

Interner Bericht
DESY F35-92-03
Dezember 1992

**Experimentelle und theoretische
Untersuchungen zur longitudinalen
Uniformität des ZEUS-Kalorimeters
mit punktförmigen Präparaten**

von

B. Krebs

Eigentum der	DESY	Bibliothek
Property of		library
Zugang:	21. JAN. 1993	
Accessions:		
Leihfrist:	7	Tag e
Loan period:		days

DESY behält sich alle Rechte für den Fall der Schutzrechtserteilung und für die wirtschaftliche Verwertung der in diesem Bericht enthaltenen Informationen vor.

DESY reserves all rights for commercial use of information included in this report, especially in case of filing application for or grant of patents.

**“Die Verantwortung für den Inhalt dieses
Internen Berichtes liegt ausschließlich beim Verfasser”**

**Experimentelle und theoretische
Untersuchungen zur longitudinalen
Uniformität des ZEUS-Kalorimeters
mit punktförmigen Präparaten**

DISSERTATION ✓

zur Erlangung des Doktorgrades
des Fachbereichs Physik
der Universität Hamburg

vorgelegt von
Bodo Krebs
aus Bad Schwartau

Hamburg
1992

Gutachter der Dissertation Prof. Dr. K. Wick
Prof. Dr. H. -H. Duhm
Gutachter der Disputation Prof. Dr. K. Wick
Prof. Dr. W. Scobel

Datum der Disputation: 01.12.1992

**Sprecher des
Fachbereichs Physik und
Vorsitzender des
Promotionsausschusses:** Prof. Dr. G. Mack

Abstract

The ZEUS experiment at the HERA accelerator in DESY, Hamburg, relies on a high resolution calorimeter for many of its physics measurements.

This calorimeter is made from alternating layers of depleted uranium and plastic scintillator tiles read out using light guides doped with wavelength shifting dyes.

In order to achieve excellent energy resolution and a calibration at the level of one percent, much attention has been paid to the longitudinal uniformity of this device. Test beam results indicate that design goals have been met.

However the uniformity of the calorimeter can be degraded by several factors. Mechanical damage to, or shifting of, the light guides and scintillator tiles during transport of the modules are examples. Ageing and the effects of radiation on the optical properties of the components could also cause changes in the calorimeter response.

This thesis describes the system designed to monitor such effects. A computer controlled driver moved a ^{60}Co gamma ray source along the towers of the calorimeter modules to measure their longitudinal uniformity.

The attenuation lengths of the light guides and of individual scintillator tiles were also measured. In addition, it was found that one could use the ^{60}Co signal as an absolute reference for energy calibration purposes.

All 48 modules of the forward and rear calorimeters were scanned using this system and the results were used to detect several minor assembly faults. It was possible to correct most of these before the modules were installed in the ZEUS detector. The data from these scans will be stored in a data base to be used for comparison with future measurements. This will be useful for detecting radiation damage and ageing effects.

Kurzfassung

Das ZEUS-Experiment des HERA-Beschleunigers bei DESY in Hamburg benötigt für viele seiner physikalischen Messungen ein hoch auflösendes Kalorimeter.

Dieses Kalorimeter besteht aus sich abwechselnden Lagen von angereichertem Uran und Plastikszintillatoren, welche von Lichtleitern ausgelesen werden, die mit wellenlängenverschiebenden Fluoreszenzfarbstoffen dotiert sind.

Um eine exzellente Energieauflösung und eine Kalibration auf dem Niveau von einem Prozent zu erhalten, ist eine sehr gute longitudinale Uniformität des Kalorimeters nötig. Teststrahlexperimente zeigten, daß die angestrebten Zielsetzungen erreicht wurden.

Die Uniformität des Kalorimeters kann sich durch verschiedene Einflüsse verschlechtern. Mechanische Beschädigungen an den Lichtleitern oder durch den Transport der Module verschobene Lichtleiter respektive Szintillatoren geben Beispiele dazu.

Alterung und der Einfluß von radioaktiver Strahlung auf die Eigenschaften der optischen Komponenten können ebenfalls eine Änderung der Kalorimeterantwort bewirken.

