationen die Energieauflösung.

Das Prinzip der Energiedeposition

Hochenergetische Teilchen produzieren auf ihrem Weg durch Materie aufgrund ihrer Wechselwirkung sekundäre Teilchen, die ihrerseits bei ausreichend hoher Energie weitere Teilchen erzeugen können. So bildet sich insgesamt ein kaskadenartiger Schauer aus, der abbricht, sobald die produzierten Teilchen nicht mehr genug Energie haben, neue Teilchen zu erzeugen. Je nach Art der beteiligten Primärteilchen wird ein Schauer als elektromagnetisch oder hadronisch bezeichnet.

Elektromagnetische Schauer entwickeln sich durch Zusammenspiel der Prozesse Bremsstrahlung und Paarbildung. Ein primäres Elektron wird in Materie abgebremst und strahlt Photonen ab, diese konvertieren zu Elektron-Positron-Paaren, die geladenen Teilchen strahlen wieder neue Photonen ab, usw. Die Zahl der Teilchen steigt zunächst exponentiell mit der durchquerten Schichtdicke an, bis der Energieverlust durch Ionisation den durch Bremsstrahlung überwiegt und der Prozess allmählich zum Erliegen kommt. Dies geschieht bei einer als kritischen Energie

E_C bezeichneten, näherungsweise berechenbaren Schwelle [Per91]:

$$E_C \simeq 600 \text{ MeV}/Z.$$

Unterhalb dieser Schwelle läßt sich der mittlere Energieverlust dE/dx eines geladenen Teilchens durch die Bethe-Bloch-Formel [Per91] beschreiben:

$$dE/dx = \frac{4\pi N_0 z^2 e^4}{mv^2} \frac{Z}{A} \left[ln \left(\frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)} \right) - \beta^2 \right]$$

wo:

$$\begin{aligned} x &= \text{Dicke der durchquerten Schicht in [kg m}^{-2}] \\ m &= \text{Elektronenmasse} \\ z &= \text{Ladungen in Einheiten von } e \\ v &= \text{Geschwindigkeit des Teilchens} \\ \beta &= v/c \\ N_0 &= \text{Loschmidt-Avogadro-Zahl} \\ Z &= \text{Ordnungszahl der Atome des Materials} \\ A &= \text{Massenzahl der Atome des Materials} \\ I &= \text{effektives Ionisationspotential des Materials} \end{aligned}$$

Eine für die Charakterisierung der Schauerentwicklung wichtige Größe ist die materialabhängige Strahlungslänge X_0. Die Strahlungslänge ist diejenige Schichtdicke des Materials, die die Energie eines Elektrons oder Positrons durch Bremsstrahlung um den Faktor e reduziert. Es gilt:

$$E(x) = E_0 \exp(-x/X_0)$$

wo:

$$\begin{aligned} X_0 &= \text{Strahlungslänge} \\ x &= \text{durchquerte Schichtdicke} \\ E_0 &= \text{Anfangsenergie des Elektrons/Positrons} \\ E(x) &= \text{mittlere Energie des Elektrons/Positrons nach der Schichtdicke x} \end{aligned}$$

Nach [Seg65] gilt folgende Materialabhängigkeit für die Strahlungslänge:

$$1/X_0 = 4\alpha r_0^2 \rho \frac{N_0}{A} Z(Z+1) \ln(183/Z^{-1/3})$$

mit:

$$
\begin{array}{rcl}
\alpha & = & \text{Feinstrukturkonstante} \\
r_0 & = & \text{klassischer Elektronenradius} \\
\rho & = & \text{Dichte des Materials} \\
N_0 & = & \text{Loschmidt-Avogadro-Konstante} \\
Z & = & \text{Ordnungszahl der Atome des Materials} \\
A & = & \text{Massenzahl der Atome des Materials}
\end{array}
$$

Auch der Prozess der Paarbildung skaliert mit dieser Größe. Im Mittel legt ein Photon die Wegstrecke 9/7 X_0 zurück, bis es in ein Elektron-Positron-Paar konvertiert. Die mittlere Energiedeposition pro Strahlungslänge zeigt unabhängig vom Material ein charakteristisches longitudinales Profil wie in Abb. 2.1.

Abbildung 2.1: Longitudinale Verteilung der freigesetzten Energie bei einem durch ein primäres Elektron von 6 GeV ausgelösten Schauer [Bat70].

Eine charakteristische Größe für die transversale Ausdehnung des Schauers ist der Molière-Radius R_m [Mol47]. Er ist gegeben durch:

$$R_m = \frac{21.2\text{MeV}}{E_c} X_0$$

Nach [Bat70] wird 90% der Teilchenenergie in einem Zylinder um die Schauerachse mit Radius R_m deponiert, (siehe Abb. 2.2).

Abbildung 2.2: Transversale Verteilung der freigesetzten Energie bei einem durch ein primäres Elektron von 6 GeV Energie ausgelösten Schauer. Die horizontale Skala ist in Molière-Einheiten R_m angegeben; $R_m = 21(X_0/E_c)$ mit der Strahlungslänge X_0 und der kritischen Energie E_c in MeV [Bat70].

Ein hadronischer Schauer ist das Ergebnis einer inelastischen Wechselwirkung eines einfallenden hochenergetischen Hadrons mit einem Kern, wobei sekundäre Hadronen erzeugt werden, die wiederum tertiäre Hadronen erzeugen, usw.

Die auftretenden Prozesse sind wesentlich komplexer als die des elektromagnetischen Schauers. Der Maßstab für die longitudinale Ausdehnung eines hadronischen Schauers ist die durch die hadronische Wechselwirkungslänge Λ bestimmt. Für Blei ergibt sich z.B. ein Λ von 17.1 cm, was groß gegen die Strahlungslänge X_0 von 0.56 cm ist [Par92]. Hadronische Schauer haben damit wesentlich größere longitudinale und transversale Ausdehnungen als elektromagnetische Schauer.

Schauer, die durch Hadronen erzeugt werden, können auch einen elektromagnetischen Anteil haben. So zerfallen erzeugte neutrale Pionen in zwei Photonen, die ihrerseits einen elektromagnetischen Schauer verursachen. Je nach Anteil von geladenen und neutralen Pionen in einem hadronischen Schauer schwankt dieser elektromagnetische Anteil. Da ein Teil der Energie eines hadronische Schauer nicht nachweisbar ist (z.B. wegen Spaltung und Anregung von Kernen), liefert ein hadronischer Schauer kleinere Ausgangssignale des Kalorimeters als ein elektromagnetische Schauer gleichen Energiegehalts. Eine Verschlechterung der Energieauflösung für Hadronen durch Schwankungen des elektromagnetischen Anteils ist die Folge. Sogenannte kompensierende Kalorimeter liefern für hadronische und elektromagnetische Schauer gleichen Energiegehalts auch gleiche Ausgangssignale. Eine Möglichkeit zur Kompensation ist die Verwendung von Uran als Kalorimetermaterial, da sich hier Energieverlust und -gewinn bei Spaltung der Urankerne die Waage halten. Eine andere Methode ist die der unterschiedlichen Gewichtung von elektromagnetischer und hadronischer Komponente. Bei geeigneter Granularität des Kalorimeters läßt sich diese Gewichtung aufgrund unterschiedlicher Ausdehnung von elektromagnetischem und hadronischem Anteil durchführen.

2.2 Das gegenwärtige Kalorimeter

Der H1-Detektor ist in der rückwärtigen Region mit dem sogenannten Backward Electro-Magnetic Calorimeter, kurz BEMC, ausgestattet. Abbildung 2.3 zeigt den H1-Detektor und die Lage des BEMC.

Das gegenwärtige BEMC hat eine konventionelle Blei-Szintillator-Sandwich-Struktur mit einem runden Gesamtquerschnitt von 162 cm Durchmesser und einer Aussparung für das zentral liegende Strahlrohr, wie in Abb. 2.4. Es ist aus 88 zum Strahlrohr parallelen einzelnen Modulen mit 390 mm Länge aufgebaut. 56 der Module haben einen quadratischen Querschnitt von $160 * 160$ mm^2. Die restlichen Module haben trapezförmige oder dreieckige Querschnitte zur Anpassung an die runde Gesamtform. Jedes der Module besteht aus 50 je 4 mm dicken Plastikszintillatorplatten und 49 je 2.5 mm dicken Bleiplatten, die abwechselnd geschichtet sind. Alle Module sind seitlich mit Wellenlängenschieberplatten ausgestattet. Diese dienen einerseits der Sammlung des produzierten Szintillatorlichts und andererseits der Anpassung des Wellenlängenspektrums an die Strahlungsempfindlichkeit der auslesenden Siliziumphotodioden. Insgesamt gibt es 472 Auslesekanäle. Das Kalorimeter wird durch zwei unterschiedlich lange Typen der Wellenlängenschieberplatten unterteilt. Dadurch ist eine Unterstützung der Elektron-Hadron-Separation, sowie die Korrektur von Leckverlusten elektromagnetischer Schauer überdurchschnittlicher Länge möglich.

Im folgenden sind die wichtigsten Eigenschaften des gegenwärtigen BEMC aufgelistet [H1 92], [H1 93a,b]:

- Genauigkeit der Energiekalibration von 2% für elektromagnetische Schauer,
- Zeitauflösung besser als 96 ns,
- Ortsauflösung des Schauerschwerpunktes von 1.3 cm,
- Abdeckung eines Winkelbereichs von 155° bis 176° Grad gemessen an der Vorwärtsflugrichtung der Protonen,
- Signalinhomogenität von 10% nahe den Wellenlängenschiebern,
- Granularität von $16 * 16$ cm^2 bei 472 Auslesekanälen,
- Funktion bei einem longitudinalen Magnetfeld von 1.2 T,
- keine Detektion von minimal ionisierenden Teilchen (MIPs).

Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des H1-Detektors: (12) markiert die Lage des BEMC.

Abbildung 2.4: Ansicht des gegenwärtigen BEMC im Querschnitt. Die Wellenlängenschieber sind als kurze Linien angedeutet. In der Mitte befindet sich das Strahlrohr.

2.3 Eine verbesserte Lösung - ein Spaghettikalorimeter

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der rückwärtigen H1-Detektorregion bietet ein neues Kalorimeterkonzept — ein Spaghettikalorimeter. Dies Konzept soll zur Erweiterung der experimentellen Mittel folgenden Anforderungen genügen [H1 93b]:

- Energieauflösung $\delta E/E$ von 2% für Elektronen von 30 GeV,
- Genauigkeit der Absolutkalibration für elektromagnetische Schauer auf 0.5%,
- Zeitauflösung $\delta t/t \leq 1$ ns zur Unterdrückung von Hadronen aus Untergrundreaktionen,
- Molière-Radius von $R_m \leq 2$ cm, der Energieleckverluste speziell am Strahlrohr klein hält,
- Elektromagnetische Strahlungslänge von $X_0 = 1$ cm, für gute Schauerabsorption bei kleiner longitudinaler Schauerausdehnung,
- feine Granularität von $40 * 40$ mm^2 bei etwa 1300 Auslesekanälen in der elektromagnetischen Sektion zur Verbesserung der Winkelauflösung und der Elektron/Pion-Separation,
- Ortsauflösung des Schauerschwerpunktes von wenigen Millimetern,
- Wahrscheinlichkeit der Verwechselung von Pionen mit Elektronen bei Teilchenenergien über 3 GeV kleiner 1%,
- Messung von minimal ionisierenden Teilchen (MIPs) zur Untergrundidentifikation,
- Erschließung eines Winkelbereichs von 152° bis 178° Grad gemessen an der Vorwärtsflugrichtung der Protonen,
- geringe Signalinhomogenität von etwa 1% über die Modulgrenzen,
- Messung hadronischer Energie,
- Messung von minimal ionisierenden Teilchen (MIPs),
- Funktion bei einem longitudinalen Magnetfeld von 1.2 T.

2.4 Technische Ausführung

Die Idee des Spaghettikalorimeters, kurz SPACAL, wurde zuerst 1981 von D. Perrin und P. Sonderegger [Perr81] vorgeschlagen. Seitdem haben verschiedene Gruppen Prototypen mit eingelegten Szintillationsfasern parallel und senkrecht zur Richtung der eintreffenden Teilchen gebaut. Die ersten kompletten SPACALs wie beispielsweise am JETSET-Experiment [Her90] sind auch schon in Betrieb.

Beim hier beschriebenen SPACAL kommen parallel zum Primärstrahl eingelegte Fasern zur Anwendung. Das grundlegende Bauprinzip — Szintillationsfasern in Bleimatrix — läßt je nach Wahl des Blei-Faser-Volumenverhältnisses und der Faserdurchmesser eine Anpassung an verschiedene Zielsetzungen zu, z.B. Messung von elektromagnetischen oder hadronischen Schauern. Das geplante SPACAL wird deshalb auch örtlich in eine elektromagnetische und eine hadronische Sektion unterteilt, wie in Abbildung 2.5 ersichtlich.

Die hadronische Sektion hat die Tiefe einer hadronischen Wechselwirkungslänge. Dies entspricht bei einem Blei-Faser-Verhältnis von 4:1 und 1 mm dicken Fasern etwa 20 cm. Insgesamt wird die Sektion aus 136 Zellen — eine Zelle entspricht einem Auslesekanal — aufgebaut.

Auf die elektromagnetische Sektion sei im folgenden genauer eingegangen. Das favorisierte und technisch realisierbare Blei-Faser-Volumenverhältnis von R = 2:1 und der Faserdurchmesser von $d = 0.5$ mm, ergeben sich aus der Überlegung, daß R und d die Energieauflösung für elektromagnetische Schauer nach [RD91] beeinflussen, gemäß:

$$\delta E/E = 6.5\%\sqrt{Rd}/\sqrt{E}$$

Die geplante Länge von 25 cm entspricht auch hier einer hadronischen Abschwächungslänge Λ oder 27 Strahlungslängen X_0.

Die gesamte Struktur ist in etwa 1300 Zellen unterteilt. Jede Zelle ist einem auslesenden Photomultiplier zugeordnet (siehe Abb. 2.6). Je 16 Zellen sind in Modulen zusammengefaßt. Ein Modul ist aus 136 Bleiplatten und über 21000 Szintillationsfasern aufgebaut. Insgesamt werden für den elektromagnetischen Teil des SPACALs über 3 Millionen Fasern eingesetzt.

Die einzelnen Komponenten der elektromagnetischen Sektion werden in der logischen Reihenfolge vom Entstehungsort des Schauers bis zur optischen und elektronischen Auslese beschrieben:

- **Die Bleiplatten**. Verschiedene Techniken sind mit Hilfe von Industrieunternehmen getestet worden, um die Platten mit Rillen zu versehen, in die die Fasern eingelegt werden können. Bevorzugt wird ein Walzverfahren, das technisch und finanziell — es kann bei DESY selbst durchgeführt werden — die wohl beste Lösung darstellt. Das Rillenprofil wird bei diesem Verfahren einseitig in die Platten gewalzt, die anschließend auf eine Länge von 25 cm geschnitten werden. Abbildung 2.7 zeigt einen Querschnitt des Plattenprofils.

- **Die Szintillationsfasern** haben einen Durchmesser von 0.5 mm und eine Länge von 29.5 cm (25 cm in der Bleimatrix und 4.5 cm in der Bündelzone). Sie dienen einerseits der Erzeugung von Licht und andererseits der Leitung dieses Lichts zu den Photomultipliern. Den damit verbundenen Anforderungen an die Fasern wird wegen der Bedeutung für diese Arbeit ein eigener Abschnitt gewidmet.

- **Lichtmischer** aus Glas oder Plexiglas sitzen zwischen Bündelzone der Faser und den Photomultipliern. Sie sollen Licht, das aus Fasern von den verschiedenen Orten einer Zelle tritt, möglichst gleichmäßig über die Photokathode des jeweiligen Photomultipliers verteilen. Dies ist notwendig, da die Oberflächen der Photokathoden teilweise große Inhomogenitäten aufweisen. Verschiedene Formen und Größen der Lichtmischer werden in experimentellen Tests und Monte-Carlo-Simulationen untersucht.

- **Photomultiplier** mit einer hohen Verstärkung werden für die Auslese der relativ schwachen Lichtausbeute von etwa 2000 Photoelektronen pro GeV eines einfallenden Teilchens benötigt. Da das SPACAL einem Magnetfeld von 1.2 T ausgesetzt ist, scheiden konventionelle Bauweisen aus. Hamamatsu Photonics (Japan) bietet für die Anwendung in hohen Magnetfeldern Photomultiplier neuartiger Bauweise an. Die sogenannten Mesh-Dynode-PMTs beinhalten in einem evakuierten Glaskörper eine halbtransparente Bialkali-Photokathode, die von einer Reihe Dynoden gefolgt wird. Diese haben die Form von feinen parallelen Netzen. Verschiedene Untersuchungen wurden an diesem Photomultipliertyp durchgeführt, siehe [App93], [Bip93], [Fin90] und [Jan93].

  Der Spannungsteiler und die Signalformung werden von aufsteckbaren sogenannten Basen bewerkstelligt.

Weitere Systembestandteile des SPACALs, wie Signalverarbeitungselektronik und Datennahme sollen hier nicht vorgestellt werden.

Abbildung 2.5: Das geplante SPACAL im Längsschnitt.

Abbildung 2.6: Eine SPACAL-Zelle im Längsschnitt, unterteilt in die Abschnitte Kalorimeter (Blei-Faser-Matrix), Faserbündel, Lichtmischer, Photomultiplier und Spannungsteiler (Basis).

Abbildung 2.7: Das Rillenprofil der Bleiplatten. Die Platten werden so gestapelt, daß die Fasern äquidistante Abstände aufweisen.

2.5 Forderungen an die Szintillationsfasern

Mechanische Anforderungen: Die Fasern sollen in die Rillen der Bleiplatten eingelegt werden können ohne beim Stapeln der Platten beschädigt zu werden. Ihre Durchmesser dürfen also nicht die Rillentiefe von $0.54^{+0.02}_{-0}$ mm oder die Rillenbreite von $0.52^{+0.02}_{-0}$ mm überschreiten. Vom Hersteller der Fasern muß damit der angestrebte Durchmesser von 0.5 mm mit einer maximalen positiven Toleranz von 0.02 mm gewährleistet werden.

Desweiteren dürfen die gelieferten Fasern keine zu großen Biegungen aufweisen, da sonst die Einlegeprozedur per Hand oder per Automatik verhindert wird.

Optische Anforderungen: Schwankungen in der Lichtausbeute der Fasern bedeuten eine Verschlechterung der Energieauflösung des Kalorimeters bezüglich des energieunabhängigen Teils, konstanter Term genannt. Um eine hohe Energieauflösung zu erzielen, darf die Lichtausbeute weder von Faser zu Faser, noch innerhalb einer Faser abhängig vom Ort der Energiedeposition, stark schwanken. Schwankungen in der Lichtausbeute der Fasern am Ort des Schauermaximums von 10% um den Mittelwert, bedingen einen Beitrag zum konstanten Term von etwa 1%, [Walt93].

Licht, welches an verschiedenen Stellen entlang einer Faserachse erzeugt wird, muß verschieden lange Strecken zum auslesenden Photomultiplier zurücklegen, dabei wird es in der Faser abgeschwächt. Monte-Carlo-Simulationen zeigen [Walt93], daß Abschwächungslängen von mindestens 1 m — innerhalb einer Abschwächungslänge wird das Licht auf den $1/e$-Teil abgeschwächt — gefordert sind, soll der Beitrag zum konstanten Term kleiner als 1% bleiben.

Weiterhin soll das Emissionsspektrum der gewählten Fasern derart an die Strahlungsempfindlichkeit der Photokathoden der zu benutzenden Photomultiplier angepaßt sein, daß eine hohe Lichtausbeute resultiert.

Nicht zuletzt müssen die Fasern, was Lichtausbeute und Abschwächungslänge betrifft, so resistent gegen ionisierende Strahlung sein, daß das Spaghettikalorimeter den gestellten Anforderungen über Jahre hinaus genügt.

Kapitel 3

Szintillationsfasern

In diesem Kapitel werden grundlegende Eigenschaften der Szintillationsfasern erläutert. Zuerst sei jedoch eine Möglichkeit des Herstellungsprozesses bei der Bicron Cooperation vorgestellt, der in Abbildung 3.1 skizziert ist. Aus einer erhitzten Form wird die Faser gezogen und dann auf Rollen gespult oder in gerade Stücke geschnitten. Der Faserkern ist von einer dünnen Mantelschicht umgeben. Von Faserherstellern sind Fasern mit verschiedenen Längen und Durchmessern erhältlich.

Die Szintillationsfasern haben zwei wesentliche Funktionen zu erfüllen: Umwandlung der in ihnen deponierten Energie in meßbares Licht und Leitung des erzeugten Lichts zu einem Auslesesystem. Der folgende Abschnitt geht auf den Prozeß der Lichterzeugung ein. Danach werden Phänomene der Lichtleitung untersucht. Der letzten Abschnitt beschreibt die mögliche Schädigung von Szintillationsfasern, die als Folge von ionisierender Bestrahlung auftreten können.

3.1 Lichterzeugung

Ein Szintillator ist ein organisches oder anorganisches Material, das bei Anregung durch ionisierende Teilchen und Photonen die Lumineszenzerscheinungen Phosporeszenz und Fluoreszenz zeigt.

Fluoreszentes Licht wird bei dem direkten Strahlungsübergang von einem angeregten Energieniveau in den Grundzustand und deshalb mit kurzer Abklingzeit emittiert. Phosphoreszenzlicht tritt dagegen bei Übergang eines metastabilen Zustands über ein drittes Energieniveaus in den Grundzustand auf. Hier treten Abklingzeiten bis zu vielen Stunden auf. Der für kurze Lichtpulse bevorzugte Prozeß ist deshalb die Fluoreszenz, siehe Abb. 3.2.

Anorganische Szintillatoren sind Kristalle, die mit Aktivatorzentren dotiert sind. Ionisierende Teilchen erzeugen beim Durchqueren des Kristalls freie Elektronen und Löcher, die sich solange bewegen bis sie von solch einem Aktivatorzentrum eingefangen werden. Dieses wird dabei angeregt und zerfällt unter Emission eines

Abbildung 3.1: Skizze einer Faserzugstation [Hur90].