Die vorliegende Arbeit beschreibt den Meßaufbau, der zum Untersuchen solcher Einflüsse entwickelt wurde. Ein rechnergesteuerter Motor bewegt ein ^{60}Co -Präparat entlang der Türme der Kalorimetermodule, um die longitudinale Uniformität zu messen.

Die Abschwächlängen der Lichtleiter und einzelner Szintillatoren wurden ebenfalls gemessen. Ferner zeigte sich, daß das ^{60}Co -Signal auch als absolutes Signal für Kalibrationszwecke einsetzbar ist.

Alle 48 Module des Vorwärts- und Rückwärtskalorimeters wurden mit diesem Meßaufbau vermessen. Die Ergebnisse zeigten verschiedene kleinere Aufbaufehler, von denen die meisten vor dem Einbau der Module in den ZEUS-Detektor behoben werden konnten. Weiterhin dienen sie als Grundlage für den Vergleich mit späteren Messungen, um Strahlenschäden und Alterungseffekte zu messen.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Das ZEUS-Kalorimeter	4
1.1 Elektromagnetische Schauer	4
1.2 Hadronische Schauer	5
1.3 Der Aufbau des ZEUS-Kalorimeters	7
2 Versuchsbeschreibung	11
2.1 Versuchsaufbau	12
2.1.1 Innenabtastung	12
2.1.2 Außenabtaster für die Serienmessungen	13
2.1.3 Außenabtaster für das ZEUS-Kalorimeter	17
2.2 Aufbau des Eichpräparates	17
2.2.1 Eichpräparat für die Innenabtastung	19
2.2.2 Eichpräparat für die Außenabtastung	21
2.3 Vorschubsystem des Eichpräparates	23
2.4 Datennahmesystem	24
2.5 Versuchsdurchführung	27
2.5.1 Einstellen der Photomultiplier-Betriebsspannungen	27
2.5.2 Meßbetrieb	28
2.5.3 Datenmenge und Zeitaufwand	28
3 Anregung einer Kalorimetersektion mit einem ⁶⁰Co-Präparat	30
3.1 Wechselwirkung von γ -Quanten mit Materie	30
3.2 Szintillatoranregung und ihre Auslese	32
3.3 Energiedeposition in einer Kalorimetersektion	37
3.4 Reproduzierbarkeit der Antwortfunktionen	41
3.5 Rückstreuung von γ -Quanten am Konstruktionsmaterial	46
4 Monte-Carlo-Simulationen	50
4.1 Die Abschneideparameter	51
4.2 Geometrie der simulierten Kalorimetersektion	55
4.3 Ergebnisse	55
5 Prüfung der mechanischen Qualität des ZEUS-Kalorimeters	61
5.1 Stapelfehler einzelner Sektionen	62
5.1.1 Optischer Kontakt durch Stapelfehler	63
5.1.2 Störungen am HES-Schacht	67
5.2 Falsch positionierte Wellenlängenschieber	68
5.2.1 Verschobene Wellenlängenschieber-Kassetten	69
5.3 Störungen der Lichtauslese	71

5.3.1	Störungen am Rückwandreflektor	71
5.4	Inhomogenitäten ungeklärter Ursache	74
6	Abschwächlänge der Wellenlängenschieber	76
6.1	Bestimmung der Abschwächlängen λ_W an ausgebauten Wellenlängenschiebern	77
6.2	Bestimmung der Abschwächlänge λ_W an Wellenlängenschiebern im Kalorimeter	80
6.2.1	Spezielle Messungen zur Bestimmung der Abschwächlänge λ_W	80
6.2.2	Abschwächlängenbestimmung aus Serienmessungen	82
7	Abschwächlänge der Szintillatoren	88
7.1	Diskussion der optischen Parameter	90
7.2	Bestimmung der Abschwächlänge λ_{S_2}	96
7.3	Ergebnisse der Abschwächlänge λ_{S_2}	97
8	Nachweis von Strahlenschäden	102
8.1	Strahlen und Alterungsschäden an den Wellenlängenschiebern	103
8.2	Strahlen- und Alterungsschäden an den Szintillatoren	108
9	Die longitudinale Homogenität der Kalorimetersektionen	111
9.1	Homogenität der hadronischen Sektionen	114
9.2	Homogenität der elektromagnetischen Sektionen	115
10	^{60}Co-Gesamtssignal als Referenzsignal	118
10.1	Reproduzierbarkeit des Gesamtssignals	119
10.2	Nachweis von Inhomogenitäten mit dem ^{60}Co -Gesamtssignal	119
	Zusammenfassung	123
A	Die verschiedenen Wellenlängenschieber-Typen	125
B	Technische Details des Motorenaufbaus und seiner Steuerung	127
B.1	Konstruktion zur Aufnahme der Lichtschranke	127
B.2	Beschreibung der Motorenkontrolleinheit	128
C	Testmethode der Transportröhren	130
D	Belegungsplan der Transportröhren	133
E	Position der Module im ZEUS-Detektor	135
F	Übersicht der Mittelwerte der optischen Parameter für das FCAL und RCAL	138

Abbildungsverzeichnis

1.1	Anordnung der Komponenten FCAL, RCAL und BCAL des ZEUS-Kalorimeters	7
1.2	Sicht auf das Vorwärtskalorimeter	8
1.3	Mechanischer Aufbau eines FCAL-Moduls	9
2.1	FCAL Wellenlängenschieberkassette	12
2.2	Verlauf der Transportröhren eines FCAL-Moduls	14
2.3	Vorderansicht und Seitenansicht des Außenabtasters	16
2.4	Prinzipzeichnung des Außenabtasters für den ZEUS-Detektor	18
2.5	Energiedeposition in den einzelnen Szintillatoren	20
2.6	Ursprünglicher Entwurf des Eichpräparates	21
2.7	Aufbau des Eichpräparates für den Außenabtaster	22
2.8	Komponenten des Datennahmesystems	25
2.9	Antriebsmotoren der Wählscheibe und des Eichpräparates	26
3.1	Massenabsorptionskoeffizient μ/ρ als Funktion der Photonenenergie E_γ	31
3.2	Darstellung der Licht- und Signalauslese im Kalorimeter	33
3.3	Energietransport im Plastikszintillator und Wellenlängenschieber	34
3.4	Lichtausbeute als Funktion des Ortes	35
3.5	Anregung eines $200 \times 191 \text{ mm}^2$ Szintillators mit einem ^{60}Co -Präparat	36
3.6	Anregung eines $200 \times 191 \text{ mm}^2$ Szintillators mit 3 GeV Elektronen	36
3.7	Prinzipdarstellung zur Entstehung einer ^{60}Co -Antwortfunktion	37
3.8	Antwortfunktion einer HAC1-Sektion	38
3.9	Antwortfunktionen eines FEMC-Turmes	39
3.10	Antwortfunktion einer FEMC-Sektion	40
3.11	Antwortfunktion einer FHAC1-Sektion	40
3.12	Wiederholungsmessungen einer FHAC1-Sektion	43
3.13	Wiederholungsmessungen einer FHAC2-Sektion	43
3.14	Positionierungsfehler einer Transportröhre	44
3.15	Antwortfunktion mit einem einzelnen abgedeckten Szintillator	45
3.16	Antwortfunktion eines einzelnen Szintillators	46
3.17	Versuchsaufbau zur Rückstreuung von Teilchen	48
4.1	Flußdiagramm eines EGS4-Monte-Carlo-Programms	52
4.2	Geometrie der simulierten Kalorimetersektion	56
4.3	Aufbau und Koordinatensystem einer Kalorimetersektion	57
4.4	EGS4-Simulation einer REMC-Sektion	57
4.5	Energiedeposition als Funktion der Eindringtiefe d	59
4.6	Mittlere Eindringtiefe \bar{d} in einzelne Szintillatoren	59
4.7	Energieverteilung auf die einzelnen Lagen des Kalorimeters	60
4.8	Energieverteilung auf die einzelnen Szintillatoren	60
5.1	Schematische Darstellung eines Stapelfehlers	62