Abbildung 3.2: Zeitabhängigkeit der Lumineszenzlichtausbeute eines Szintillators: Fluoreszenz (fast component) und Phosphoreszenz (slow component) [Leo92].

Abbildung 3.3: Energieniveaus eines organischen Szintillators; links: Singlett- und Triplettzustände [Leo92], rechts: interatomares Potential als Funktion des interatomaren Abstands mit elektronischen und Vibrationszuständen [Gil92].

breiten Spektrums sichtbaren Lichts.

In Szintillationsfasern finden dagegen organische Plastikszintillatoren Verwendung. Der Mechanismus der Lichterzeugung ist hier kein Effekt des Gitters, sondern beruht auf Anregung von Molekülzuständen in aromatischen Kohlenwasserstoffverbindungen. Als Trägerstoff wird u.a. Polyvinyltoluol (PVT) oder Polystyrol (PST) benutzt, dem weitere Fluoreszenzstoffe in geringen Anteilen beigemischt sind.

Bei den Fluoreszenzstoffen ist jeweils ein Benzolring für den Fluoreszenzprozeß verantwortlich. Der Übergang zwischen dem ersten elektronisch angeregten Singlettzustand S^* des Π-Molekülorbitals des Benzols und Vibrationsniveaus des Grundzustands S_0 sorgt für die Aussendung von Photonen, (vgl. Abb.3.3). Sogenannte Primäradditive (z.B. PBD, p-Terphenyl, PBO) dienen der Erhöhung der intrinsischen Szintillatoreffizienz S. S bezeichnet den Anteil der deponierten Energie, der in Licht umgewandelt wird. Dabei findet ein strahlungsfreier Energietransfer nach dem Förstermechanismus [For60] durch Dipol-Dipol-Wechselwirkung vom Trägerstoff zum Primäradditiv statt. Dies fluoresziert dann anstelle des Trägerstoffs. Die Energietransferdistanz zwischen beiden Stoffen liegt in der Größenordnung von einigen Ångström.

Ein weiteres Additiv (z.B. POPOP, PPO, 3HF) sorgt für die Verschiebung des Emissionsspektrum zu längeren Wellenlängen. Das Primäradditiv emittiert UV-Photonen, die das Sekundäradditiv absorbiert und als Photonen längerer Wellenlänge abstrahlt. Die mittlere freie Wegstrecke der UV-Photonen liegt bei 100

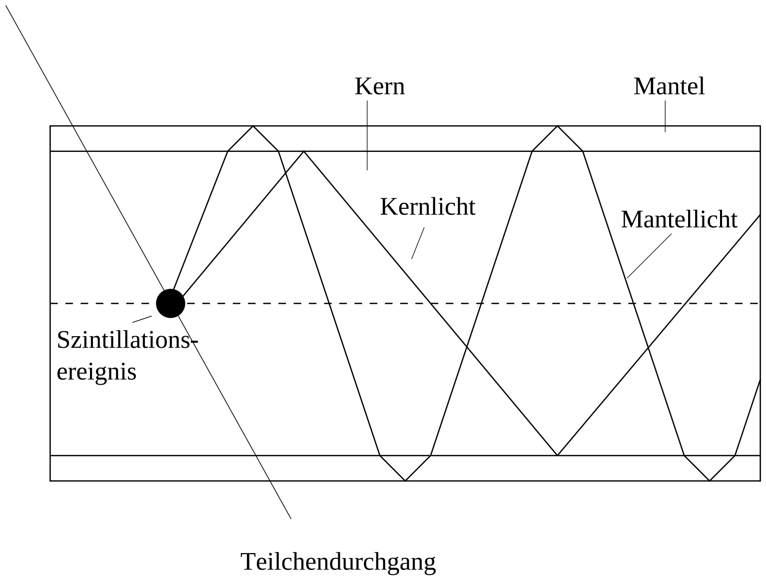

Abbildung 3.4: Längsschnitt einer Faser mit Kern- und Mantellicht.

bis 200 μm. Je nach Wahl des Sekundäradditivs wird das Emissionsspektrum vom Ultravioletten ins Blaue, Grüne oder sogar Rote verschoben. Die Überlappung von Emissionsspektrum und Absorptionsspektrum ist in einem derart zusammengesetzten System verkleinert. Die intrinsische Szintillatoreffiziens S wird dadurch nicht erhöht, wohl aber die effektive Lichtausbeute, da die Selbstabsorption des erzeugten Lichts im Trägerstoff reduziert wird. Das erzeugte Licht wird weniger abgeschwächt und so ist die Anzahl der auslesbaren Photonen größer.

3.2 Lichtleitung

Phänomene der Lichtleitung lassen sich mit Hilfe der geometrischen Strahlenoptik beschreiben, da die auftretenden Wellenlängen mit maximal etwa 700 nm klein gegen lineare Abmessungen in den Fasern sind. Die Manteldicke bei 0.5 mm dicken Bicron-Fasern beträgt z.B. 15 μm.

Das beim Szintillationsprozeß erzeugte Licht breitet sich vom Ort seiner Entstehung isotrop in alle Raumrichtungen aus. Es wird jedoch nur ein Bruchteil des gesamten Lichts in der Faser weitergeleitet. Man unterscheidet Kernlicht und Mantellicht. Kernlicht wird an der Grenzfläche von Kern und Mantel, Mantellicht an der Grenzfläche von Mantel und Umgebung der Faser totalreflektiert (vergleiche Abb.: 3.4). Nach einer Rechnung von Heinlein [Hei85] ergibt sich für den Raumwinkelanteil des in Abhängigkeit von den auftretenden Brechungsindizes in eine

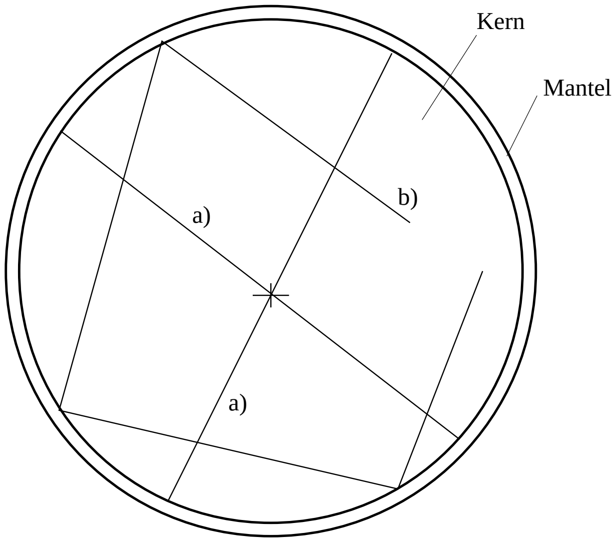

Abbildung 3.5: Querschnitt einer Faser mit zwei Meridionalstrahlen a) und schiefem Strahl b).

Richtung geleiteten Kernlichts:

$$\frac{\Omega}{4\pi} \approx \frac{1}{4}\left(1 - \frac{n_K^2}{n_M^2}\right)$$

mit:

$$\begin{aligned} \Omega &= \text{Raumwinkel der Totalrelexion für eine Faserrichtung} \\ 4\pi &= \text{gesamter Raumwinkel} \\ n_K &= \text{Brechungsindex des Kernmaterials} \\ n_M &= \text{Brechungsindex des Mantelmaterials} \end{aligned}$$

Typische Werte sind z.B.: $n_K = 1.60$, $n_M = 1.49$ für Bicron-Fasern [Bic92]. Hier stehen also nur 3.3% des produzierten Lichts als Kernlicht für die Auslese zur Verfügung.

Je nach geometrisch-optischer Beschreibung spricht man von Meridionalstrahlen oder schiefen Strahlen. Meridionalstrahlen breiten sich jeweils in einer Ebene aus, die die Faserachse enthält. Schiefe Strahlen verlaufen dagegen abschnittsweise zwischen zwei aufeinanderfolgende Totalreflexionen windschief zur Faserachse; siehe Abbildung 3.5.

Auf dem Weg zur Auslese erleidet das Licht durch verschiedene Effekte eine Abschwächung. Zunächst sei die Abschwächung der Lichtstrahlen durch Reflexionsverluste an den nicht idealen Grenzschichten genannt. Besonders das Mantellicht

Abbildung 3.6: Absorptionsspektrum (relat. Einheiten) von Polystyrol, gemessen nach Durchgang von Licht durch eine 1 m lange Faser, nach [Bro91].

wird durch Einflüsse wie Kratzer und Verunreinigungen auf der Manteloberfläche abgeschwächt. In Kapitel 5.1.3 dieser Arbeit wird dies näher untersucht. Aber auch das Kernlicht verliert pro Reflexion einen Bruchteil seiner Intensität. Insgesamt macht sich dieser Effekt nach vielen Reflexionen in einem Rückgang der Lichtintensität bemerkbar. Je dünner eine Faser ist, desto mehr Reflexionen treten auf und desto stärker ist der Effekt.

Die Abschwächung des Lichtes ist also eine Funktion des zurückgelegten Weges. Man definiert daher auch die sogenannte Abschwächungslänge λ_{att} , die die Wegstrecke angibt nach der die ursprüngliche Lichtintensität auf den $1/e$-ten Teil abgenommen hat:

$$\begin{aligned} \lambda_{att} &= \frac{-x}{\ln I/I_0} \\ \Rightarrow I(x) &= I_0 * \exp\left(\frac{-x}{\lambda_{att}}\right) \end{aligned}$$

mit:

$$\begin{aligned} \lambda_{att} &= \text{Abschwächungslänge} \\ x &= \text{vom Licht zurückgelegter Weg} \\ I_0 &= \text{ursprüngliche Intensität des Lichts bei } x = 0 \\ I(x) &= \text{Intensität des Lichtes bei } x \end{aligned}$$

Eine weitere Abschwächung erfährt das Licht durch Selbstabsorption im Fasermaterial. Das Absorptionsspektrum von dem zur Faserherstellung häufig eingesetzten Polystyrol zeigt Abbildung 3.6. Hieraus ist auf eine wellenlängenabhängige Abschwächungslänge zu schließen.

[Amo90] weist darauf hin, daß die effektive Abschwächungslänge, d.h. die über alle Wellenlängen gemittelte meßbare Abschwächungslänge, vom verwendeten Auslesesystem abhängt. Mit anderen Worten, die gleiche Faser hat, mit verschiedenen Auslesesystemen gemessen, auch verschiedene effektive Abschwächungslängen. Dies ist auf die unterschiedliche wellenlängenabhängige Strahlensensitivität der Systeme zurückzuführen.

Bei der experimentellen Bestimmung einer effektiven Abschwächungslänge wird die betreffende Faser zum Szintillieren angeregt und die Lichtausbeuten als Funktion der Entfernung des Anregungsortes vom Auslesesystem gemessen. Verschiedene Autoren [Amo90], [Kur93], [Haw90] haben gezeigt, daß die entstehenden Abschwächungskurven nur abschnittsweise mit einfachen Exponentialfunktionen zur Bestimmung der effektiven Abschwächungslänge gefittet werden können. Kurze Faserabschnitte unter etwa 1 m Länge weisen danach kurze Abschwächungslängen und lange Faserabschnitte, die weiter als 1 m vom Auslesesystem entfernt sind, lange Abschwächungslängen auf.

3.3 Strahlenschäden

In einer strahlenbelasteten Umgebung können Strahlenschäden auftreten, die die Lebensdauer von Detektoren begrenzen.

Bei der Verwendung von Plastikszintillatoren sind weniger die allgemein gut bekannten mechanischen Strahlenschäden kritisch, wie Kettenbrüche und Vernetzungen der Polymermoleküle, sondern die optischen Strahlenschäden. Diese können schon bei Strahlendosen unter 10 kGy enstehen.

Die optischen Strahlenschäden wirken sich nach Zorn [Zor93] in zweierlei Weise aus:

- Verstärkte Absorption des erzeugten Szintillationslichts
- Verringerung der intrinsischen Lichtausbeute

Beide Komponenten lassen sich nach [Gil93] mit der strahleninduzierten Entstehung von Ionenradikalen erklären. Wegen der Verfärbung des Szintillatorträgermaterials werden sie auch Farbzentren genannt. Die Farbzentren absorbieren primäre UV-Photonen und Teile des erzeugten Lichts. Die Absorption ist stark wellenlängenabhängig und nimmt vom blauen zum roten Bereich des Spektrums ab.

Es gibt permanente und reversible Strahlenschäden. Nach einer abgeschlossenen Strahlenbelastung kann das Ausmaß der Strahlenschäden aufgrund der begrenzten Beweglichkeit der entstandenen Reaktionsprodukte zunächst zunehmen [Joh93], später jedoch ein Erholungsprozeß in dem geschädigten Material einsetzen. Gillen [Gil93] und Wallace [Wal93] weisen auf zwei Mechanismen hin. Zum einen kann Sauerstoff, der in das Szintillatormaterial diffundiert, strahleninduzierte

Radikale binden und so unschädlich machen. Zum anderen können diese Radikale rekombinieren und dadurch ebenfalls unwirksam werden.

Sauerstoffdiffusion ist nach Meinung von Zorn [Zor93] jedoch der wichtigere Beitrag zur Erholung von bestrahltem Szintillatormaterial, da er wesentlich schneller vonstatten geht. Allerdings kann Sauerstoff bei Anwesenheit während der Bestrahlung durch Bildung von Sauerstoffradikalen selbst zur Schädigung beitragen.

Außer den aufgeführten Effekten sind noch weitere Faktoren für die Komplexität von Strahlenschädigung und Erholungsprozeß verantwortlich. Proudfoot [Pro93] nennt z.B. Strahlendosis, Strahlendosisrate, Zeit ,Temperatur, Permeabilität, Atmosphäre während und nach Bestrahlung und Oberflächen-Volumen-Verhältnis des bestrahlten Materials.

Kapitel 4

Experimentelle Durchführung

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit läßt sich in drei Bereiche einteilen:

1. Vergleich kommerziell erhältlicher Fasern verschiedener Herstellerfirmen hinsichtlich ihrer Verwendungsmöglichkeit im geplanten Spaghettikalorimeter. Vergleichskriterien sind Lichtausbeute, Abschwächungslänge und Strahlenhärte.

2. Untersuchung von Maßnahmen zur möglichen Verbesserung der optischen Fasereigenschaften wie Benutzung von Filtern, Verspiegelung der Faserfrontenden und Auskoppelung von Mantellicht.

3. Untersuchung von möglichen Problemen bei der Verwendung der Fasern im Kalorimeter: Lichtverlust durch gekrümmte Fasern, Klebstoff auf der Faseroberfläche, Schwankungen der Lichtausbeute innerhalb einer Fasersorte, Schwankungen der Faserdicken, mechanische Unregelmäßigkeiten und Verhalten der Fasern nach Bestrahlungen (speziell bei unterschiedlichen Faserumgebungen, z.B. Luft und Klebstoff).

Um diese Aufgaben erfüllen zu können, bedurfte es einer ausreichend genauen Mikrometerschraube für die mechanische Dickenmessung und einer Meßapparatur für die optischen Messungen. Diese Meßapparatur mußte zur Vermeidung von Fremdlicht lichtdicht sein. Um eine Faser an verschiedenen Stellen entlang der Faserachse anregen zu können, wurde eine auf einem fahrbaren Schlitten montierte radioaktive Quelle eingesetzt. Das von der Faser erzeugte Licht wurde mit dem gleichen Photomultipliertyp, der auch im geplanten Kalorimeter Verwendung finden soll, ausgelesen. Dies gewährleistet eine Übertragbarkeit der Meßergebnisse auf die spätere Praxis.

Die Untersuchung der Bestrahlungsfolgen auf die Fasern wurde sowohl mit einzelnen Fasern, als auch mit Blei-Faser-Modulen unternommen, die Praxisnähe und verschiedene Faserumgebungen (Luft, Klebstoff, Argon) ermöglichen.

4.1 Messung einzelner Fasern

4.1.1 Faserdickenmessung

Es wurden die Faserdicken gemessen, um deren Schwankungen, die Schwankungen in der Energiedeposition und damit auch in der Lichtausbeute zur Folge haben, zu bestimmen. Ebenfalls sollten eventuelle Überschreitungen der oberen Toleranzgrenze von 0.520 mm (vorgegeben durch die Rillenbreite der im Kalorimeter zu benutzenden Bleiprofile) aufgedeckt werden.

Die Faserdicken wurden mit einer Mikrometerschraube[1] gemessen. Durch die Messung vieler Positionen entlang der Faserstücke wurde ein mittlerer Faserdurchmesser und dessen Schwankung bestimmt. Um eine Abweichung des Faserquerschnitts von der idealen Kreisfläche festzustellen, wurde jede Positions zweimal gemessen. Der zweite Querschnitt war dabei um 90° Grad zum ersten verdreht.

Während der Messungen wurde noch auf Unregelmäßigkeiten wie etwa Verdickungen geachtet.

4.1.2 Präparation und Verspiegelung der Fasern

Für die optischen Messungen mußte ein geeignet langes Faserstück vorbereitet werden. Da die von den Herstellerfirmen gelieferten Faserstücke keine exakten Faserendflächen besitzen, mußte zunächst mit einer Schneidevorrichtung eine möglichst saubere Faserendfläche erstellt werden, die als Lichtausleseende dienen konnte. Im folgenden sei diese Schneidevorrichtung (siehe Abb. 4.1) kurz erklärt.

Hauptelement der Vorrichtung ist eine Rasierklinge, die auf eine Plexiglasplatte geklebt ist. Die Schnittkante ragt einige Millimeter über die Platte hinaus. Eine weitere Plexiglasplatte weist mehrere Bohrungen auf, von denen eine die jeweils zu schneidende Faser paßgenau aufnimmt. Auf diese Trägerplatte sind außerdem zwei Plexiglasböcke geklebt. Der erste dient zur seitlichen Führung der Platte mit der Rasierklinge beim Schneidevorgang. Der zweite hebt die Platte mit der Klinge so an, daß die Schnittkante der Klinge auf der Oberfläche der Trägerplatte anliegt. Wird die Platte mit der Rasierklinge nun über das Loch mit der darin steckenden Faser geführt, erhält man saubere Schnitte wie in Abb.4.2, die noch unter einem Mikroskop[2] kontrolliert werden. Versuche, mit Hilfe von feinem Sandpapier gute Faserendflächen herzustellen, sind weniger erfolgreich gewesen.

Nachdem eine Faser eine saubere Endfläche bekommen hatte, wurde sie an der anderen Seite mit einem Skalpell auf eine Länge von 27 cm geschnitten. Auf dieses Frontende wurde mit einem feinen Pinsel wasserlösliche schwarze Farbe aufgebracht, um bei den optischen Versuchen Rückreflexion von Licht in der Faser zu

[1] Mitotoyo Bügelmeßschraube, 6-stellige Digitalanzeige, Meßbereich 0-25 mm, Auflösung und Meßfehler 0.001 mm

[2] Leitz Stereotubus-ES, Vergrößerungsfaktor 62.5

Abbildung 4.1: Schneidevorrichtung für die Faserausleseenden.

Abbildung 4.2: Erstellte Faserschnittflächen, ca. 30-fach vergrößert.

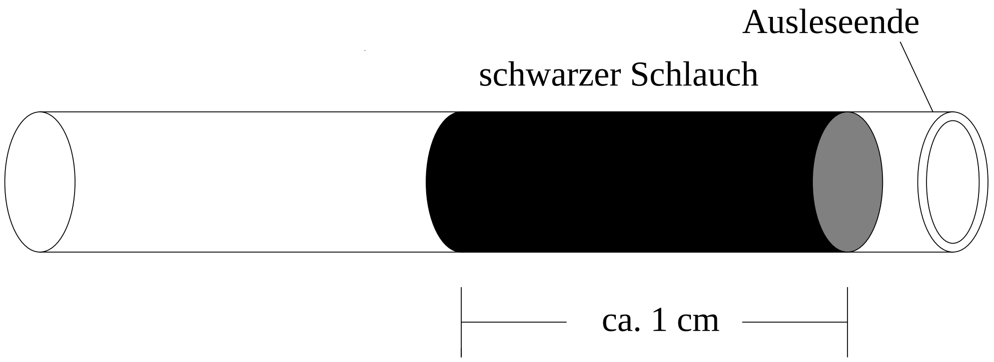

Abbildung 4.3: Schlauchförmige Schwärzung der Faseroberfläche dicht am Ausleseende zur Auskopplung des Mantellichts.

verhindern. Sollte nur das Kernlicht gemessen werden, mußte auch die Faseroberfläche am Ausleseende etwa 1 cm lang schlauchförmig geschwärzt werden (siehe Abb. 4.3). Das diente der Auskoppelung von Mantellicht.

Verspiegelung

Sollte die Faserfrontfläche verspiegelt werden, mußte auch sie möglichst fehlerfrei sein. Zu diesem Zweck wurden einige hundert Fasern in einer Halterung hexagonal dicht gebündelt und anschließend in der mechanischen Werkstatt geschliffen. Die geschliffenen Fasern verblieben in der Halterung (siehe Abb. 4.4) und erhielten so mittels Aluminisierungsverfahren[3] ein stabiles verspiegeltes Faserfrontende.

Erst nach der Verspiegelung erhalten die Fasern wie oben beschrieben einzeln einen Schnitt, der dem Lichtaustritt dient.

4.1.3 Meßapparatur und Meßverfahren der optischen Fasereigenschaften

Zur Bestimmung von Lichtausbeute und Abschwächungslänge einer Faser ist die Meßapparatur in einem quaderförmigen Kasten aus Aluminium lichtdicht untergebracht. Seine Außenmaße betragen $855*255*200$ mm^3, die Wandstärken 2 mm bis auf die der Bodenplatte mit 5 mm. Außer dem abnehmbaren Deckel sind alle Seiten verschraubt und innen mit schwarzer Farbe abgedichtet. Während einer Messung war der Deckel geschlossen und zusätzlich der Kasten mit einem schwarzem Tuch abgedeckt.

Innerhalb des Kastens sind in einem Abstand von 280 mm zwei Profile an die Bodenplatte geschraubt. Sie halten einen schmalen Aluminiumträger ($470 * 30 * 8$ mm^3), 65 mm parallel über der Bodenplatte. Der Träger ist auf beide Profile

[3] Firma Möller (Wedel) oder Sternwarte Bergedorf

Abbildung 4.4: Faserhalterung für Schleif- und Verspiegelungszwecke.

gelegt und einerseits mit Doppelklebeband, andererseits mit zwei Madenschrauben fixiert. Dies bietet schnelle Ausbau- und Justiermöglichkeit.

Der Träger hat die Funktion einer optischen Bank. An einem Ende befindet sich darauf ein Rohr mit 165 mm Länge und 30 mm Durchmesser, in dem sich das optische Auslesesystem (siehe Abb.4.5) befindet. Hauptelement ist ein Photomultiplier der Fine-Mesh-Bauweise von Hamamatsu[4], wie er auch im geplanten Kalorimeter Verwendung findet. Der Photomultiplier hat eine Länge von 47 mm und einen Durchmesser von 26 mm. Ein Spannungsteiler, Basis genannt, ist am Ende aufgesteckt. Von der Basis führen zwei Koaxialkabel über Steckkontakte aus dem Kasten heraus. Das Hochspannungskabel wird von einer Hochspannungsquelle[5] mit $U = 2000$ V gespeist. Das Signalkabel führt über einen parallelen Eingangskondensator mit $C = 20$ nF zur Dämpfung von Stromschwankungen in ein empfindliches Strommeßgerät[6], daß nach dem Elektrometerprinzip arbeitet. An das Lichteinlaßfenster des Photomultipliers ist mit optischem Fett[7] ein Lichtmischer aus Plexiglas gekoppelt. Dieser hat einen quadratischen Querschnitt von 15 mm Kantenlänge und eine Gesamtlänge von 40 mm. Der Mischer macht das Ausgangssignal des Photomultiplier unabhängig vom Eintreffort des Lichtes auf das Auslesesystem. Der Mischer ragt 20 mm nach vorne aus dem Rohr heraus. Bis auf ein Fenster

[4] Hamamatsu, Type R5506, No. WA0004, $1''$-Kathode

[5] Le Croy HV 4032

[6] Keitley 610C solid state electrometer

[7] Dow corning Q2-3067, optical couplant

Abbildung 4.5: Optisches Auslesesystem mit Photomultiplier, Lichtmischer und Filtern.

von 2 mm Durchmesser, das zum Einkoppeln des Faserlichtes per Luftspalt von weniger als 0.1 mm dient, ist der Lichtmischer gegen Streulicht mit einer Maske aus Papier abgeschirmt.

Der Photomultiplier kann durch das hintere Ende des Rohres herausgezogen werden, so daß optional runde Glasfilter[8] mit 26 mm Durchmesser und 2 mm Dicke zwischen Lichtmischer und Photomultiplier mittels optischem Fett eingesetzt werden können.

Der freie Platz auf der Trägerplatte vor dem Rohr mit dem Auslesesystem wird von einem 260 mm langen Messingblock mit quadratischem Querschnitt von 15 mm Kantenlänge beansprucht. In einer auf der Oberseite eingesägten Rille, Tiefe 0.2 mm und Breite 0.5 mm, liegt die zu messende Faser. Für gute Planlage sorgen in jeweils 20-30 mm Abstand mehrere senkrecht zur Faser gespannte dünne Fäden, die an den Block geklebt sind. Der Messingblock läßt sich frei bewegen, so daß das Ausleseende der Faser, die etwa 10 mm über den Block hinaus ragt, vor den Lichtmischer geschoben werden kann. Eine seitliche Führung auf der Trägerplatte mittels aufgeklebten Anschlagblöcken erleichtert die Feinjustierung.

Um die Faser an verschiedenen Stellen entlang der Faserachse anregen zu können, wird eine auf einem fahrbaren Schlitten montierte radioaktive β-Quelle[9] benutzt. Ein Ausleger des Schlittens hält die 22 mm lange und 15 mm breite

[8] Schott GG 375, 400, 435, 455

[9] Sr-90, $E_{max} = 2.3$ MeV, Aktivität = 2.05 MBq, $T_{1/2} = 28.5$ a

Abbildung 4.6: Detailansicht des Schlittens zur Positionierung der β-Quelle über der Faser. Der Messingblock mit einer eingelegten Faser ist ebenfalls teilweise abgebildet.

Quellenkapsel in einem 1.5 mm konstantem Abstand mit einer Genauigkeit von 0.1 mm zur Faseroberfläche (siehe Abb. 4.6). Die Quellenkapsel hat einen runden 6 mm breiten Kollimatorausgang und ist aus Strahlenschutzgründen auf dem Schlittenausleger teilweise mit Bleiplatten abgeschirmt.

Der Schlitten ist von außerhalb des Kastens mittels einer Gewindestange entlang der Faser verschiebbar. Seine Position läßt sich anhand einer Meßstange, die mit ihm bewegt wird, ebenfalls außerhalb des Kastens, ermitteln.

Das Meßverfahren wird im Gleichstrommodus durchgeführt, d.h. daß keine diskreten Ladungspulse gemessen, sondern die Ladungspulse aufgrund der Trägheit des Strommeßgeräts zu einem Gleichstrom gemittelt werden. Damit erhält man die gemessenen Lichtausbeuten nicht in der absoluten Einheit (Anzahl Photonen)/MeV, sondern in relativen Einheiten. Dies ist für die geschilderten Ziele ausreichend und bedeutet weniger Aufwand.

Gekrümmte Fasern

Um Lichtverluste in Faserkrümmungen festzustellen, wurde die Faser in einer kreisrunden Schleife verlegt, deren Krümmungsradius veränderbar war. Vor und hinter der Schleife wurde die Faser, wie bei der Messung gerader Fasern, in die Rille des Messingblocks gelegt.

Der Abstand des Schleifenfußpunktes zum Ausleseende der Faser war bei jeder

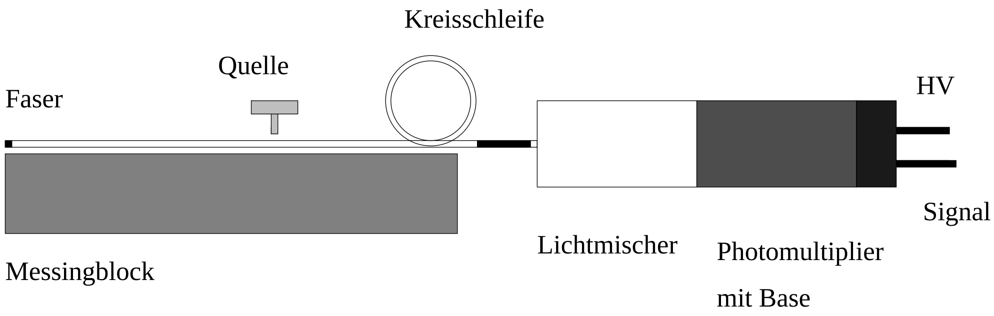

Abbildung 4.7: Verlegung der Faser in einer kreisrunden Schleife.

Messung konstant 28 mm. Eine Anregung durch die β-Quelle erfolgte jeweils an der gleichen Stelle der Faser vor der Schleife, so daß das Licht immer einen Weg von 240 mm zum Ausleseende zurückzulegen hatte. Abbildung 4.7 zeigt eine Skizze des Aufbaus.

4.2 Messungen an Kleinmodulen

Es sollten Strahlenschäden von Blei-Faser-Modulen untersucht werden. Insbesondere interessierte hier, ob die Verwendung oder Nichtverwendung von Klebstoff beim Einbau der Fasern unterschiedliche Folgen zeigt. Desweiteren sollten dabei blaue und grüne Fasern verglichen werden.

4.2.1 Die Kleinmodule

Es wurden vier Kleinmodule hergestellt, die jeweils aus 10 Lagen Blei und 100 0.5 mm dicken Fasern aufgebaut sind. Die Module haben eine Länge von 100 mm und einen quadratischen Querschnitt mit 10 mm Kantenlänge. Zwei der Module haben mit Ruß geschwärztem Epoxidklebstoff[10] eingeklebte Fasern. Die beiden anderen Module sind dagegen nicht geklebt, sondern nur zur Stabilisierung mit Klebeband umwickelt. Geklebte und nicht geklebte Module sind jeweils einmal mit blauen Bicron BCF-12 und grünen Bicron BCF-20 bestückt. Um etwaige Schwankungen der Meßapparatur aufzudecken und eine Fehlerabschätzung durchführen zu können, wurde noch ein Referenzmodul gebaut, welches nicht bestrahlt wurde. Dies besteht aus einer Lage 1 mm dicker, blauer Fasern (Kuraray SCSF-81), die mit Klebeband auf ein 100 mm langes, 13 mm breites und 3 mm dickes Aluprofil geklebt sind. Abbildung 4.8 zeigt die 4 Kleinmodule und das Referenzmodul.

[10] Hersteller: Grace Electronics Materials, Produktbezeichnung: Stycast 1264 Part A, B

Abbildung 4.8: Die Kleinmodule und das Referenzmodul.

4.2.2 Meßapparatur und Meßverfahren

Um Abschwächungslängen zu messen, sind die Module zu kurz. Stattdessen wurden sie nur am Frontende mit Elektronen beschossen, um die Fasern zum Szintillieren zu bringen. Dafür wurde die Meßapparatur verwendet, die auch für die optischen Einzelfasermessungen zum Einsatz gekommen war (siehe Kapitel 4.1.3). Der Schlitten der sonst die β-Quelle über die Faser fährt, wurde nicht benutzt. An seine Stelle trat bei der Messung der Modullichtausbeute eine einfache Halterung. Sie positioniert einerseits den Kollimatorausgang der β-Quelle mittig vor das Frontende des Moduls, andererseits dessen Ausleseende vor den Lichtmischereingang. Das Papierfenster vor dem Lichtmischer wurde für diese Messung entfernt.

Auch hier wurde im Gleichstrommodus gemessen.

4.3 Messungen an Einschichtmodulen

Mit Hilfe von Einschichtmodulen sollte die Auswirkung von Strahlung auf Lichtausbeuten und Lichtabschwächung bei verschiedenen Bauweisen der Module getestet werden. Es interessiert dabei der Einfluß verschiedener Faserumgebungen, wie zwei verschiedene Klebstoffe, Argon als sauerstoffreie Atmosphäre und Luft.

4.3.1 Die Einschichtmodule

Es wurden 4 Einschichtmodule gebaut, die jeweils aus einer Lage Blei und 16 eingelegten Szintillationsfasern Bicron BCF-12 mit dem Durchmesser von je 0.5 mm bestehen. Um Abschwächungslängen messen zu können, haben die Module eine Länge von 250 mm; Breite und Höhe betragen 15 mm und 5 mm. Zur Stabilisierung liegt die Bleilage auf einer Aluminiumplatte mit den Abmessungen $250{*}15{*}4$ mm^3. Zur vollständigen Einbettung der Fasern ist das Modul oberhalb von einer 0.05 mm dicken Messingfolie bedeckt.

Bei zwei Modulen werden die Fasern mit Klebstoff — Epoxidkleber[11] und Polyesterkleber[12] — in den Rillen der Bleiplatten fixiert. In die anderen zwei Module sind die Fasern nur eingelegt worden. Die Stabilisierung der Module erfolgt hier mit Klebefilm, der die Module an den Seiten umschließt und die Fasern nicht berührt.

Außer während der Meßzeiten von einigen Stunden befand sich eins dieser ohne Klebstoff gebauten Module in einer gasdicht verschweißten Plastikhülle. Diese Hülle war mit Argon aus einer Druckgasflasche gefüllt, damit die Fasern sich in der sauerstofffreien Argonatmosphäre befinden.

Alle Fasern haben etwa 1 cm lang mit wasserlöslicher Farbe geschwärzte Faseroberflächen 1 mm vor dem Ausleseende der Module. Damit wurde garantiert, daß nur Kernlicht ausgelesen wurde. Die Ausleseenden der Fasern wurden mit der in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen Schnittvorrichtung erstellt.

4.3.2 DESY-Teststrahl 22

Lichtausbeuten und Abschwächungslängen der Einschichtmodule konnten nicht mit der sonst benutzten β-Quelle gemessen werden, da die β-Elektronen mit einer Energie von maximal 2.3 MeV durch Materialinhomogenitäten der Module zu unterschiedlich abgebremst worden wären. Deshalb wurde ein Elektronenstrahl mit höherer Teilchenenergie benötigt.

Eine Möglichkeit bietet der DESY-Teststrahl 22, (siehe Abb. 4.9), der Elektronen im Energiebereich von 1 bis 6 GeV zur Verfügung stellt. Dazu werden Elektronen des Synchrotrons DESY II mit einer Maximalenergie von 7.5 GeV in einer Vakuumkammer auf einen Kohlefaden als primäres Target geschossen. Die entstehenden Bremsstrahlungsphotonen gelangen durch ein tangential vom Synchrotron wegführendes Vakuumrohr zu einem sekundären Konversionstarget, wo schließlich der Elektronenteststrahl produziert wird. Als Konversionstarget wurde für die Messungen der Einschichtmodule aus mehreren Alternativen ein 3 mm dickes Kupfertarget ausgewählt. Mit einem steuerbaren Ablenkmagneten nach dem Target können die Elektronen impulsselektiert werden. Für die Modulmessungen wurden Elektronenenergien von 2.4 GeV benutzt, da dann die Elektronenraten für

[11] Hersteller: Grace Electronics Materials, Produktbezeichnung: Stycast 1264 Part A, B

[12] Hersteller: Stewa hobby GmbH, Produktbezeichnung: Relopal GK, Polyester Gießharz

Abbildung 4.9: Der DESY-Teststrahl 22 und seine Komponenten [Gen91]: V = Vetozähler, F = Fingerzähler, P = Szintillatorpaddel, AC = Luftkollimator, eVP = Vakuumrohr des Elektronenstrahls, VC = Vakuumkollimator, S = Schirmwand aus Stahlbeton, BM = Ablenkmagnet, CT = Konversionstarget, γVP = Vakuumrohr für Photonen.

kurze Meßzeiten noch hoch genug waren. Nachdem die impulsselektierten Elektronen das Strahlrohr durch eine abdichtende Kaptonfolie verlassen hatten, legten sie noch einige Meter in Luft zurück ehe sie die Module erreichten.

4.3.3 Meßaufbau und Meßverfahren

Während der Messungen befand sich jeweils eins der Module in einer Halterung, (vergl. Abb. 4.10), mit der sich die Längsseite des Moduls senkrecht zum Elektronenstrahl plazieren läßt. Die Fasern waren dabei übereinander angeordnet. Die Halterung besteht aus einem rechten Aluminiumwinkel der auf eine Plexiglasplatte mit den Abmessungen $500 * 45 * 20$ mm^3 montiert ist.

Außerdem liegt noch ein Rohr mit 175 mm Länge und 29 mm Durchmesser auf der Platte, welches das optische Auslesesystem enthält. Dies besteht aus einem Plexiglaslichtmischer der Länge 47 mm und dem quadratischen Querschnitt $20 * 20$ mm^2, wahlweise einem Glasfilter[13] und einem Photomultiplier der Fine-Mesh

[13] Schott GG 435

Abbildung 4.10: Einschichtmodulhalterung mit Auslesesystem und Wolframblock zur Elektronenstrahlaufschauerung.

Bauweise[14]. Eine Hochspannungsquelle[15] versorgt den Photomultiplier mit einer Spannung von 2000 Volt.

Um den Elektronenstrahl etwas aufzufächern und höhere Teilchenraten zu bekommen, wurde der Strahl durch ein Wolframblock mit 250 mm Länge, 45 mm Höhe und 15 mm Dicke aufgeschauert. Dieser Block stand auf der Plexiglasplatte, aus Strahlrichtung gesehen, direkt vor dem Aluminiumwinkel mit dem Modul.

Zwei schwarze Tücher hielten den beschriebenen Aufbau während der Messungen lichtdicht.

Meßverfahren: Mit einem fernsteuerbaren Fahrtisch konnte das Modul relativ zum Strahl verschoben werden, so daß die Fasern bei verschiedenen Distanzen zum Auslesesystem angeregt werden konnten. Die vom Photomultiplier erzeugten Ausgangspulse wurden von einem 12-Kanal Analog-Digital-Wandler[16] digitalisiert. Der AD-Wandler war dabei nur sensitiv, wenn die zur Strahldefinition als Trigger benutzten Szintillatorzähler ebenfalls Signale lieferten. Photomultiplier- und Triggersignale waren dafür in einer Koinzidenzeinheit zusammengeschaltet. Die vom AD-Wandler produzierten Daten wurden über eine Schnittstelle[17] in einen

[14] Hamamatsu, Type R5506, No. WA0052, $1''$-Kathode
[15] LeCroy HV 4032
[16] LeCroy, 12 Channel ADC 2249A
[17] Camac-Interface

Kleincomputer[18] eingelesen, wo dann der Mittelwert der Pulshöhenspektren berechnet wurde. Für einen sicheren Mittelwert wurden in jedem Fall mindestens 1000 Ereignisse gezählt — ein Ereignis bezeichnet einen verwertbaren Teilchendurchgang durch die Fasern. Die berechneten Mittelwerte der Pulshöhenspektren dienten somit als relative Einheiten der Lichtausbeuten.

4.4 Bestrahlungen

Um Fasern und Module zu bestrahlen, wurden zwei verschiedene Einrichtungen genutzt. Für die Bestrahlung der kompakten Kleinmodule stand für einmalige Nutzung der Linearbeschleuniger LINAC II auf dem DESY-Gelände zur Verfügung. Die Bestrahlung der Einzelfasern und der Einschichtmodule konnte dort aus Platzmangel nicht erfolgen. Stattdessen wurde eine Bestrahlungseinrichtung der GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH in Anspruch genommen.

4.4.1 Die Bestrahlung der einzelnen Fasern und der Einschichtmodule

Sowohl einzelne Faserstücke von etwa 300 mm Länge als auch die vier 250 mm langen Einschichtmodule wurden einer Gammastrahlung ausgesetzt, die von abgebrannten Kernbrennelementen freigesetzt wurde. Die Kernbrennelemente stammen aus einem Forschungsreaktor. Dieser FRG-1 genannte Reaktor wird von der Zentralabteilung Forschungsreaktoren der GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH als Kalte Neutronenquelle betrieben.

Die Kernbrennelemente werden in einem Abklingbecken unter Wasser zwischengelagert und dabei als Gammaquelle für Bestrahlungen genutzt. Die Bestrahlungsproben werden in einem Aluminiumrohr mit einem Innendurchmesser von 70 mm und einer nutzbaren Länge von etwa 500 mm untergebracht. Das Rohr wird dann an einem Seil in einen Zwischenraum von acht Brennelementen abgelassen. Es sollte eine möglichst homogene Bestrahlung der Proben über ihre Länge erreicht werden. Deshalb wurde mittels Distanzstücken aus Aluminium der Mittelpunkt der Proben im Rohr so gesetzt, daß dieser mit dem Ort des maximalen Strahlungsflusses der Gammaquanten aus den Brennelementen übereinstimmte.

Bei bekannter Dosisleistung $\dot{D}$, die von der Lagerzeit der Brennelemente im Abklingbecken abhängt und durchschnittlich bei etwa 2 kGy/h liegt, wird die nötige Verweildauer der Proben am Bestrahlungsort mittels $D/\dot{D}$ berechnet. D ist die gewünschte Dosis.

[18] Macintosh IIci

4.4.2 Die Bestrahlung der Kleinmodule

Aufgrund ihrer Kompaktheit können die Kleinmodule beim LINAC II am DESY bestrahlt werden. Der LINAC II ist ein Elektronen-Linearbeschleuniger der Primärelektronen bis zu 50 MeV beschleunigen kann. Diese Elektronen werden zumeist in weitere Beschleunigerringe am DESY eingespeist. Für kurze Zeit bestand jedoch die Möglichkeit, parasitär ein Experiment zur Produktion von Positronen zu nutzen.

Bei diesem Experiment wurden die beschleunigten Primärelektronen auf ein Konversionstarget geschossen, wobei Sekundärelektronen und -positronen und Gammaquanten entstanden. Ein Teil dieses Schauers konnte ohne Beeinflussung des Experiments zur Bestrahlung genutzt werden. In Targetnähe wurde eine Pappwand aufgestellt. Darauf wurden die Kleinmodule symmetrisch um eine Aussparung für das Strahlrohr verteilt.

Das Experiment zur Erzeugung von Sekundärpositronen dauerte etwa 30 Stunden. Die Strahlendosis D wurde mit Glasdosimetern[19] von der Strahlenschutzgruppe, DESY ermittelt. Sie betrug durchschnittlich 25 kGy. Daraus läßt sich eine Dosisleistung $\dot{D}$ von 0.83 kGy/h berechnen.

[19] RPL-Typ R1T

Kapitel 5

Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen sind in zwei Abschnitte unterteilt. Das Kapitel 5.1 zeigt die Ergebnisse mit einzelnen Fasern wie Faserdickenmessung und eine Reihe von optischen Messungen. Wegen der Wichtigkeit der optischen Einzelfasermessungen sind Reproduzierbarkeit und Meßfehler der optischen Meßapparatur ein eigenes Unterkapitel 5.1.2 gewidmet.

In Kapitel 5.2 werden die Ergebnisse der Bestrahlungen von einzelnen Fasern und von Klein- und Einschichtmodulen vorgestellt.

5.1 Ergebnisse mit einzelnen Fasern

5.1.1 Faserdickenmessungen

Um für die Verwendung im Spaghettikalorimeter eventuell nicht akzeptable geometrische Fasereigenschaften aufzudecken, wurden die Fasersorten Bicron BCF-12, Kuraray SCSF-76 und Polifi 0042-050 der drei Herstellerfirmen Bicron, Kuraray und Pol.hi.tech untersucht.

Es wurden stichprobenhaft die Dicken der Fasern gemessen und die Abweichungen der Faserquerschnitte von der Kreisform (Elliptizität) ermittelt. Die Elliptizität E an einer Meßposition ergab sich aus zwei zueinander senkrecht stehenden Faserdurchmessern a, b, gemäß:

$$E = \frac{|a-b|}{(a+b)/2}$$

Abbildung 5.1 zeigt die Faserdickenverteilung der drei Fasersorten in Form von Histogrammen. Mit Hilfe eines Gaußfits wurde jeweils die mittlere Faserdicke, sowie die Standardabweichung der Einzelmessung RMS bestimmt. In Tabelle 5.1.1 sind die Einzelheiten der Dickenmessung und die Ergebnisse der Elliptizitätsbestimmung aufgeführt.

Die Solldicke der Fasern wird von allen Fasern knapp unterschritten. Die Kuraray SCSF-76 weichen mit 2.6% am weitesten vom Soll ab, während Bicron BCF-12

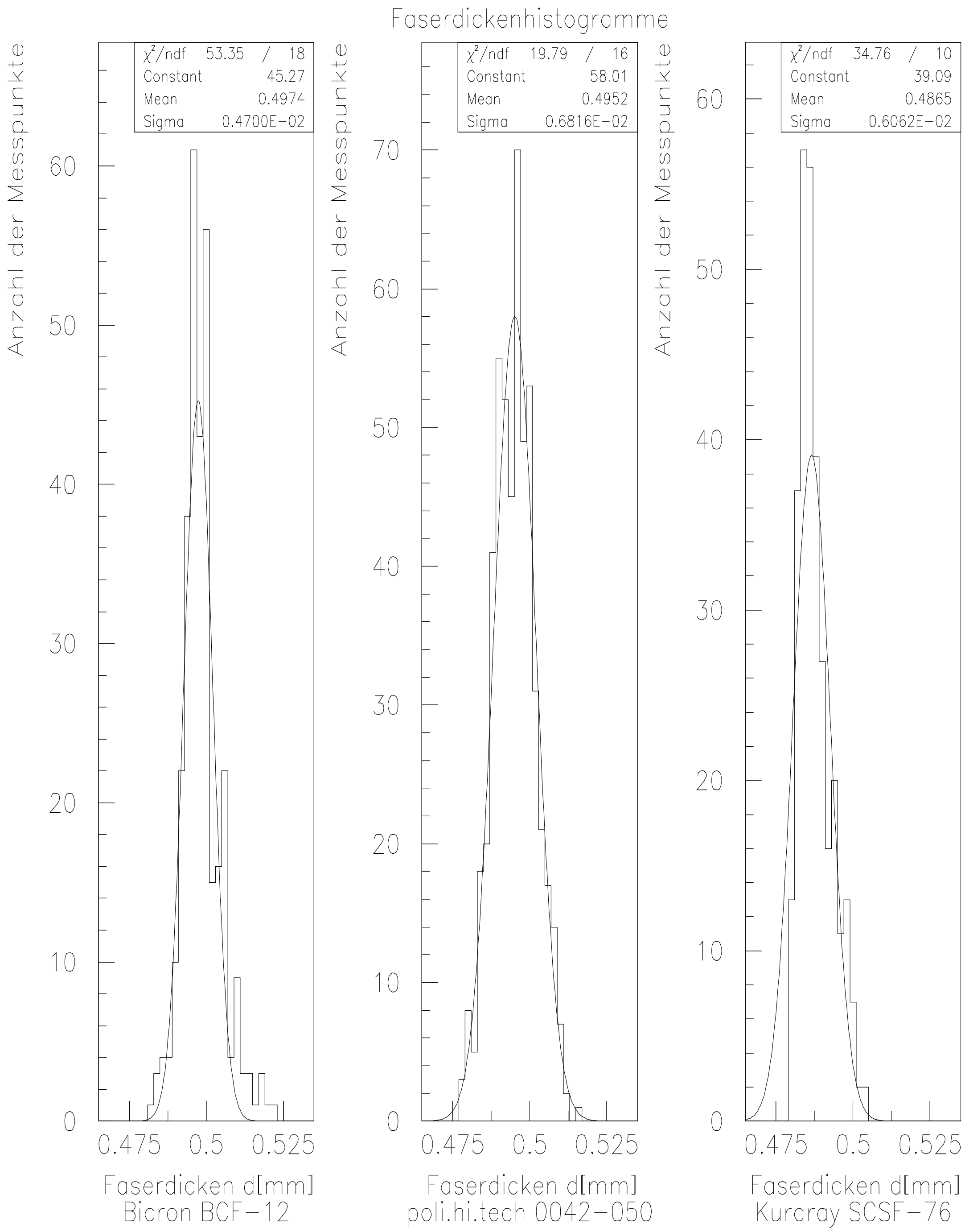

Abbildung 5.1: Histogramm der Faserdickenverteilung dreier Fasersorten

Fasersorte	Bicron BCF-12	Kuraray SCSF-76	Polifi 0042-050
gemessene Länge [m]	28	15	42
Dickenmessung			
Anzahl Meßpunkte	320	300	340
Solldicke [mm]	0.500	0.500	0.500
mittlere Dicke d_{mitt} [mm]	0.497	0.487	0.495
RMS %	0.9	1.2	1.4
max. Dicke d_{max} [mm]	0.522	0.503	0.509
min. Dicke d_{min} [mm]	0.482	0.479	0.482
Elliptizität			
Anzahl Meßpositionen	160	150	60
mittl. Elliptizität E_{mitt} %	0.73	1.41	0.87
max. Elliptizität E_{max} %	2.61	3.23	2.00

Tabelle 5.1: Faserdickenmessung und Elliptizitätsbestimmung, Elliptizität E wird bestimmt, gemäß: $E = |a - b|/(a + b)/2$, wo a und b zwei jeweils an einer Meßposition um 90° zueinander orientierte Faserdicken sind.

und Polifi 0042-050 nur um 0.6% bzw. 1.0% darunter bleiben. Die Dickenvariation, ausgedrückt durch die Standardabweichung der Einzelwerte RMS, ist mit maximal 1.4% (Polifi) noch deutlich unter der 2%-Grenze, die die Herstellerfirma Bicron [Bic92] für ihre Fasern garantiert. Alle gemessenen maximalen Dicken bleiben mit Ausnahme eines einzelnen Meßwertes (Bicron BCF-12: $d_{max} = 0.522$ mm) unter der geforderten positiven Toleranz von 0.520 mm (vorgegeben durch die Rillenbreite in den Bleiplatten).

Die Abweichung der Faserquerschnitte von der Kreisfläche (Elliptizität E) ist mit dem mittleren Wert von 1.41% und dem maximalen von 3.23% für die Kuraray SCSF-76 noch akzeptabel. Bicron- und Pol.hi.tech-Fasern zeigen noch niedrigere Werte (E_{mitt}/E_{max}: 0.73%/2.61% und 0.87%/2.00%).

Während der Messungen wurde noch auf mögliche Anomalien geachtet und dabei mit dem bloßen Auge sichtbare linsenförmige Verdickungen bis 1 mm Länge und einem Durchmesser von etwa 0.6 mm festgestellt. Fünf dieser Verdickungen wurden bei 42 m untersuchter Faserlänge der Polifi 0042-050 und drei Verdickungen bei 28 m untersuchter Faserlänge der Bicron BCF-12 entdeckt. Faserstücke, die solche Verdickungen aufweisen, müssen aussortiert werden, da sie nicht in die Bleiplatten eingelegt werden können. Aufgrund der geringen Anzahl sollte dies aber kein Problem darstellen.

Eine Besonderheit der Kuraray-Fasern ist ein Krümmungsradius von etwa 50 cm, der von der Lagerung der Fasern auf einer Rolle verursacht wird. Eine Verwendung der Fasern ist deshalb ausgeschlossen, da die Einlegeprozedur der Fasern in die Bleiplatten per Hand oder Automatik zu stark behindert wird. Lieferung von geraden Faserstücken ist laut Herstellerfirma nicht möglich.

Abschließend kann aufgrund der Messungen festgestellt werden, daß die geometrischen Anforderungen von Bicron- und Pol.hi.tech-Fasern erfüllt werden. Die Kuraray-Fasern können dagegen wegen der beschriebenen Krümmungsradien nicht verwendet werden.

5.1.2 Reproduzierbarkeit und Meßfehler der optischen Messungen

Die optischen Einzelfasermessungen stellen den Hauptteil dieser Arbeit dar. Deshalb sollen in diesem Abschnitt vor den eigentlichen Ergebnissen die Reproduzierbarkeit und die Meßfehler der optischen Messungen besprochen werden.

Die β-Quelle, die der Anregung der Fasern zum Szintillieren diente, kann Ursache verschiedener Fehlerquellen sein. Zunächst ist der statistische Charakter des β-Zerfalls zu nennen, der für eine statistische Schwankung der Anzahl der Szintillationsphotonen verantwortlich war. Die Schwankung der Photonenanzahl verursachte wiederum eine Anzeigeungenauigkeit des Strommeßgeräts von etwa 2%.

Fehler, die auf eine Abweichung der Elektronenabstrahlcharakteristik der β-Quelle von der Rotationssymmetrie zurückzuführen waren, wurden vermieden, da die Quelle immer mit der gleicher Orientierung in der Quellenhalterung des Verschiebeschlittens installiert war.

Ein systematischer Meßfehler konnte aber auch durch die unterschiedliche Positionierung der Quelle relativ zur Faserachse, abhängig vom Anregungsort, bedingt sein. Denn beim Verschieben der Quelle längs der Faser war eine Veränderung des vertikalen und horizontalen Abstands Quelle-Faser und damit der Anzahl der Elektronen, die die Faser erreichten, nicht auszuschließen. Um diesen aufgrund mechanischer Toleranzen auftretenden Meßfehler, der sowohl Lichtausbeuten, als auch Abschwächungslänge beeinflußte, möglichst klein zu halten, wurden die vertikalen und horizontalen Abstände Quelle-Faser entlang der Faserachse auf 0.1 mm genau justiert.

Wegen ihrer leichten Biegung war es nicht immer möglich eine Faser absolut plan in die Rille des Messingblock zu legen, die der Positionierung der Faser in der Meßapparatur dient. Daraus resultierende maximale Abweichungen einzelner Meßpunkte von der Planlage von 0.1-0.2 mm bewirkten Schwankungen der Lichtausbeuten bis 3%.

Der auslesende Photomultiplier konnte ebenfalls die Meßergebnisse verfälschen. Während der Messungen wurde stets darauf geachtet, daß der Dunkelstrom — so wird das Rauschen des Photomultipliers bei lichtdichten Betriebsbedingungen genannt — im Bereich 0.05-0.2 nA lag und damit in jedem Fall kleiner als 1% des eigentlichen Signalwertes war.

Statistische Schwankungen der Photomultiplierverstärkung (bedingt durch die Hochspannungsversorgung oder durch den Photomultiplier selbst) waren während einer Betriebsdauer von einigen Stunden nicht sichtbar und damit kleiner als die Anzeigeungenauigkeit des Strommeßgeräts von ca. 1%.

Zur Berechnung einer Faserabschwächungslänge wurde eine Exponentialfunktion mit 2 Parametern der Form

$$I = P_1 * \exp(-x/P_2)$$

an die erstellte Abschwächungskurve gefittet. Die Fehler des Fits lagen für die extrapolierte unabgeschwächte Lichtausbeute $I_0 = P_1$ bei der Distanz Anregungsort-Ausleseende von $x = 0$ cm unter 1% und für die Abschwächungslänge $\lambda_{att} = P_2$ im Bereich kleiner als 1 m unter 1% und im Bereich 1-2 m unter 2%.

Um die Reproduzierbarkeit des Meßverfahrens zu testen, wurden einzelne Fasern wiederholt der Meßprozedur unterworfen. Für die Lichtausbeuten ergaben sich Standardabweichungen der Einzelmessungen (RMS) von 3% — ermittelt aus drei Meßreihen je zehn Einzelmessungen. Für die Abschwächungslängen ergaben sich 6% — ermittelt aus drei Meßreihen je fünf Einzelmessungen.

Die Qualität der Faserausleseenden wurde in ähnlicher Weise getestet. Nach jeder Messung wurde jeweils die gleiche Faser mit einem neuen Ausleseende versehen. Zwei Meßreihen je fünf Einzelmessungen zeigten eine Standardabweichung der Einzelmessung (RMS) von 3% sowohl bei Lichtausbeute, als auch bei Abschwächungslänge. Daraus konnte geschlossen werden, daß die Qualität der Faserausleseenden die Reproduzierbarkeit des Meßverfahrens nicht sichtbar beeinflußte.

5.1.3 Auskoppeln von Mantellicht

Das Mantellicht hat wesentlich kürzere Abschwächungslängen als das Kernlicht einer Faser. Denn aufgrund der stärker verlustbehafteten Reflexion an der weniger glatten Grenzfläche Fasermantel-Umgebung verliert das Mantellicht auf dem Weg vom Szintillationsereignis zum Ausleseende der Faser größere Anteile als das Kernlicht. Es sollte deshalb eine Methode gefunden werden, mit der Mantellicht einer Faser verläßlich ausgekoppelt werden kann, ohne das Kernlicht zu beeinflußen.

Die Idee war, die Totalreflexion des Mantellichts an der Grenzfläche Fasermantel-Umgebung nahe des Ausleseendes (in wenigen Millimetern Entfernung) zu verhindern. Zu diesem Zweck wurde dort ein kurzer Abschnitt der Mantelfläche schlauchförmig mit schwarzer wasserlöslicher Farbe überzogen.

Abbildung 5.2 zeigt, wie mit zunehmender Länge L des gefärbten Abschnitts die aufgenommenen Abschwächungskurven flacher werden. Die relativen Lichtausbeuten I sind als Funktion der Distanz x des Anregungsortes vom Ausleseende dargestellt. Zur Verdeutlichung der Abschwächungskurven wurden diese mit einer Summe zweier Exponentialfunktionen mit 4 Parametern der Form

$$I = P_1 * \exp(-x/P_2) + P_3 * \exp(-x/P_4)$$

gefittet.

Dem Bild ist zu entnehmen, daß die Abschwächungskurven bei 3 mm und 13 mm nahezu identisch sind. Daraus kann geschlossen werden, daß eine schlauchförmige Schwärzung der Mantelfläche von etwa 1 cm dicht beim Ausleseende ausreicht, um das Mantellicht zuverlässig vom Kernlicht zu trennen und auszukoppeln.

In Abbildung 5.3 ist zu sehen, wie sich die Lichtausbeute einer Faser aus seinen Anteilen von Mantel- und Kernlicht zusammensetzt. Die Abschwächungskurven von Gesamtlichtausbeute und vom Kernlichtanteil wurden direkt durch Messung erstellt — jeweils mit und ohne Schwärzung eines schlauchförmigen Mantelabschnitts nahe beim Ausleseende. Die Mantellichtabschwächungskurve wurde dagegen durch Subtraktion der beiden anderen berechnet.

Die Abschwächungskurve der Gesamtlichtausbeuten kann nur sinnvoll mit einer 4-parametrigen Summe zweier Exponentialfunktionen gefittet werden, während die Abschwächungskurve von Mantel- und Kernlicht jeweils mit einer 2-parametrigen Exponentialfunktion der Form

$$I = P_1 * \exp(-x/P_2)$$

hinreichend gut gefittet werden.

Die als Beispiel verwendete Bicron BCF-12 hat eine Abschwächungslänge λ_{att} von 121.7 cm für das Kernlicht und 7.8 cm für das Mantellicht. Dies macht deutlich, daß auf das Mantellicht verzichtet werden muß, soll die Faser eine flache Abschwächungskurve mit einer Abschwächungslänge über 1 m haben.

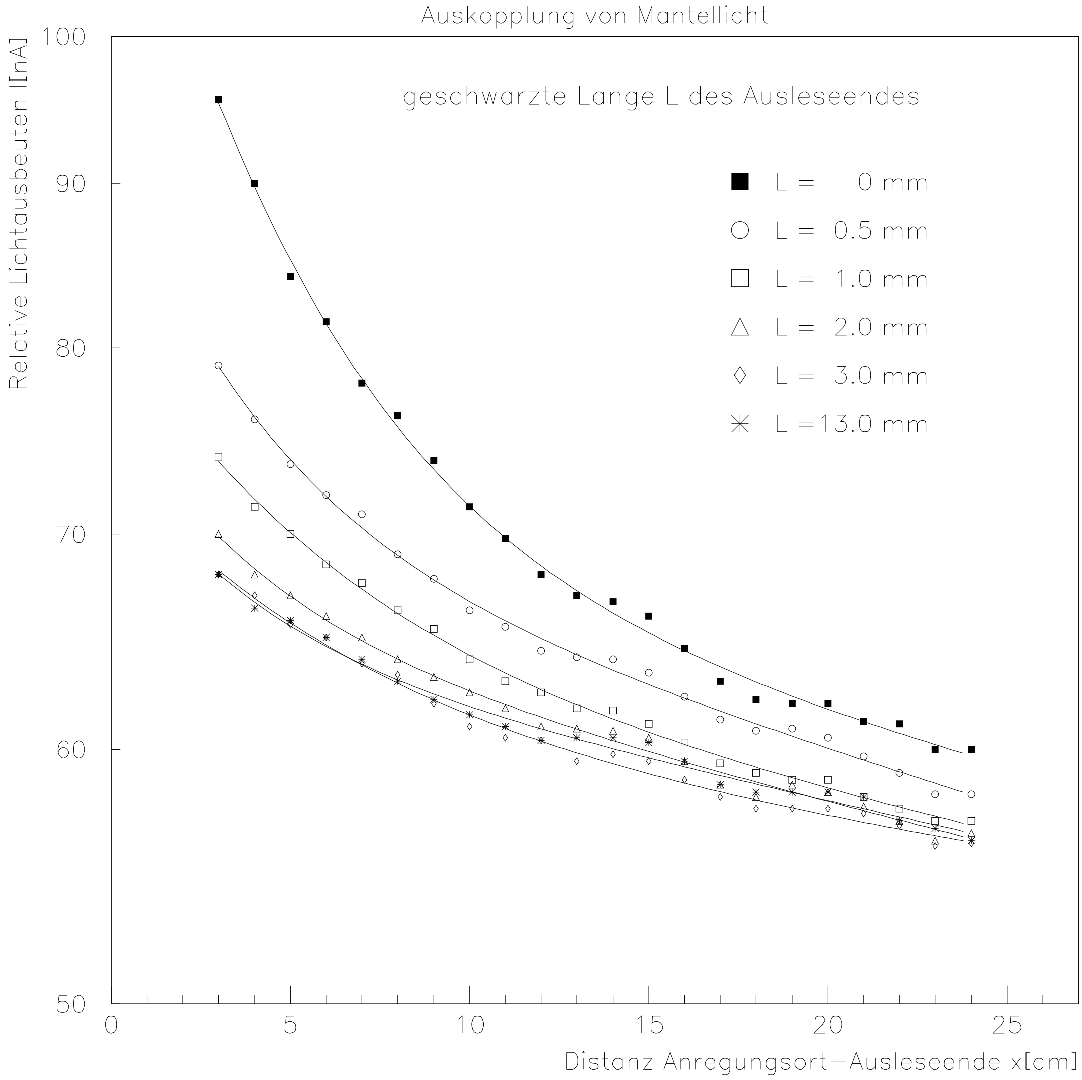

Abbildung 5.2: Abschwächungskurven (relat. Lichtausbeute I gegen Distanz x des Anregungsortes vom Ausleseende) als Funktion des Parameters L; L ist die Länge des kurz vor dem Faserausleseende geschwärzten Oberflächenabschnitts. Die Abschwächungskurven mit $L = 3$ mm und $L = 13$ mm sind nahezu identisch.Die einzelnen Kurven sind zur besseren Unterscheidung mit $I = P_1 * \exp(-x/P_2) + P_3 * \exp(-x/P_4)$ gefittet; Faser: Bicron BCF-12.

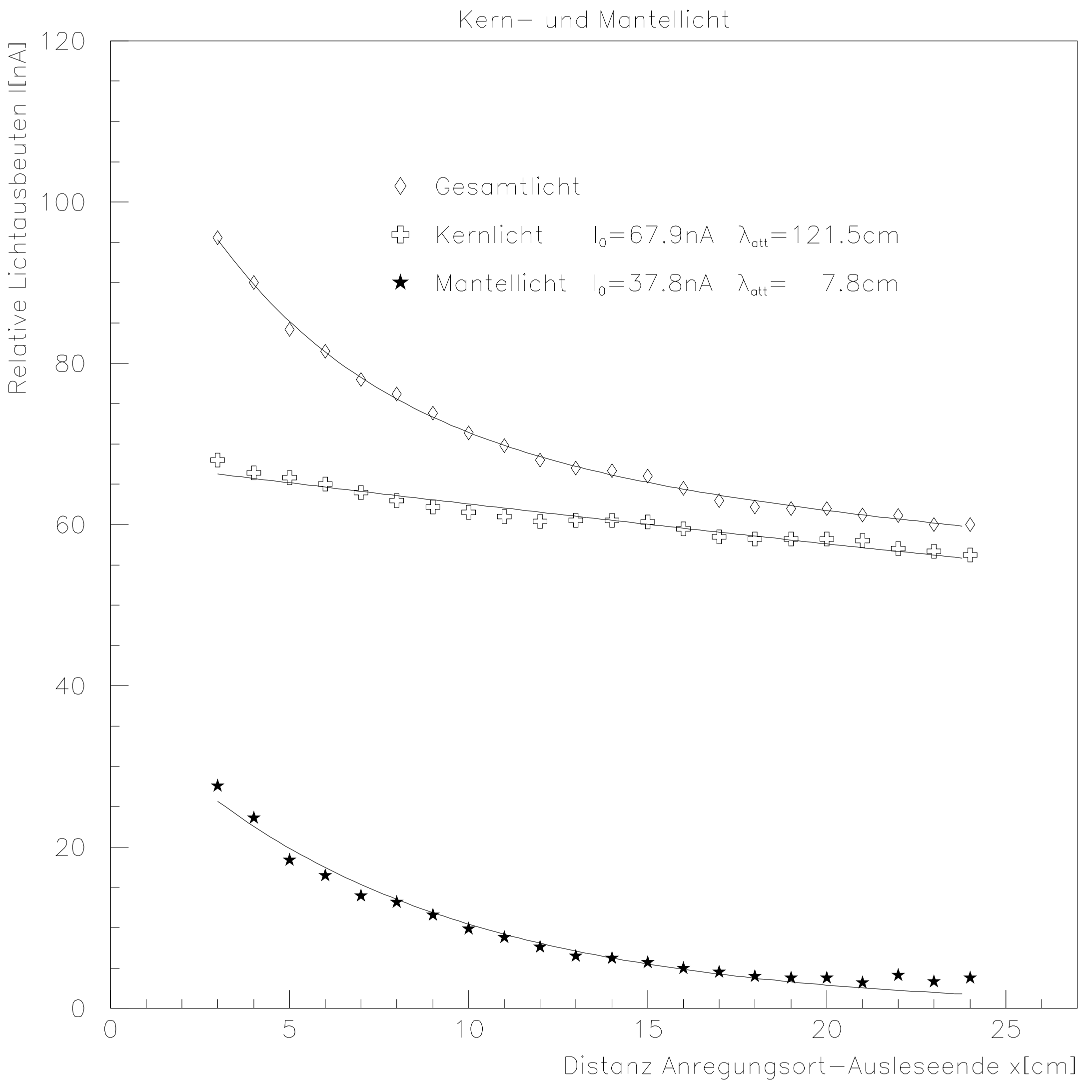

Abbildung 5.3: Abschwächungskurven der gesamten Lichtausbeuten, der Kernlichtausbeuten und der Mantellichtausbeuten; Faser Bicron BCF-12. Die durchgezogenen Linien sind Fits der Form $I = P_1 * \exp(-x/P_2) + P_3 * \exp(-x/P_4)$ für die Gesamtlichtausbeuten und der Form $I = P_1 * \exp(-x/P_2)$ für die Kern- und Mantellichtausbeuten.

Faser-sorte	Emissions-farbe	Emissions-peak [nm]	Lichtausbeute I_0 [nA]	Abschwächungs-länge λ_{att} [cm]
Durchmesser 0.5mm				
Bicron BCF-60	grün	530	25.6	169.9
Bicron BCF-20	grün	492	36.8	50.9
Polifi 0048-050	grün	481	42.3	37.3
Bicron BCF-12	blau	435	71.7	118.9
Kuraray SCSF-81N	blau	≈ 435	65.7	51.7
Kuraray SCSF-62	blau	/	72.6	119.3
Kuraray SCSF-76	blau	/	71.3	119.4
Kuraray SCSF-77	blau	/	74.0	169.5
Polifi 0042-050	blau	420	85.6	55.4
Polifi 0046-050	blau	435	63.2	79.6
Durchmesser 1.0mm				
Kuraray SCSF-3HF	grün	/	82.0	118.2
Kuraray SCSF-81	blau	≈ 435	217.6	51.4
Polifi 0042-100	blau	420	322.7	161.7
Polifi 0046-100	blau	435	243.3	241.1

Tabelle 5.2: Vergleich verschiedener Fasersorten hinsichtlich unabgeschwächter Lichtausbeuten I_0 bei der Distanz Anregungsort-Ausleseende $x = 0$ cm, (relat. Einheiten: [nA]), und Abschwächungslänge λ_{att}.

5.1.4 Vergleich von Lichtausbeute und Abschwächungslänge verschiedener Fasern

Um festzustellen, welche Fasern für die Verwendung im geplanten Spaghettikalorimeter benutzt werden können, wurden mehrere Fasersorten verschiedener Hersteller hinsichtlich Lichtausbeute und Abschwächungslängen getestet. Die Werte wurden mit Fasern ermittelt, deren Frontenden zur Vermeidung von Rückreflexionen und deren Mantelflächen zur Auskopplung von störendem Mantellicht schlauchförmig nahe den Ausleseenden geschwärzt wurden.

Tabelle 5.2 enthält die Daten von 14 Fasersorten der drei Hersteller Bicron, Kuraray und Pol.hi.tech. Neben zehn Fasern mit einem Durchmesser von 0.5 mm wurden auch vier Fasern mit 1 mm Durchmesser getestet. Soweit aus Datenblättern der Hersteller bekannt, ist zu jeder Faser außer der Emissionsfarbe auch die genaue Wellenlänge des Emissionspeaks angegeben. Von jeder Fasersorte wurde jeweils nur ein Exemplar ausgemessen, so daß die Meßwerte keine Durchschnittswerte, sondern Einzelwerte darstellen.

Die aufgeführten Lichtausbeuten stellen die aus einem Exponentialfit extrapolierten unabgeschwächten Lichtausbeuten bei der Distanz $x = 0$ cm des Anregungsortes vom Ausleseende dar. Wie der Tabelle zu entnehmen ist, zeigen die grünen Fasersorten eindeutig niedrigere Lichtausbeuten als die blauen Fasersorten. Innerhalb der blauen Fasersorten variieren die Lichtausbeuten nur gering von 63.2 nA der Faser Polifi 0046-050 bis 85.6 nA bei Polifi 0042-050. Die Abschwächungslängen variieren dagegen unabhängig von der Farbe der Faser beträchtlich von 37.3 cm (Polifi 0042-050) bis 169.9 cm (Bicron BCF-60).

Für die Verwendung im geplanten Spaghettikalorimeter sind die blauen Fasersorten zu favorisieren. Diese haben den deutlichen Vorteil höherer Lichtausbeuten aufgrund einer besseren Anpassung ihrer Emissionsspektren an die Hamamatsu-Photomultiplier, die das Maximum ihrer Strahlungssensitivität bei einer Wellenlänge von 420 nm haben. Die Kuraray-Fasern, die sowohl in Lichtausbeute als auch in Abschwächungslänge gut abschneiden, scheiden wegen ihrer endlichen Krümmungsradien von ca. 50 cm (siehe Kapitel 5.1.1) aus. Für weitere Tests werden deshalb insbesondere zwei Fasersorten ausgewählt. Die Bicron BCF-12 mit einer Lichtausbeute von 71.7 nA und einer großen Abschwächungslänge von 118.9 cm. Außerdem die Polifi 0042-050 mit der höchsten Lichtausbeute unter den 0.5 mm dicken Fasern von 85.6 nA und einer relativ kleinen Abschwächungslänge von 55.4 cm.

5.1.5 Messung einer blauen Faser mit Filtern

Die Verwendung von Filtern bei der Auslese des produzierten Lichts ist eine Möglichkeit, die Abschwächungslänge von Fasern zu verbessern. Dies beruht auf dem Phänomen, daß aufgrund der Selbstabsorption des erzeugten Lichts in der Faser besonders kurze Wellenlängen im blauen Bereich des Spektrums absorbiert werden. Filter, die die kurzen Wellenlängenbereiche abschneiden, bewirken größere effektive Abschwächungslängen. Das Maximum der Strahlungssensitivität des Auslesesystem ist in den grünen Bereich verschoben.

Um diese Methode zu überprüfen, wurde das Kernlicht einer blauen Faser (Bicron BCF-12) mit einem Emissionspeak von 435 nm vermessen. Es wurden drei Abschwächungskurven aufgenommen, jeweils ohne Benutzung eines Filters und mit Benutzung zweier Filter, die bei 435 nm oder bei 455 nm die unteren Wellenlängen abschneiden. Die gemessenen Kurven sind in Abbildung 5.4 zu sehen.

Die ursprüngliche Abschwächungslänge von 122.6 cm wird bei Benutzung des 435 nm-Filters auf über 5 m verlängert. Bei der Benutzung des 455 nm-Filters erhält man eine unrealistische Abschwächungslänge von 1.5 km. Dies ist auf die in diesen Bereichen zu ungenaue Bestimmung der Abschwächungslängen zurückzuführen, die auf nur 24 cm kurze gemessene Faserabschnitte beruht. Es ist aber ersichtlich, daß mit diesem Filter die Abschwächungslänge abermals zugenommen hat. Ein gravierender Nachteil dieser Methode wird ebenfalls aus der Abbildung deutlich. Mit der Zunahme der Abschwächungslängen bei der Verwendung von Filtern nehmen die Lichtausbeuten gleichzeitig stark ab. Die unabgeschwächten Lichtausbeuten bei Distanzen Anregungsort zu Ausleseende von $x = 0$ cm ge-

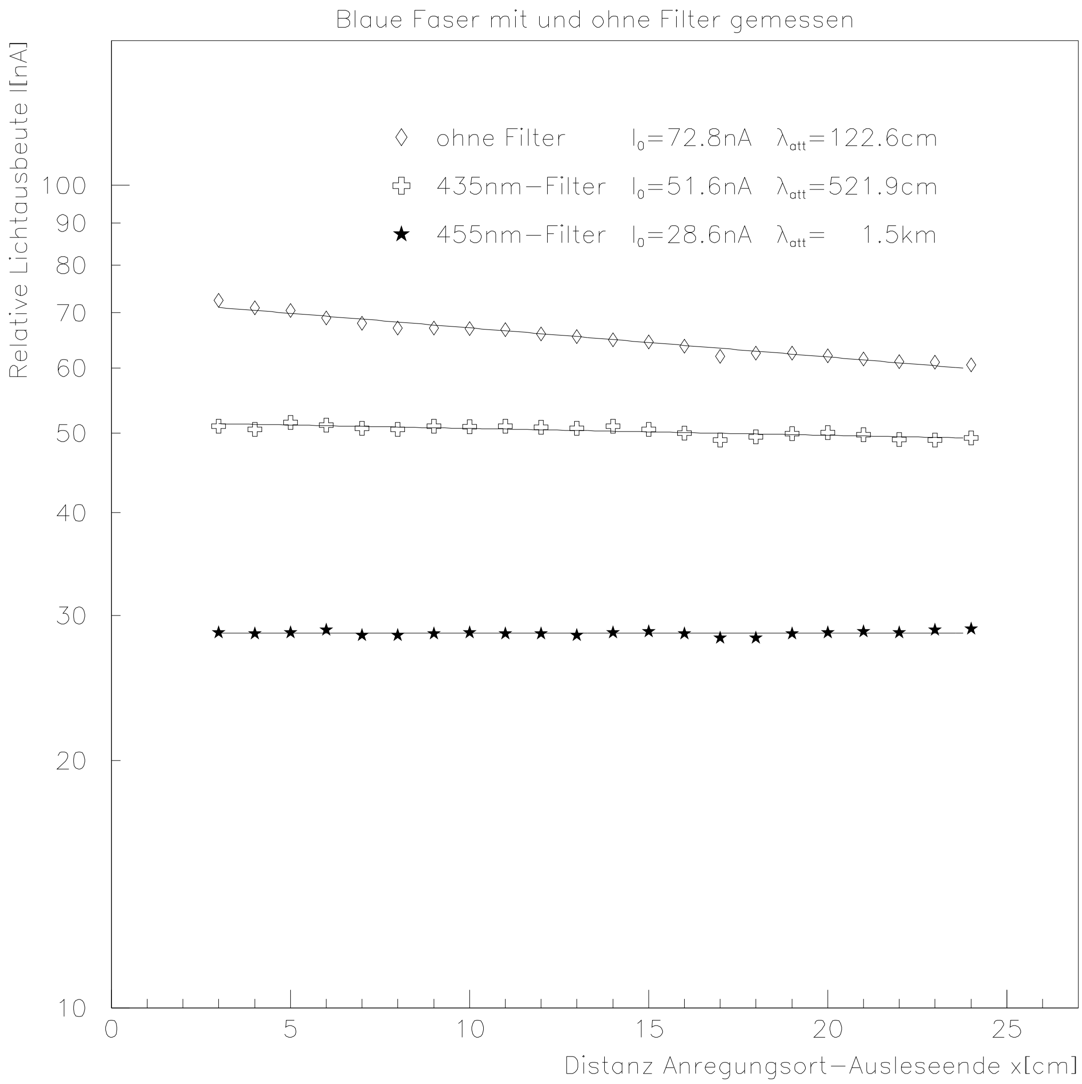

Abbildung 5.4: Abschwächungskurven einer blauen Faser (Bicron BCF-12, Emissionspeak = 435 nm, Kernlicht), gemessen ohne Filter und mit zwei Filtern, die bei 435 nm und 455 nm das untere Wellenlängenspektrum der Lichtausbeuten der Faser abschneiden. Die durchgezogenen Linien sind Fits der Form $I = P_1 * \exp(-x/P_2)$.

hen von ursprünglich 72.8 nA auf 51.8 nA oder 70.9% bei der Verwendung des 435 nm-Filters zurück. Bei der Verwendung des 455 nm-Filter ist der Rückgang noch drastischer. Hier bleiben noch 28.6 nA oder 39.3% über.

Diese Rückgänge der Lichtausbeuten sind nicht akzeptabel, so daß auf den Einsatz von Filtern im neuen Kalorimeter verzichtet werden muß.

5.1.6 Lichtausbeute und Abschwächungslänge frontal verspiegelter Fasern

Neben der Benutzung von Filtern gibt es eine weitere Methode die optischen Eigenschaften von Fasern zu verbessern: die Verspiegelung der Faserfrontenden. Die Verspiegelung dient der Rückreflexion der Lichtstrahlen, die entgegengesetzt der Ausleserichtung in der Faser weitergeleitet werden. Das reflektierte Licht gelangt auf diese Weise ebenso wie das direkt geleitete Licht zum Auslesesystem. Der am Frontende reflektierte Anteil muß jedoch längere Wege zum Auslesesystem zurücklegen und wird daher stärker abgeschwächt als der direkte Anteil. Der zurückzulegende Weg x_R hängt vom Anregungsort x ($x = 0$ cm entspricht dem Ausleseende der Faser) und der Länge der Faser L ab, gemäß:

$$x_R = 2L - x$$

Die insgesamt ausgelesene Lichtausbeute I kann also, falls die Reflektivität R des verspiegelten Frontendes wellenlängenunabhängig ist, dargestellt werden durch:

$$I = P_1 * (\exp(-x/P_2) + R * \exp(-(2L - x)/P_2))$$

P_1 bedeutet die unabgeschwächte Lichtausbeute des direkten Lichtanteils und P_2 die Abschwächungslänge der unverspiegelten Faser.

Im auslesenden Photomultiplier werden also zwei Lichtanteile mit entgegengesetzten Abschwächungskurven addiert. Neben erhöhten Lichtausbeuten sollte also auch die resultierende effektive Abschwächungslänge der verspiegelten Faser vergrößert gegenüber der unverspiegelten sein.

Um diesen Effekt zu überprüfen, wurden das Kernlicht verschiedener Fasern zunächst mit verspiegelten und anschließend nach Entfernung der Spiegel mit geschwärzten Faserfrontflächen gemessen. Die Ergebnisse in Lichtausbeuten und Abschwächungslängen von vier verschiedenen Fasern zeigt Abbildung 5.5. Die Erwartungen an die Methode der Verspiegelung wurden erfüllt. Die unabgeschwächten Lichtausbeuten bei der Distanz Anregungsort-Ausleseort von $x = 0$ cm sind bei den verspiegelten Fasern durchschnittlich 34% höher als bei den unverspiegelten. Bei $x = 27$ cm — was dem Ort des Frontendes entspricht — stiegen die Lichtausbeuten (aus dem Exponentialfit extrapoliert) sogar durchschnittlich um 63%, d.h. die Reflektivität R der Spiegelflächen ist ebenfalls durchschnittlich 63%. Die effektiven Abschwächungslängen sind bei allen Fasern um den Faktor 3 und mehr gestiegen. Selbst bei der Polifi 0042-050 erhöhte sich die Abschwächungslänge von

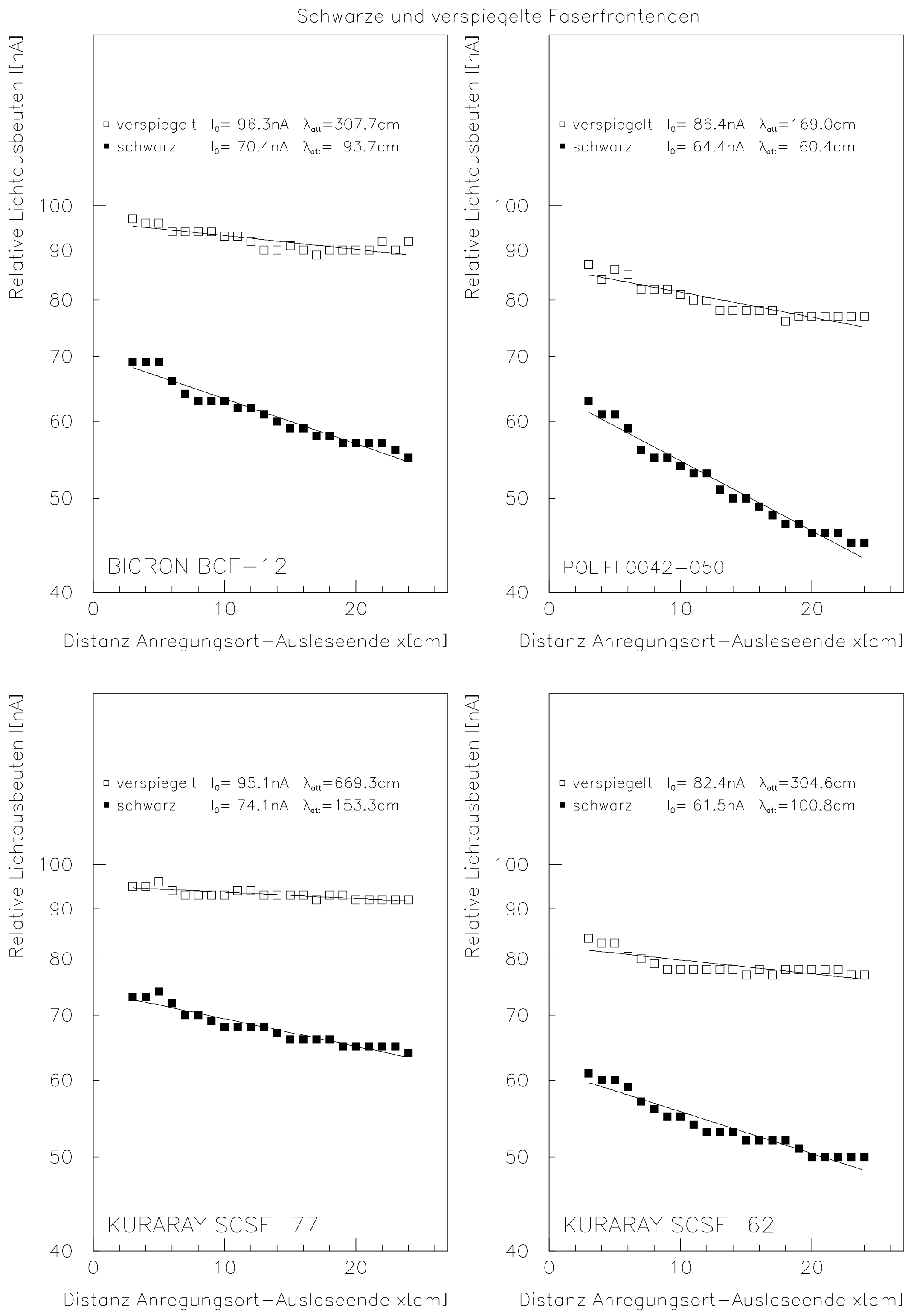

Abbildung 5.5: Abschwächungskurven von vier Fasern, jeweils mit schwarzem und verspiegelten Frontende. Die durchgezogenen Linien sind Fits der Form $I = P_1 * \exp(-x/P_2)$.

ursprünglich nur 60.4 cm auf 169.0 cm. Bei der Kuraray SCSF-77 stieg sie sogar von 153.3 cm auf 669.3 cm. Jede der verspiegelten Fasern erfüllt nun die Mindestanforderung von 1 m Abschwächungslänge.

Ein Problem liegt jedoch möglicherweise in den Schwankungen des Anstieg der Lichtausbeuten bei $x = 27$ cm bzw. der Reflektivitäten R von 47% bei der Kuraray SCSF-77 bis zu 79% bei der Polifi 0042-050. Ob dies auf die Spiegelqualität zurückzuführen ist, mußte deshalb mittels vieler Messungen an Fasern einer Sorte getestet werden. Die Ergebnisse dieser Messungen werden im nächsten Kapitel vorgestellt.

5.1.7 Schwankungen der optischen Fasereigenschaften

Schwankungen in der Lichtausbeute und der Abschwächungslänge der Fasern haben einen Einfluß auf die Energieauflösung des geplanten Spaghettikalorimeters. Dies wurde mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen [Walt93] auch quantitativ gezeigt. Damit stellen die Schwankungen ein weiteres Auswahlkriterium für die zu verwendende Fasersorte dar. Aus diesem Grund wurden zwei Fasersorten, Bicron BCF-12 und Polifi 0042-050, die aufgrund der bisherigen Untersuchungen ausgewählt worden waren, näher untersucht.

Bestimmt wurden von jeweils mehreren Fasern einer Sorte die Abschwächungslängen und die Lichtausbeuten bei der Distanz Anregungsort-Ausleseende $x = 0$ cm und $x = 24$ cm. Die Distanz $x = 24$ cm entspricht auf die Verhältnisse der kompletten Blei-Faser-Module im geplanten Spaghettikalorimeter (Bleiplattenlänge 25 cm und Faserbündelzone 4.5 cm) umgerechnet, laut Monte-Carlo-Simulationen [Walt93] ungefähr dem zu erwartenden elektromagnetischen Schauermaximum.

In Tabelle 5.3 sind die erstellten jeweiligen Mittelwerte und deren Schwankungen (RMS) aufgeführt. Die Meßungenauigkeiten von 3% für Lichtausbeuten und 6% für Abschwächungslängen sind in den angegebenen Werten enthalten. Neben den Werten für Fasern mit geschwärzten Frontendflächen sind auch die Werte für Fasern mit verspiegelten Frontendflächen dargestellt.

Bei den Polifi-Fasern sind die ermittelten Schwankungen durchweg geringer als bei den Bicron-Fasern. Lichtausbeuten ($x = 0$ cm und $x = 24$ cm): 5.5% und 5.8% zu 7.2% und 7.9%, Abschwächungslängen: 13.7% zu 21.9% für Fasern mit geschwärzten Frontendflächen. Bei Fasern mit verspiegelten Frontendflächen sind die einzig gemessenen Schwankungen der Lichtausbeuten bei $x = 24$ cm überraschenderweise niedriger. Hier liegt das Verhältnis der Schwankungen von Polifi-Fasern zu Bicron-Fasern bei 4.6% zu 7.6%. Die Befürchtung, daß unterschiedliche Spiegelqualitäten von Faser zu Faser die Schwankungen der Lichtausbeuten bei $x = 24$ cm (3 cm von den Frontendflächen entfernt) vergrößern würden, hat sich nicht bestätigt. Sie sind im Gegenteil kleiner geworden. Die Verspiegelung scheint somit einen nivellierenden Einfluß auf die ursprünglichen Schwankungen zu haben.

Abschließend muß festgestellt werden, daß die Bicron BCF-12 Fasern bei langen

Fasersorte	Bicron BCF-12	Polifi 0042-050
geschwärzte Faserfrontenden		
Anzahl gemessener Fasern	20	19
Mittelwert I_0 [nA]	60.7	70.2
RMS I_0 %	7.2	5.5
Mittelwert λ_{att} [cm]	108.3	60.9
RMS λ_{att} %	21.9	13.7
Anzahl gemessener Fasern	20	48
Mittelwert I_{24} [nA]	49.3	45.5
RMS I_{24} %	7.9	5.8
verspiegelte Faserfrontenden		
Anzahl gemessener Fasern	100	48
Mittelwert I_{24} [nA]	82.4	77.8
RMS I_{24} %	7.6	4.6

Tabelle 5.3: Mittelwerte und Schwankungen (RMS) der Lichtausbeuten I_0 und I_{24} bei den Distanzen Anregungsort-Ausleseende $x = 0$ cm und $x = 24$ cm und den Abschwächungslängen λ_{att} zweier Fasersorten, jeweils mit geschwärzten und verspiegelten Faserfrontenden.

Abschwächungslängen größere Schwankungen zeigen, während die Polifi 042-050 kleinere Schwankungen, aber dafür auch sehr viel kürzere Abschwächungslängen haben. Nach Monte-Carlo-Simulationen [Walt93] sind die größeren Schwankungen der Bicron-Fasern eher akzeptabel als die kurzen Abschwächungslängen der Pol.hi.tech-Fasern. Erst Schwankungen der Lichtausbeute von etwa 10% bewirken einen Beitrag zum konstanten Term der Energieauflösung von 1%, während Abschwächungslängen kleiner als 1 m einen Beitrag größer als 1% verursachen.

5.1.8 Lichtverlust gekrümmter Fasern

Die Untersuchung der Lichtausbeuten gekrümmter Fasern wurde durch Probleme bei den Messungen mit Prototypen von Blei-Faser-Modulen motiviert. Es zeigten sich bei Scans über die Zellgrenzen der Module hinweg mit DESY- und CERN-Teststrahlen unerwartet hohe Signalschwankungen. Diese Schwankungen lagen bei mehreren Prozent und hätten bei gleicher Höhe im geplanten Spaghettikalorimeter einen unerwünscht hohen Beitrag zur Verschlechterung der Energieauflösung zur Folge. Da die Rückgänge in den Signalen mit den Zellgrenzen der Module korreliert waren, konnte nicht ausgeschlossen werden, daß diese auf Lichtverluste der Fasern in der Faserbündelzone zurückzuführen sind. Die Bündelung der Fasern dient der mechanischen Anpassung der Faserausleseenden an die Lichtmischerquerschnitte.

Die Fasern weisen deshalb abhängig von ihrer Lage in der Faserbündelzone verschieden starke Krümmungen auf. Zentral im Bündel geführte Fasern sind gerade, während die Randfasern S-förmig verlaufen und Krümmungsradien bis minimal etwa 4 cm aufweisen.

Um eventuelle Lichtverluste einer gekrümmter Faser mit der bisher benutzten optischen Meßapparatur feststellen zu können, wurden die Lichtausbeuten einer Faser sowohl in geradem, als auch in einem gekrümmten Zustand gemessen. Die Faser wurde zu diesem Zweck kurz vor dem Ausleseende (2.8 cm) in einer kreisförmigen Schleife verlegt. Die Größe der Schleife und damit deren Krümmungsradius (2.8-0.3 cm) konnte variiert werden. Die Lichtausbeuten (Kernlicht) wurden jeweils bei der gleichen Distanz von $x = 24$ cm Anregungsort-Ausleseende (Schleifenumfang inklusive) gemessen. Neben einer Faser, die nur nahe des Ausleseendes etwa 1cm lang zur Auskopplung des Mantellichts geschwärzt war, wurde auch eine bis auf den Anregungsort vollständig geschwärzte Faser ausgemessen. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 5.6.

Die Lichtausbeuten, als prozentualer Anteil der Lichtausbeute einer geraden Faser, sind als Funktion der Krümmungsradien der Schleifen dargestellt. Geschwärzte und ungeschwärzte Faser zeigen ein unterschiedliches Verhalten. Die Lichtausbeuten der geschwärzten Faser gehen schon ab dem maximal erfaßten Krümmungsradius von etwa 2.8 cm zurück, während die Lichtausbeuten der ungeschwärzten Faser erst unter 0.8 cm einen — dann allerdings steilen — Rückgang aufweisen. Sollte das unterschiedliche Verhalten nicht auf meßtechnischen Fehlern beruhen, dann könnte ein möglicher Ansatz einer Erklärung in der Lichtleitung innerhalb der Krümmung begründet sein. Innerhalb der Krümmung könnten Anteile des Kernlichts zwischenzeitlich zu Mantellicht werden. Später könnte dies Mantellicht teilweise wieder zu Kernlicht werden, falls die Faser ungeschwärzt ist und absorbiert werden, falls die Manteloberfläche geschwärzt ist. Nähere Untersuchungen wurden an dieser Stelle nicht durchgeführt.

Krümmungsradien über 2.8 cm konnten aus technischen Gründen nicht erfaßt werden. Jedoch zeigen beide Kurven ein Verhalten, das darauf schließen läßt, daß die Lichtverluste bei Krümmungsradien über 3 cm immer mehr verschwinden und insbesondere bei den Blei-Faser-Modulen minimal auftretenden Krümmungsradien von etwa 4 cm wohl vernachlässigbar sind.

5.1.9 Einfluß von Klebstoff auf optische Fasereigenschaften

Bei Longitudinalscans entlang der Faserachse von Prototypen wurden auch bei kompletten Blei-Faser-Modulen im DESY-Teststrahl 22 Abschwächungskurven aufgenommen. Diese stimmten jedoch nicht ganz mit dem exponentiellen Abfall der Abschwächungskurven der vergleichbaren Einzelfasermessungen überein. Die Kurven wiesen in ihrem Verlauf jeweils einen lokalen Rückgang bis zu 5% auf. Als mögliche Ursache könnte Klebstoff auf den Faseroberflächen in Frage kommen. Bei dem Aufbau der Blei-Faser-Module wurde nämlich pro Platte ein Pinselstrich mit

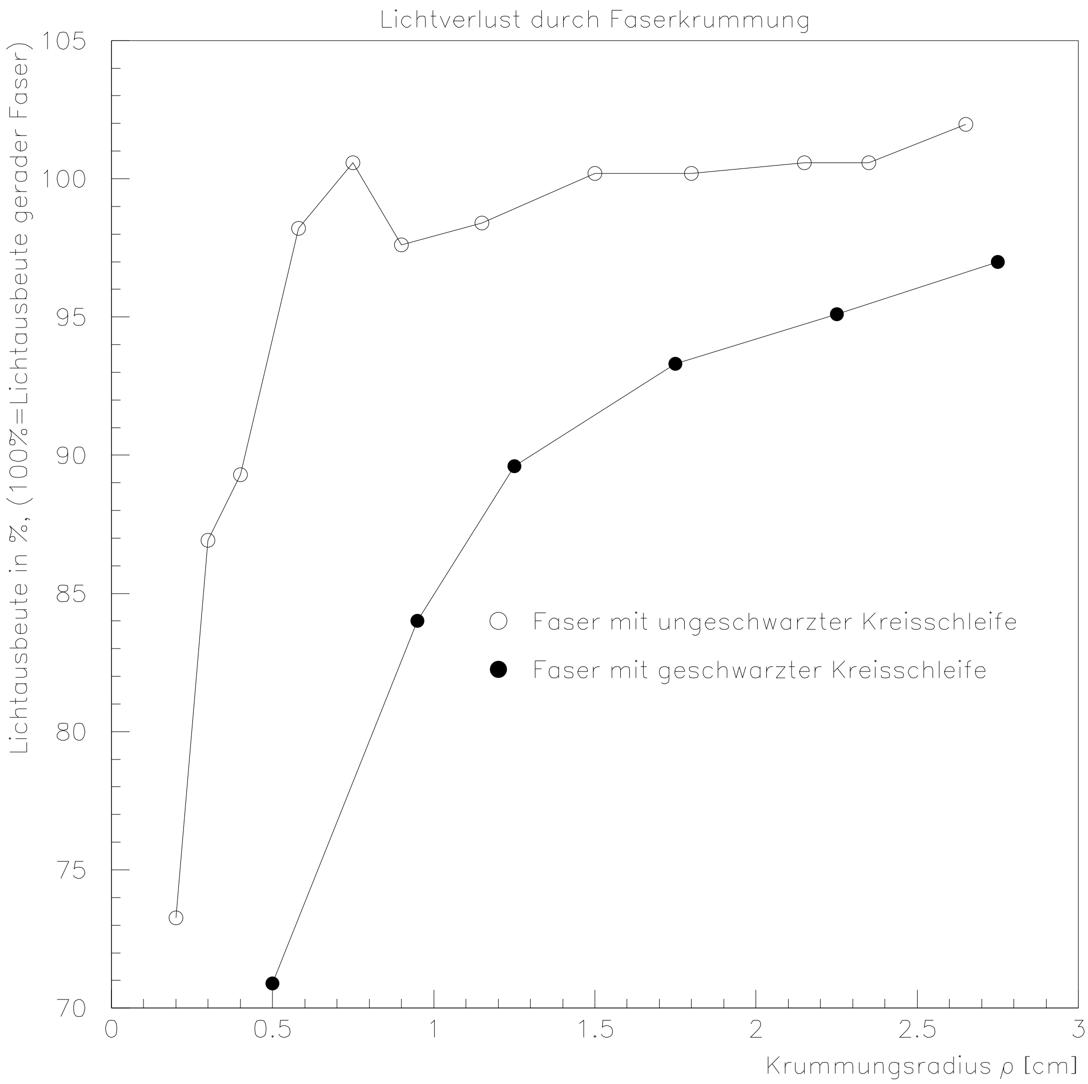

Abbildung 5.6: Lichtausbeuten zweier in einer Kreisschleife gekrümmter Fasern (Bicron BCF-12, Kernlicht, mit und ohne geschwärzter Kreisschleife) als Funktion des Krümmungsradius ρ. Die Lichtausbeuten sind jeweils auf die Lichtausbeuten gerader, ungekrümmter Fasern (100%) normiert.

Acrylklebstoff[1] zum Fixieren der Fasern aufgebracht. Um diese Annahme experimentell zu testen, wurde der Einfluß von Klebstoff auf optische Fasereigenschaften im Rahmen der Einzelfasermessungen untersucht.

In Abbildung 5.7 ist die Abschwächungskurve einer einzelnen Faser dargestellt, die von $x = 13.5$ cm bis $x = 18.5$ cm (Distanz Anregungsort-Ausleseende) mit Acrylklebstoff bestrichen wurde. Der Klebstoff ist bei der Verarbeitung sehr dünnflüssig und so wurde die Oberseite der Faser nur hauchdünn benetzt, während der in der Rille liegende Teil mit einer dickeren Lage umgeben wurde. Damit war gewährleistet, daß die Elektronen der β-Quelle ungehindert die Faser anregen konnten. In der Abbildung ist nun deutlich zu erkennen, daß die Lichtausbeuten an der mit Klebstoff behandelten Stelle um etwa 10% zurückgehen. Vor und hinter dieser Stelle entspricht der Verlauf der Kurve dem einer üblichen Abschwächungskurve. Eine Abschwächungskurve, die vorher mit der unbehandelten Faser aufgenommen wurde, stimmt dort auch gut mit der dargestellten Kurve überein. Da die Lichtausbeuten nur an dem behandelten Ort zurückgehen und einzig auf Kernlichtanteile zurückzuführen sind (Mantellicht wurde am Faserausleseende ausgekoppelt), muß also der Klebstoff den Lichterzeugungsprozeß beeinflussen. Eine chemische Veränderung der Fluoreszenzstoffe ist auszuschließen, da schon wenige Minuten nach der Aufbringung des Klebstoffs die Faser ausgemessen wurde. Außerdem wurde ein Test mit gleichem Rückgang der Lichtausbeuten auch mit optischem Fett durchgeführt. Denkbar ist dagegen eine teilweise Auskopplung von UV-Licht, das vom Primäradditiv erzeugt wird. Bei einer mittleren freien Wegstrecke von 100 bis 200 μm wird normalerweise ein gewisser Anteil dieses UV-Lichts an der Grenzfläche Mantel-Umgebung totalreflektiert und gelangt wieder ins Innere der Faser. Erst dann wird es vom Sekundäradditiv absorbiert und wellenlängenverschoben. Ist die Faseroberfläche nun von Klebstoff (oder optischem Fett) umgeben, wird dieser Anteil des primären UV-Licht ausgekoppelt und kann nicht mehr zum Sekundäradditiv gelangen. Als Folge davon ist die Lichtausbeute an dieser Stelle vermindert.

[1]Hersteller: Arti, Produktbezeichnung: Artidran, 09138 matt.

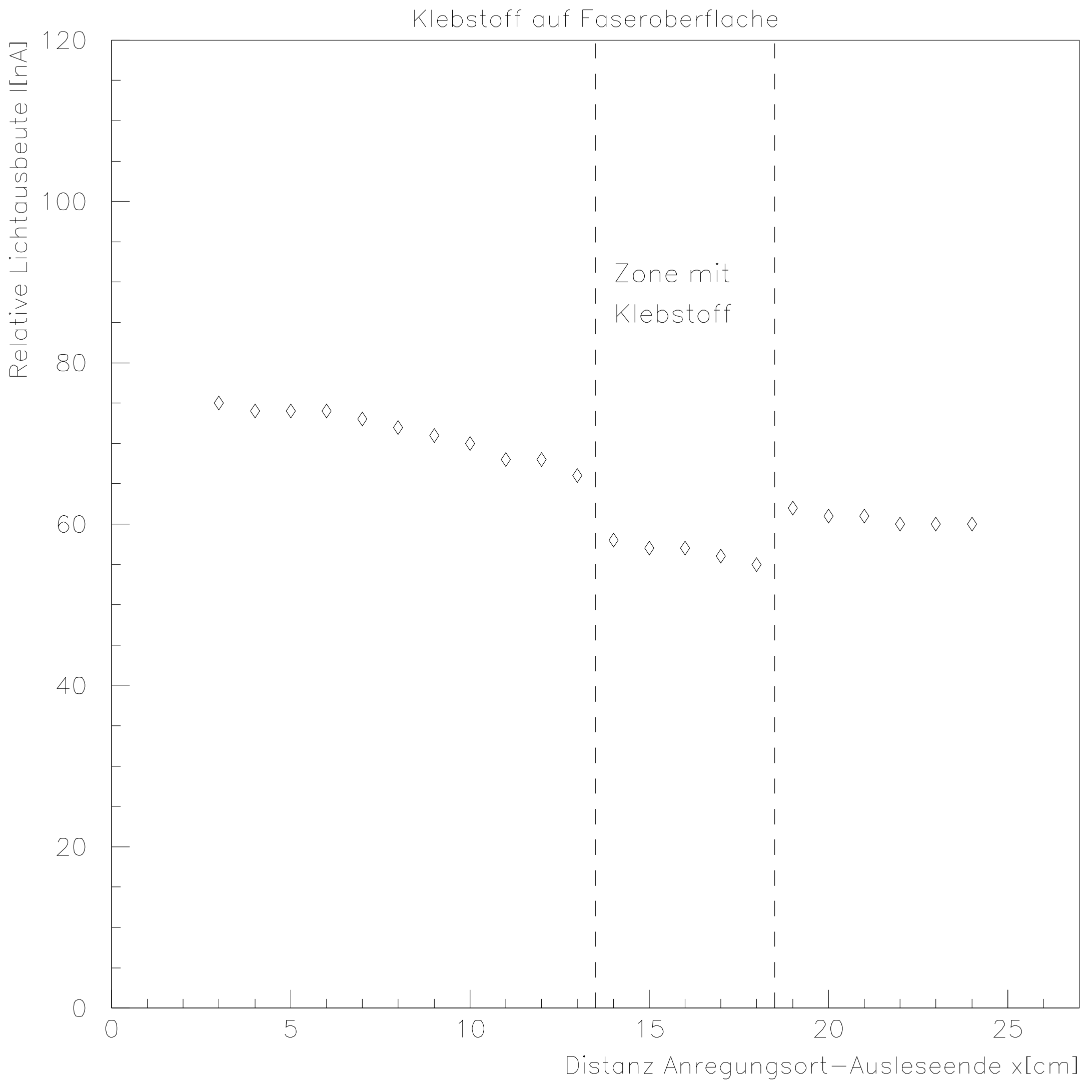

Abbildung 5.7: Abschwächungskurve einer Faser (Bicron BCF-12, Kernlicht), deren Oberfläche im markierten Bereich mit Klebstoff (Acryl) bedeckt ist.

5.2 Ergebnisse der Bestrahlungen

Messungen mit Dosimetern [App93] haben gezeigt, daß die rückwärtige H1-Detektorregion bei Betriebsbedingungen einer Strahlenbelastung bis zu 0.35 kGy pro Jahr unterliegt. Aus diesem Grund wurden einige Strahlenbelastungstests sowohl mit Einzelfasern als auch mit Blei-Faser-Modulen unternommen, die verschiedene Faserumgebungen wie Luft, Argon und Klebstoff ermöglichten.

In den Kapiteln 5.2.1 bis 5.2.3 werden zunächst mit einzelnen Fasern erhaltene Bestrahlungsergebnisse diskutiert. Im Anschluß daran kommen dann Bestrahlungsergebnisse mit Blei-Faser-Modulen, wie Kleinmodulen in Kapitel 5.2.4 und Einschichtmodulen in Kapitel 5.2.5, zur Sprache.

5.2.1 Lichtausbeute und Abschwächungslänge einzelner Fasern nach Bestrahlung

Es sollte die Auswirkung einer Bestrahlung auf Lichtausbeuten und Abschwächungslängen einzelner Fasern untersucht werden. Zu diesem Zweck wurden einzelne Fasern in Luftumgebung einer 5 kGy Gammastrahlung bei einer Dosisleistung von 2 kGy/h ausgesetzt. Lichtausbeuten und Abschwächungslänge wurden jeweils mit der gleichen Faser vor und innerhalb weniger Stunden am zweiten Tag nach der Bestrahlung ermittelt.

Abbildung 5.8 zeigt als Beispiel die Abschwächungskurven des Kernlichts einer blauen Faser (Bicron BCF-12), die sowohl vor, als auch nach Bestrahlung aufgenommen wurden und in beiden Fällen einen exponentiellen Abfall haben. Die unabgeschwächte Lichtausbeute bei der Distanz $x = 0$ cm von Anregungsort zu Ausleseende ist von der Bestrahlung kaum betroffen. Der Rückgang von 71.7 nA auf 68.9 nA des Photomultiplierstrom beträgt 4.1%. Die Abschwächungslänge ist dagegen nach Bestrahlung von 118.9 cm auf 55.8 cm, also auf 46.9% verkürzt. Dies Beispiel veranschaulicht, daß die hauptsächliche Strahlenwirkung bei einzelnen Fasern auf Abschwächung des erzeugten Szintillationslicht während seiner Leitung in der Faser beruht. Der Szintillationsprozeß selbst wird bei Strahlendosen bis mindestens 5 kGy kaum beeinträchtigt. Im nächsten Kapitel wird dieser Sachverhalt auch für andere Fasersorten bestätigt.

5.2.2 Vergleich der Strahlenhärte verschiedener Fasern

Ein weiteres Entscheidungskriterum für die Wahl einer geeigneten Fasersorte, die im geplanten Spaghettikalorimeter eingesetzt werden könnte, ist die Strahlenhärte. Zu Vergleichszwecken wurden deswegen die schon in Kapitel 5.1.4 auf Lichtausbeuten und Abschwächungslängen untersuchten 14 Fasersorten gemeinsam einer Gammabestrahlung von 5 kGy ausgesetzt. Die Bestrahlung fand mit einer Dosisleistung von 2 kGy/h statt. Die Faser waren dabei von Luft umgeben. Lichtausbeuten und

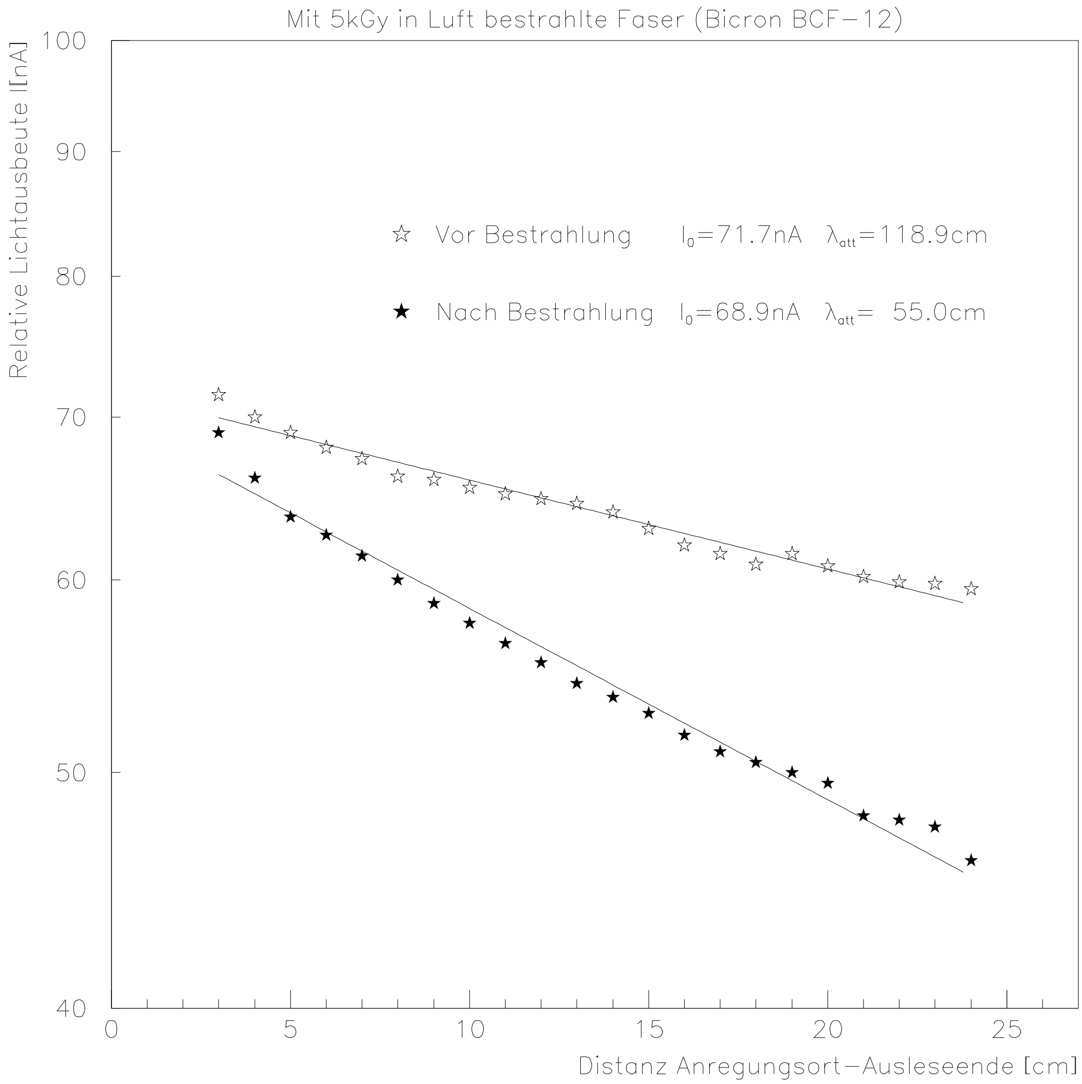

Abbildung 5.8: Abschwächungskurven einer Faser (Bicron BCF-12, Kernlicht), vor und nach einer Bestrahlung mit 5 kGy. Beide Kurven wurden mit der Funktion $I = P_1 * \exp(-x/P_2)$ gefittet.

Abschwächungslängen des Kernlichts der Fasern wurden innerhalb weniger Stunden am zweiten Tag nach der Bestrahlung gemessen. Die Tabelle 5.4 enthält die gemessenen Abschwächungslängen der bestrahlten Faser (für Lichtausbeuten und Abschwächungslänge unbestrahlter Fasern siehe Kap. 5.1.4) und die berechneten Verhältnisse:

$$R_0 = I_0^{nachBestr.} / I_0^{vorBestr.}$$

der unabgeschwächten Lichtausbeuten I_0 bei der Distanz Anregungsort-Ausleseende $x = 0$ cm, dienen dem Test, inwieweit der Szintillationsprozeß der einzelnen Fasersorten geschädigt wurden. Als Maß für die Abschwächung des Lichts in der Faser allein aufgrund der Strahlenschäden, wurden die Verhältnisse

$$R_{24} = (I_{24}/I_0)^{nachBestr.} / (I_{24}/I_0)^{vorBestr.}$$

gebildet.

Der Tabelle ist zu entnehmen, daß die Störung des Szintillationsprozesses jeweils nur gering ist. Denn die Rückgänge der unabgeschwächten Lichtausbeuten I_0 nach Bestrahlung betragen durchschnittlich nur etwa 5%. Die maximalen Rückgänge treten bei Polifi 0042-050 (0.5 mm Durchmesser) mit 12.5% und Polifi 0042-100 (1 mm Durchmesser) mit 10.5% auf. Die Höhe der Rückgänge ist nicht vom Emissionspektrum der Fasern abhängig.

Die lichtabschwächende Wirkung der verursachten Strahlenschäden hängt jedoch von der Farbe der Emission ab und ist für die im grünen Wellenlängenbereich emittierenden Fasern am geringsten. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Strahlenschäden am stärksten im blauen Bereich des Spektrums Licht absorbieren. Die Verhältnisse R_{24} der normierten Lichtausbeuten I_{24} reichen für die grünen Fasern von 82.5% (Polifi 0048-050) bis 98.5% (Kuraray SCSF-3HF) und bei den blauen Fasern von 45.4% (Polifi 042-100) bis 83.5% (Kuraray SCSF-76).

Die grünen Fasersorten sind also eindeutig strahlenhärter. Die im Vergleich zu den blauen Fasersorten geringeren Lichtausbeuten bei der Lichtauslese mit den Hamamatsu-Photomultipliern sprechen aber gegen ihre Verwendung.

Beim Vergleich der bisher favorisierten Fasersorten Bicron BCF-12 und Polifi 0042-050 zeigen sich die Bicron BCF-12 als strahlenhärter. Die Verhältnisse R_0 lauten 96.0% (Bicron) zu 87.5% (Polifi) und die Verhältnisse R_{24} 79.6% (Bicron) zu 57.9% (Polifi).

Jeweils drei Exemplare dieser beiden Fasersorten von Bicron und Pol.hi.tech wurden auch mit verspiegelten Fasernfrontenden einer Gammabestrahlung von 500 kGy unterzogen. Die Bicron BCF-12 wiesen nach Bestrahlung eine durchschnittliche Abschwächungslänge von 99.3 cm (RMS = 12.9%) auf, während die Polifi 0042-050 eine durchschnittliche Abschwächungslänge von 50.3 cm (RMS = 8.3%) hatten.

Faser-sorte	Emissions-farbe	Emissions-peak [nm]	Abschwächungs-länge λ_{att} [cm]	R_0 %	R_{24} %
Durchmesser 0.5mm					
Bicron BCF-60	grün	530	141.5	102.7	97.2
Bicron BCF-20	grün	492	39.6	90.2	88.2
Polifi 0048-050	grün	481	28.7	97.0	82.5
Bicron BCF-12	blau	435	55.8	96.0	79.6
Kuraray SCSF-81N	blau	≈ 435	36.6	/	82.6
Kuraray SCSF-62	blau	unbekannt	57.0	99.0	80.3
Kuraray SCSF-76	blau	unbekannt	63.0	96.0	83.5
Kuraray SCSF-77	blau	unbekannt	67.7	105.6	80.8
Polifi 0042-050	blau	420	24.5	87.5	57.9
Polifi 0046-050	blau	435	40.1	96.0	74.3
Durchmesser 1.0mm					
Kuraray SCSF-3HF	grün	unbekannt	109.8	97.0	98.5
Kuraray SCSF-81	blau	≈ 435	33.0	98.2	77.1
Polifi 0042-100	blau	420	25.6	89.5	45.5
Polifi 0046-100	blau	435	62.9	90.2	75.4

Tabelle 5.4: Vergleich verschiedener Fasersorten hinsichtlich Strahlenhärte nach einer Strahlendosis von 5kGy. Dargestellt sind Emissionsfarbe und Emissionspeak der unbestrahlten Fasern, Abschwächungslänge λ_{att} bestrahlter Fasern, Verhältnisse $R_0 = I_0^{nachBestr.}/I_0^{vorBestr.}$ der unabgeschwächten Lichtausbeuten I_0 bei Distanz Anregungsort-Ausleseende $x = 0$ cm und die Verhältnisse $R_{24} = (I_{24}/I_0)^{nachBestr.}/(I_{24}/I_0)^{vorBestr}$ der auf die unabgeschwächten Lichtausbeuten I_0 normierten Lichtausbeuten I_{24} bei der Distanz Anregungsort-Ausleseende $x = 24$ cm.

5.2.3 Strahlenerholung einzelner Fasern

Es sollte festgestellt werden, ob Strahlenschäden, die in Fasern bei einer Bestrahlung verursacht werden, innerhalb einiger Tage teilweise wieder verschwinden. Zu diesem Zweck wurden zehn Bicron BCF-12 Fasern in Luftatmosphäre bestrahlt. Die Dosis der Gammabestrahlung betrug 5 kGy bei einer Dosisleistung von 2 kGy/h. Da bei dieser Dosis weniger der Szintillationsprozeß, als vielmehr die Lichtleitung beeinträchtigt wurde, wurden die Abschwächungslängen als Anzeiger der Strahlenbelastung benutzt. Die Abschwächungslängen wurden sowohl vor der Bestrahlung, als auch zu verschiedenen Zeiten nach der Bestrahlung ermittelt. Die Lagerung der Fasern erfolgte bei Zimmertemperatur von etwa 20°C in Luft.

In Abbildung 5.9 sind die Mittelwerte der Abschwächungslängen als Funktion der Zeit nach der Bestrahlung aufgetragen. Die Messung vor der Bestrahlung erbrachte einen Mittelwert der Abschwächungslänge der Fasern von 111.6 cm. Die erste Messung zwei Stunden nach Bestrahlung ergab eine mittlere Abschwächungslänge von 47.4 cm (42.5% des Ursprungswertes). Vier Tage danach war die Abschwächungslänge wieder leicht um 16% auf 55.2 cm angestiegen. Eine weitere Tendenz zu längeren Abschwächungslängen konnte danach innerhalb von 24 Tagen nicht mehr festgestellt werden.

Abschließend bleibt festzuhalten, daß innerhalb von einigen Tagen nur ein sehr kleiner Erholungseffekt bezüglich Strahlenschäden sichtbar wurde. Erholungseffekte, die in sehr kurzen Zeiträumen auftreten (von Bestrahlungsbeginn bis zu 2 h danach), konnten nicht untersucht werden, sind aber nicht auszuschließen.

5.2.4 Lichtausbeute bestrahlter Kleinmodule

Es sollten die Auswirkungen von Strahlenschäden auf Blei-Faser-Module unterschiedlicher Bauweise untersucht werden. Insbesondere interessierte, ob die Verwendung von Klebstoff einen Einfluß auf die Höhe des Strahlenschadens hat. Deshalb wurden die vier in Kapitel 4.2 beschriebenen, sogenannten Kleinmodule getestet. Sie wurden mit einer Dosis von 25 kGy bei einer Dosisleistung von 1.25 kGy/h bestrahlt.

Nach der Bestrahlung wiesen die Fasern aller Module eine Verfärbung auf. Die blauen Fasern waren grün verfärbt und die grünen Fasern gelb-orange. Bei den geklebten Modulen trat die Verfärbung jedoch intensiver auf als bei den ungeklebten Modulen. Erwähnenswert ist auch die Tatsache, daß die Fasern der geklebten Module unregelmäßig stark verfärbt waren. Fasern, die vollständig von Klebstoff umgeben waren, zeigten eine stärkere Verfärbung als Fasern, die sehr paßgenau in den Rillen der Module lagen und deshalb weniger vom Klebstoff umgeben waren. Innerhalb der Untersuchungszeit von 142 Tagen nach der Bestrahlung wurde bei keiner Faser eine deutlich sichtbare Entfärbung festgestellt.

Abbildung 5.10 zeigt die gemessene Auswirkung der Bestrahlung auf die Lichtausbeuten (das Licht wurde durch etwa 10 cm zurückzulegenden Weg in den Fasern

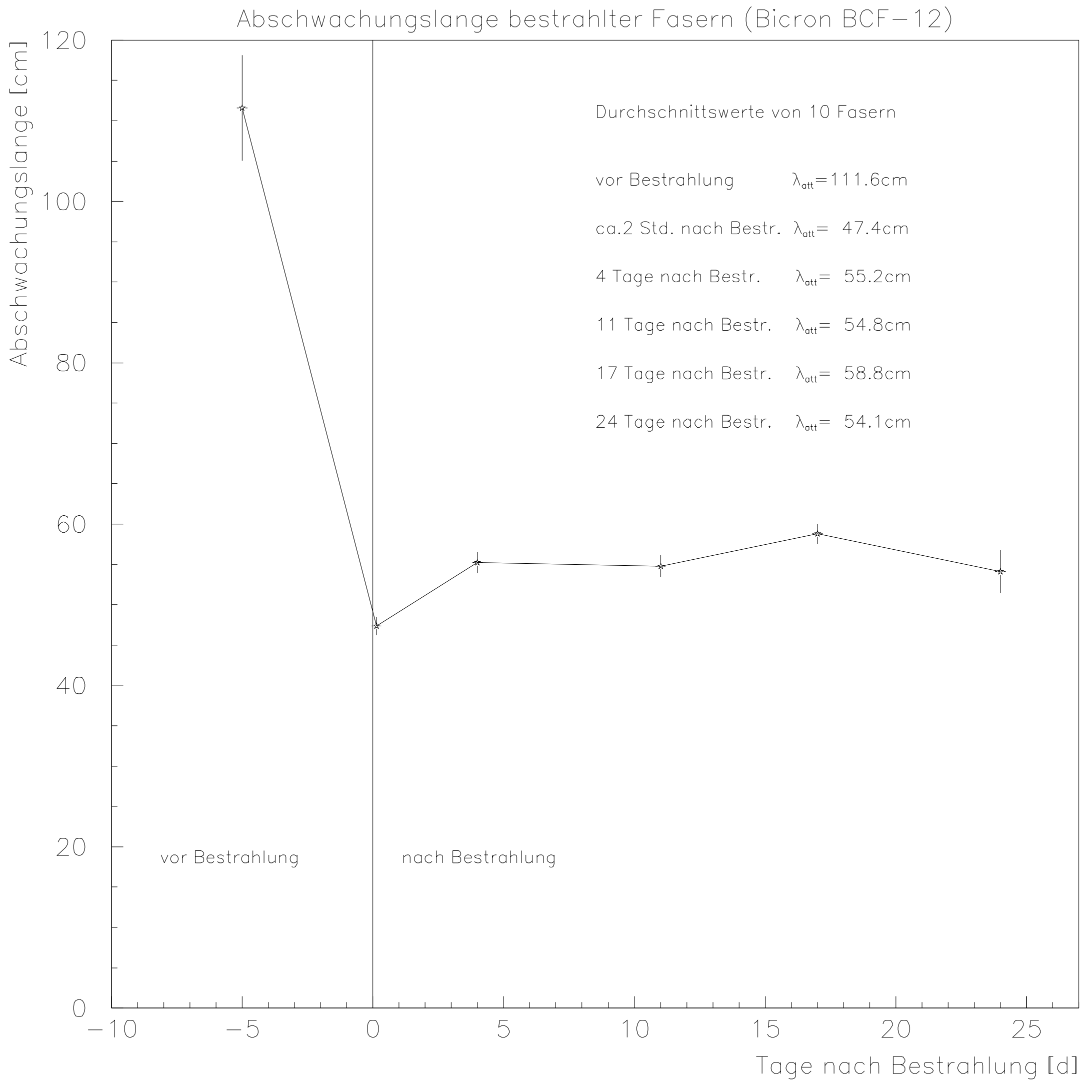

Abbildung 5.9: Abschwächungslänge einer Faser, (Durchschnittswerte von je 10 Fasern, Bicron BCF-12), als Funktion der Zeit nach Bestrahlung.

abgeschwächt). Die Lichtausbeuten wurden jeweils ohne Filter und mit einem Filter, der den Wellenlängenbereich unter 435 nm absorbiert, ausgelesen. Die ohne Filter gemessenen Lichtausbeuten der unbestrahlten Module wurden auf 100% normiert. Die übrigen Lichtausbeuten sind als prozentuale Anteile von jenen in Abhängigkeit von der Zeit nach Bestrahlung dargestellt.

Die ohne Filter gemessenen Lichtausbeuten der geklebten Module 1 und 2 weisen bei der Messung, die zwei Stunden nach Bestrahlung erfolgte, erhebliche Einbußen auf etwa 10% des Ursprungswerts vor der Bestrahlung auf. Bei den nicht geklebten Modulen 3 und 4 sind diese Einbußen weniger drastisch. Hier betragen die Lichtausbeuten zwei Stunden nach der Bestrahlung 67% (Modul 3, blaue Faser) und 45% (Modul 4, grüne Fasern). Der Unterschied im Verhalten der geklebten und ungeklebten Module zwei Stunden nach Bestrahlung könnte bedeuten, daß auf Sauerstoff beruhende Strahlenerholungseffekte schon innerhalb dieser Zeit auftreten, oder daß im Klebstoff entstehende Ionenradikale zusätzlich zur Strahlenschädigung beitragen.

Die vergleichenden Filtermessungen zeigen, daß die Lichtausbeuten des Modul 1 (blaue Fasern, eingeklebt) keinen blauen Anteil unter 435 nm mehr beinhalten. Denn die Lichtausbeuten nach Bestrahlung sind mit und ohne Filter ausgelesen gleich. Die Lichtausbeuten von Modul 2 (blaue Fasern, nicht eingeklebt) dagegen unterscheiden sich in den Werten. Hier sind noch Lichtanteile unter 435 nm enthalten. Die mit grünen Fasern bestückten Module haben schon vor der Bestrahlung keine blauen Lichtanteile unter 435 nm. Daran ändert die Bestrahlung natürlicherweise nichts.

Bis auf Modul 2 (grüne Fasern, eingeklebt) zeigen die Module noch nach der ersten Messung einen weiteren Rückgang der Lichtausbeuten. Die Lichtausbeuten nehmen dann aber bei allen Modulen nach einigen Tagen wieder zu. Diese Zunahme kann als Strahlenerholung gedeutet werden. Die beiden jeweils letzten Messungen 89 und 142 Tage nach Bestrahlung ergeben ein Ende dieses Prozesses; die Lichtausbeuten sind dann jeweils nahezu gleich.

Vergleicht man die ohne Filter am 142-ten Tag nach Bestrahlung gemessenen Lichtausbeuten, so ergeben sich folgende Werte: 9% für Modul 1 (blaue Fasern, eingeklebt), 28% für Modul 2 (grüne Fasern, eingeklebt), 52% für Modul 3 (blaue Fasern, nicht eingeklebt) und 49% für Modul 4 (grüne Fasern, nicht eingeklebt).

Abschließend kann aufgrund der Ergebnisse eine größeres Maß an Strahlenschädigung bei den geklebten Kleinmodulen festgestellt werden. Dies ist besonders bei den mit blauen Fasern aufgebauten Modulen zu beobachten.

5.2.5 Lichtausbeute und Lichtabschwächung bestrahlter Einschichtmodule

Mit den in Kapitel 4.3 beschriebenen vier Einschichtmodulen, bestückt mit blauen Fasern (Bicron BCF-12), sollte eine eventuelle Abhängigkeit der Höhe des Strah-

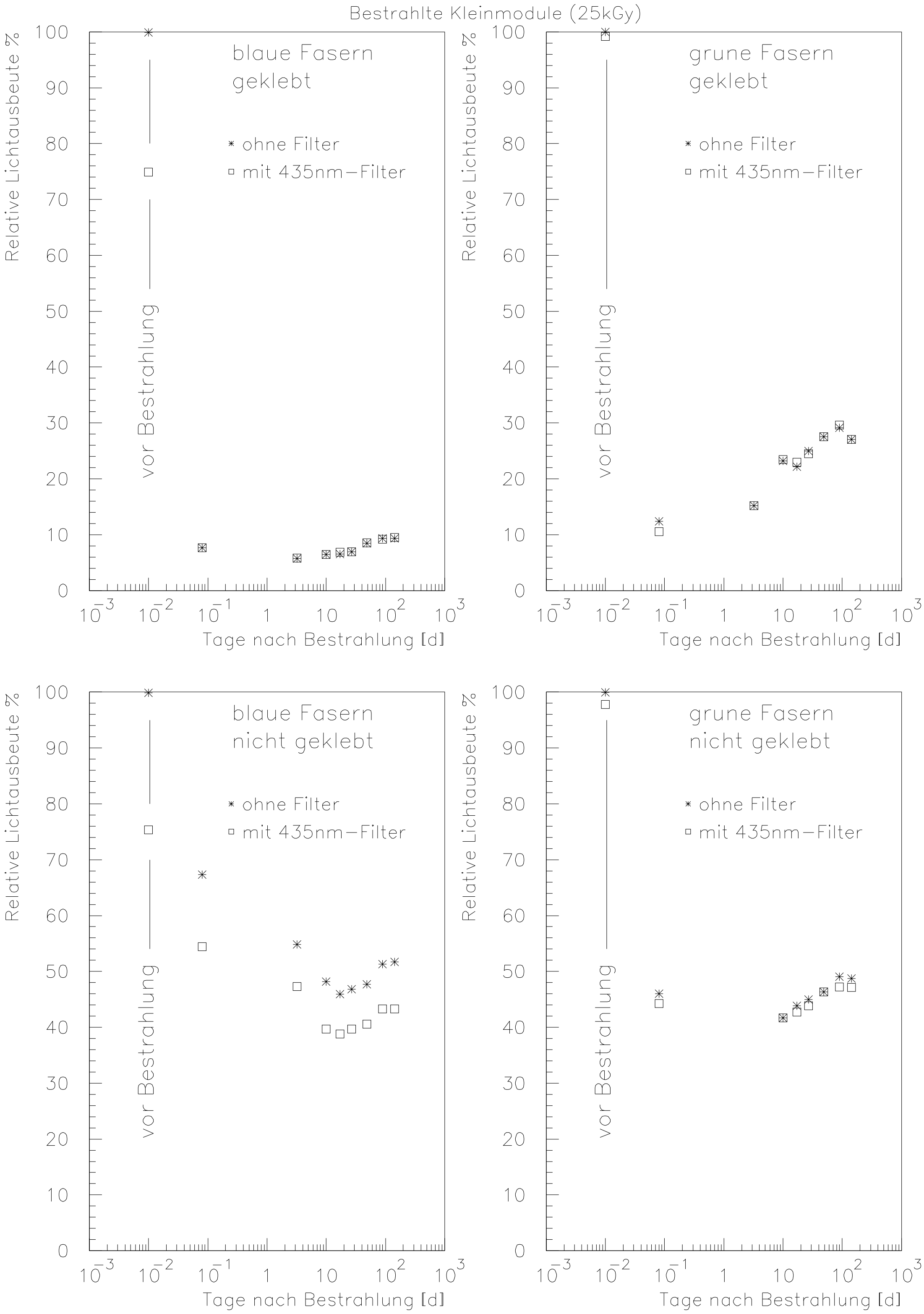

Abbildung 5.10: Lichtausbeuten von Kleinmodulen in Abhängigkeit von der Zeit nach Bestrahlung. Die Lichtausbeuten mit und ohne Filter gemessen, sind jeweils auf den Wert vor Bestrahlung, ohne Filter, normiert.

lenschadens von der Faserumgebung (Argon, Luft, Epoxidklebstoff und Polyesterklebstoff) getestet werden. Außerdem die Abhängigkeit von der Strahlendosis. Die Bauweise der Einschichtmodule erlaubte, wie bei den Einzelfasern und anders als bei den Kleinmodulen, eine Messung von ganzen Abschwächungskurven. Mit Hilfe dieser Kurven wurden die unabgeschwächten Lichtausbeuten I_0 bei der Entfernung Anregungsort-Ausleseende von $x = 0$ cm bestimmt. Und als Maß für die Abschwächung des Lichts in der Faser allein aufgrund der Strahlenschäden, wurden die Verhältnisse

$$R_{24} = (I_{24}/I_0)^{nachBestr.}/(I_{24}/I_0)^{vorBestr.}$$

der (jeweils auf die unabgeschwächten Lichtausbeuten I_0 bei $x = 0$ cm normierten) Lichtausbeuten I_{24} bei $x = 24$ cm gebildet.

Es fanden drei einzelne Bestrahlungen der Einschichtmodule mit 0.5 kGy, 2 kGy und 5 kGy bei einer jeweiligen Dosisleistung von 2 kGy/h statt. Zwischen den Bestrahlungen gab es Pausen von 1 bis 2 Tagen, in denen die Abschwächungskurven gemessen wurden.

Die Abbildungen 5.11 zeigen die unabgeschwächten Lichtausbeuten I_0 und die Lichtabschwächungen, ausgedrückt durch R_{24}, als Funktion der aufsummierten Dosen (0.5 kGy, 2.5 kGy und 7.5 kGy). Wegen der besseren Übersicht sind zu einem Modul gehörige Werte mit einer Linie verbunden. Im Unterschied zu den bestrahlten Einzelfasern sind bei allen Modulen größere Einbußen der Lichtausbeuten I_0 zu verzeichnen, die weniger als direkt proportional mit der Bestrahlungsdosis abnehmen. Mit Ausnahme des mit Polyester geklebten Moduls verhalten sich alle Module bezüglich der Lichtausbeuten nahezu gleich. Das polyestergeklebte Modul spricht dagegen mit Abstand stärker auf die Bestrahlung an. Bei einer aufsummierten Dosis von 7.5 kGy bleibt hier von der ursprünglichen Lichtausbeute vor der Bestrahlung nur 42% über, während die übrigen noch 59 bis 63% der ursprünglichen Werte aufweisen.

Beim Maß der Abschwächung R_{24}, treten die Unterschiede bei allen Modulen nach der Bestrahlung deutlicher zu Tage. Bei der aufsummierten Dosis von 7.5 kGy variieren die Werte von R_{24} von 60% des ursprünglichen Wertes (Argon-Modul) über 51% (Luft-Modul) und 37% (Epoxid-Modul) bis runter zu 5% (Polyester-Modul). Die geklebten Einschichtmodule zeigen also die größte Empfindlichkeit gegen Bestrahlung. Der Unterschied zu den beiden nicht geklebten Einschichtmodulen könnte ein Hinweis darauf sein, daß in den Klebstoffen entstandene Strahlenradikale die Fasern zusätzlich schädigen und dies besonders beim mit Polyester geklebten Modul.

Sauerstofflose Atmosphäre wie Argon hat nach diesen Versuchen keine negative Wirkung auf die Resistenz der Fasern gegen ionisierende Bestrahlung. Diese Feststellung ist bedeutsam, da das in der rückwärtigen H1-Region eingebaute SPACAL während des HERA-Betriebes einer Stickstoffatmossphäre ausgesetzt werden wird. Die Untersuchungen mit den Einschichtmodulen deuten darauf hin, daß die Verwendung von Klebstoff beim Einbau der Fasern in die Bleiplatten, im späte-

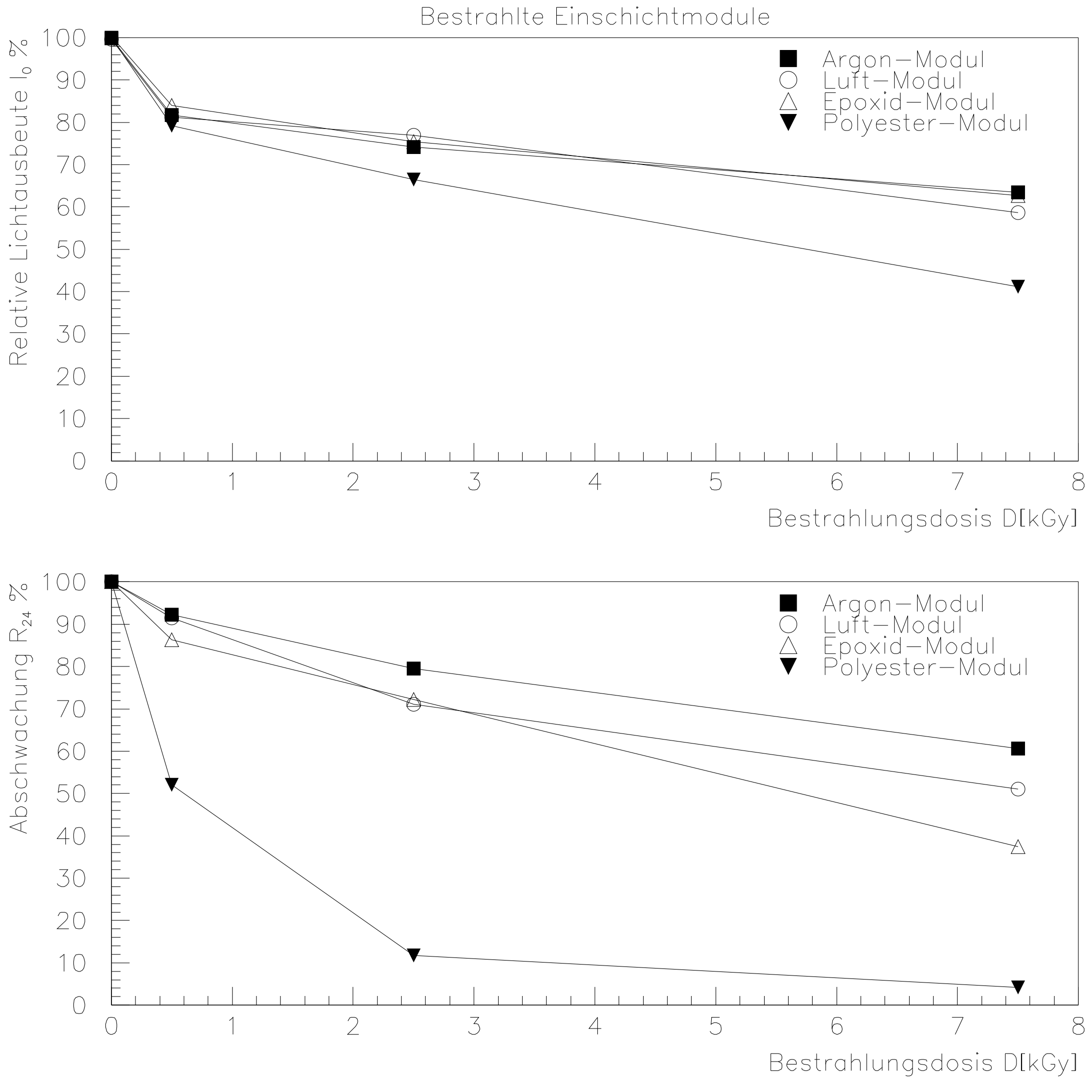

Abbildung 5.11: Unabgeschwächte Lichtausbeuten I_0 und die Verhältnisse $R_{24} = (I_{24}/I_0)^{nachBestr.}/(I_{24}/I_0)^{vorBestr.}$ der Einschichtmodule in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdosis. I_0 und I_{24} sind die Lichtausbeuten der Module bei den Distanzen Anregungsort-Ausleseenden von $x = 0$ cm und $x = 24$ cm. Die dargestellten Werte sind jeweils auf die Werte vor Bestrahlung normiert.

ren Sphagettikalorimeter einen zusätzlichen Qualitätsverlust in den Betriebsjahren verursachen kann.

Kapitel 6

Zusammenfassung

Im Rahmen des H1-Projekts zum Bau eines Spaghettikalorimeters befate sich diese Arbeit mit Untersuchungen an kurzen, maximal etwa 30 cm langen Szintillationsfasern. Die folgenden Untersuchungen wurden durchgeführt:

- Vergleich verschiedener kommerziell erhältlicher Fasersorten der drei Herstellerfirmen Bicron, Kuraray und Pol.hi.tech. Vergleichskriterien waren Lichtausbeute, Abschwächungslänge und Strahlenhärte.

- Untersuchung von Maßnahmen zur möglichen Verbesserung der optischen Fasereigenschaften wie Auskopplung von Mantellicht, Benutzung von Filtern und Verspiegelung der Faserfrontenden.

- Untersuchung von möglichen Problemen bei der Verwendung der Fasern im Kalorimeter: Schwankungen der Faserdicken und mechanische Unregelmäßigkeiten, Schwankungen der Lichtausbeute innerhalb einer Fasersorte, Lichtverlust durch gekrümmte Fasern, Klebstoff auf der Faseroberfläche und Verhalten der Fasern nach ionisierender Bestrahlung (speziell bei unterschiedlichen Faserumgebungen wie Luft, sauerstofflose Atmosphäre und Klebstoff).

Der Vergleich von 14 verschiedenen Fasersorten zeigte, daß bei der Verwendung von Netzdynoden-Photomultipliern von Hamamatsu blaue Fasern durchschnittlich etwa doppelt so hohe Lichtausbeuten liefern wie Faser, die ihr Emissionsspektrum im grünen Wellenlängenbereich haben. Damit sind die Emissionsspektren blauer Fasern besser an die Strahlungssensitivität der im Spaghettikalorimeter einzusetzenden Photomultiplier angepaßt. Die Abschwächungslängen der Fasern wiesen unabhängig von den Emissionsspektren große Unterschiede von etwa 37 cm bis 170 cm auf.

Die Fasern sollen flache Abschwächungskurven mit möglichst großen Abschwächungslängen über 1 m haben. Bei der Untersuchung von Maßnahmen zur Verbesserung der optischen Fasereigenschaften hat sich die Auskoppelung von Mantellicht als notwendig erwiesen, da das Mantellicht eine Abschwächungslänge von nur wenigen Zentimetern hat. Es reicht die Fasern jeweils etwa 1 cm am Ausleseende schwarz zu färben.

Die Verspiegelung der Faserfrontenden ist eine geeignete Methode, sowohl die Lichtausbeute, als auch die Abschwächungslänge zu verbessern. Die Lichtausbeute stieg bei verspiegelten Fasern um mehr als 30% und die Abschwächungslänge war etwa um einen Faktor 3 größer. Ein weiterer Vorteil verspiegelter Fasern gegenüber unverspiegelten waren die geringfügig kleineren Schwankungen der Lichtausbeuten. Die Verwendung von Filtern, die die kurzen Wellenlängen unterdrücken, hat dagegen bei einer Verlängerung der Abschwächungslängen auch einen Rückgang der Lichtausbeuten zur Folge.

Schwankungen der optischen Fasereigenschaften wurden bei den Fasersorten Bicron BCF-12 und Polifi 0042-050 untersucht. Bei den Bicron-Fasern wurde für die Lichtausbeuten eine Standardabweichung der Einzelwerte RMS von 7.9% bei einer Meßunsicherheit von 3% gemessen. Die mittlere Abschwächungslänge war 108 cm bei einem RMS von 21.8%. Anstrengungen des Herstellers, die Schwankungen zu verkleinern wären wünschenswert. Die Pol.hi.tech-Fasern haben bei den Lichtausbeuten einen RMS von 5.8% und bei einer mittleren Abschwächungslänge von 61 cm einen RMS von 13.7%.

Die optischen Eigenschaften der beiden aufgrund der Messungen favorisierten Fasersorten sind in einem qualitativen Vergleich gegenübergestellt:

Bicron BCF-12

- größere Abschwächungslänge
- strahlenhärter

Polifi 0042-050

- höhere unabgeschwächte Lichtausbeute
- kleinere Schwankungen von Lichtausbeute und Abschwächungslänge

Die mechanischen Eigenschaften von Bicron- und Pol.hi.tech-Fasern entsprechen den Anforderungen. Die Fasern von Kuraray können trotz guter optischer Eigenschaften nicht für das SPACAL genutzt werden. Hier haben die Fasern einen Krümmungsradius von 50 cm, der auf die Lagerung der Fasern auf Rollen zurückzuführen ist.

An mit Klebstoff präparierten Abschnitten der Fasern traten Verluste der Lichtausbeuten von etwa 10% auf. Vermutlich liegt dies in der Auskopplung von primären UV-Photonen begründet. Eine teilweise Fixierung der Fasern in den Bleiplatten mit Klebstoff würde danach örtliche Inhomogenitäten der Signale im Kalorimeter verursachen.

Aufgrund von Signalinhomogenitäten bei Scans von Blei-Faser-Prototypen wurden Lichtverluste gekrümmter Fasern untersucht. Lichtverluste der Fasern von über 5% wurden jedoch erst bei Krümmungsradien unterhalb von 3 cm beobachtet, so daß sie im Kalorimeter keine große Rolle spielen sollten.

Versuche mit ionisierender Bestrahlung bis 5 kGy haben gezeigt, daß besonders die Lichtabschwächung in der Faser vergrößert wird und weniger ein Verlust der intrinsischen Lichtausbeute stattfindet. Einen Vorteil haben die grünen Fasern hinsichtlich Strahlenhärte. Die Lichtabschwächung in der Faser aufgrund von Strahlenschäden ist hier geringer als bei den blauen Fasern. Es konnte auch festgestellt werden, daß Einbettung der Fasern in Klebstoff einen negativen Effekt auf die Resistenz der Fasern gegen Bestrahlung hat. Möglicherweise entstehen Ionenradikale in Klebstoffen, die zur Strahlenschädigung der Fasern beitragen. Anwesenheit von Argonatmosphäre hatte keinen negativen Effekt auf die Strahlenresistenz der Fasern. Verspiegelte Fasern der Sorte Bicron BCF-12, die in Luft bei einer Dosis von 5 kGy bestrahlt wurden, wiesen noch Abschwächungslängen von knapp 1 m Länge auf. Nach Schätzungen wird in einem Jahr eine Strahlenbelastung von maximal 0.35 kGy auftreten, so daß zumindest für verspiegelte in Luft eingelegte Fasern dieser Sorte für einen längeren Zeitraum ausreichende Strahlenresistenz besteht.

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

[Amo90] **N. A. Amos et. al.**, *Optical attenuation length measurements of scintillating fibers*, Nucl. Instr. Meth. A297 (1990) 396-336

[App93] **R. D. Appuhn et. al.**, *Performance Tests with a Large Sample of Fine Mesh Photomultipliers for Use at 1.2 Tesla*, ProceedingsIV. Int. Conf. on Calorimetry in High Energy Physics, La Biodola, Italy (1993), zur Veröffentlichung eingereicht

[App94] **R. D. Appuhn**, *private Mitteilung*, 1994

[Bat70] **G. Bathow et. al.** *Measurements of the Longitudinal and Transversal Development of Electromagnetic Cascades in Lead, Chopper and Aluminium at 6 GeV*, Nucl. Phys. B20 (1970) 592

[Bic92] **Bicron** *Scintillating Optical Fibers*, Katalog 1992

[Bip93] **Th. Bipp**, Diplomarbeit, in Vorbereitung 1993

[Bro91] **A. D. Bross**, *Scintillating plastic optical fiber radiation detektors in high energy particle physics*, Proceedings of the SPIE conference on Optical Fiber technology, Boston, Massachusetts 1991

[Fin90] **G. Finsel et. al.**, Nucl. Instr. Meth. A290 (1990) 450

[For60] **Th. Förster**, *Comparative Effects of Radiation*, John Wiley, New York 1960

[Gen91] **M. Gennis**, *Eigenschaften von Modulen des elektromagnetischen Rückwärtskalorimeter (BEMC) des H1-Detektors*, Dissertation, Universität Hamburg 1991

[Gil93] **K. T. Gillen et. al.**, *Dose-rate dependence of the radiation-induced discoloration of polystyrene*, Radiat. Phys. Chem. Vol. 41, No. 1/2, pp. 101-103, 1993, Pergamon Press Ltd. 1993

[Gil92] **R. S. Gilmore**, *Single particle detection and measurement*, Taylor and Francis, London 1992

[H1 93a] **H1 Collaboration**, *The H1 Detector at HERA*, Hamburg 1993

[H1 93b] **H1 Collaboration**, *A search for Leptoquarks, Leptogluons and Excited Leptons in H1 at HERA*, Hamburg 1993

[H1 93c] **H1 Collaboration**, *Technical Proposal to Upgrade the Backward Scattering Region of the H1 Detector*, Hamburg 1993

[H1 92] **H1 Collaboration**, *Observation of Deep Inelastic Scattering at Low x*, Hamburg 1992

[Haw90] **C. M. Hawkes et. al.**, *Decaytime and light yield measurements for plastic scintillating fibers*, Nucl. Instr. Meth. A292 (1990)329-336

[Her90] **D. W. Herzog et. al.**, Nucl. Instr. Meth. A294 (1990) 446-458

[Hei85] **Walter E. Heinlein**, *Grundlagen der faseroptischen Übertragungstechnik*, Teubner Studienbücher, Stuttgart 1985

[Hur90] **Ch. Hurlbut**, *Experiences and capabilities of scintillating fiber production*, Proceedings of the Workshop on Application of Scintillating Fibers in Particle Physics,Blossin 1990

[Jan93] **J. Janoth et. al.**, DESY 93-119 (1993), zur Veröffentlichung eingereicht an Nucl. Instr. Meth.

[Joh93] **K. F. Johnson**, *private Mitteilung*, 1993

[Kur93] **Kuraray Co., Ltd.**, *private Mitteilung*, 1993

[Leo92] **W. R. Leo**, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, Berlin, 1992

[Mol47] **G. Molière**, *Theorie der Streuung schneller, geladener Teilchen*, Z. Naturforsch. 2a (1947) 133 und Z. Naturforsch. 3a (1948) 78

[Ott53] **K. Ott**, *Die Einzelprozesse der Elektronen und Lichtquanten*, in W. Heisenberg (Herausgeber), Kosmische Strahlung, Springer Verlag, 1953

[Par92] **Particle Data Group**, *Particle Properties data Booklet*, American Institute of Physics, 1992

[Per91] **Donald W. Perkins**, *Hochenergiephysik*, Addison-Wesley (Deutschland) GmbH, Bonn 1991

[Perr81] **D. Perrin and P. Sonderegger**, CERN OM ISPS 181-7, Cern 1981

[Pro93] **J. Proudfood**, *Conference Summary*, Radiat. Phys. Chem. Vol. 41, No. 1/2 , pp. 1-9, 1993

[RD91] **The RD1 Collaboration**, *Status report to the DRDC*, CERN/DRDC 91-50, Cern 1981

[Seg65] **E. Segrè**, *Nuclei and Particles*, W. A. Benjamin, 1965

[Wal93] **J. S. Wallace et. al.**, *Color center annealing in γ-irradiated polystyrene, under vakuum and air atmospheres*, Radiat. Phys. Chem. Vol. 41, No. 1/2, pp. 85-100, 1993, Pergamon Press Ltd., 1993

[Walt93] **Albin Walther**, *private Mitteilung*, 1993

[Zor93] **C. Zorn**, *A pedestrians guide to radiation damage in plastic scintillators*, Radiat. Phys. Chem. Vol. 41, No. 1/2, pp. 37-43, 1993, Pergamon Press Ltd., 1993

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen herzlich bedanken, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen meiner Diplomarbeit beigetragen haben.

- Herrn Dr. F. Brasse für die Themenstellung und die Ermöglichung der Arbeit in der DESY-Forschungsgruppe FH1K.
- Frau Prof. Dr. B. Naroska für das Interesse an dieser Arbeit und der Übernahme des Koreferats.
- Herrn Dr. V. Korbel für die gute Betreuung der Arbeit und für zahlreiche Diskussionen und Anregungen.
- G. Falley, K. Thiele und P. Smirnov für ihre freundliche Hilfsbereitschaft bei der Lösung technischer Probleme.
- Dr. Ivan Herynek, Marc Müller und Michael Sievers für die Unterstützung bei vielen Messungen.
- allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe für das gute Arbeitsklima und die ständige Hilfsbereitschaft. Besonders seien namentlich genannt: Dr. R. D. Appuhn, Dipl. Phys. R. Buchholz, Dr. G. Müller, Dr. A. Walther und Dr. M. Weber.
- meinen Mit-Diplomanden Thomas Bipp und Frank Lehner für interessante Diskussionen vielfältiger Art.

Abschließend danke ich besonders meinen Eltern für die moralische und finanzielle Unterstützung des Studiums und meiner Freundin Andrea für das gemeinsame Bestehen der teilweise schwierigen Umstände der Arbeit.