5.2	Die vier Antwortfunktionen einer FHAC1-Sektion mit verschobenen Szintillatoren . . .	64
5.3	Überlagerte Antwortfunktionen bei verschobenen Szintillatoren	65
5.4	Einfluß eines einzelnen verschobenen Szintillators	66
5.5	Antwortfunktion bei optischem Kontakt eines Szintillators mit dem Wellenlängenschieber	66
5.6	Auswirkungen eines in den HES-Schacht gefallenen Szintillators	68
5.7	Schematische Darstellung einer falsch montierten Wellenlängenschieberkassette	69
5.8	Beispiel einer verschobenen Wellenlängenschieberkassette	70
5.9	Antwortfunktion einer HAC-Sektion mit Störung des Lichtweges	72
5.10	Ein einzelner verdeckter Szintillator	73
5.11	Haftender Rückwandreflektor	73
5.12	Beispiel einer Inhomogenität unbekannter Ursache	75
5.13	Beispiel einer Inhomogenität unbekannter Ursache	75
6.1	Geometrie eines FHAC1-Wellenlängenschiebers	77
6.2	Bestimmung der Abschwächlänge λ_W	78
6.3	Bestimmung der Abschwächlänge λ_W bei Benutzung eines schwarzen Reflektor	79
6.4	Anpassung der Gleichung 6.1 an eine RHAC1-Sektion	81
6.5	Anpassung der Funktion 6.2 an eine RHAC1-Sektion	81
6.6	Anpassungsbereich einer FEMC-Sektion	83
6.7	Reproduzierbarkeit der Abschwächlängen bei der Innenabtastung	84
6.8	Verteilung der FEMC-1-Abschwächlängen für die Innenabtastung	85
6.9	Verteilung der FEMC-1-Abschwächlängen für die Außenabtastung	87
7.1	Durchschnittliche Eindringtiefe \bar{d}	90
7.2	T-, (S_L/S_R)- und (W_L/W_R)-Werte für alle 80 FHAC1-Szintillatoren	92
7.3	T-, (S_L/S_R)- und (W_L/W_R)-Werte für alle 26 FEMC-Szintillatoren.	93
7.4	T-, (S_L/S_R)- und (W_L/W_R)-Werte für 75 Szintillatorpositionen einer FHAC1-Sektion.	94
7.5	T-, (S_L/S_R)- und (W_L/W_R)-Werte für 75 Szintillatorpositionen einer FHAC1-Sektion.	95
7.6	Verteilung der T-Werte und λ_{S_z} für alle Szintillatoren des FCALs und RCALs	98
7.7	Verteilung der T-Werte und der Abschwächlänge λ_{S_z} der FHAC1-Szintillatoren	98
7.8	Verteilung der vergleichbaren T-Werte für die Innen- und Außenabtastung	100
8.1	Änderung des Antwortverhaltens bestrahlter HAC1- und EMC-Wellenlängenschieber	105
8.2	Quotienten aus jeweils zwei ^{60}Co -Läufen	107
9.1	Longitudinales Schauerprofil für unterschiedliche primäre Teilchenenergien	113
9.2	Einfluß von Inhomogenitäten auf die Kalibrationskonstante	113
9.3	Referenzantwort der EMC-Sektion des RCALs	115
9.4	Standardabweichung der Summation der vier Antwortfunktionen	117
10.1	Reproduzierbarkeit der HAC1-Gesamtssignale für die Innenabtastung	119
10.2	Antwortfunktion einer RHAC1-Sektion vor und nach Modifizierung des Rückwandreflektors	122
10.3	Verteilung der FHAC1-Gesamtssignale	122
B.1	Konstruktion zur Aufnahme der Lichtschranke	127
B.2	Vorderansicht der Motorenkontrolleinheit	129
C.1	Blick auf das RCAL vom Wechselwirkungspunkt	130
C.2	Schematische Darstellung der drei Einzelstücke der Transportröhre	131

Tabellenverzeichnis

2.1	Eigenschaften des ^{60}Co -Präparates	19
2.2	Strahlendosisleistungen für verschiedene Abstände als Funktion des Ortes	22
2.3	Einstellung des UNO-Werts für verschiedene Sektionen	27
2.4	Beispiele für den Zeitaufwand zur Vermessung von Kalorimetermodulen	29
3.1	Häufigkeit der unterschiedlichen Wechselwirkungen von γ -Quanten	32
3.2	Anteile verschiedener Szintillatoren am Gesamtsignal	47
3.3	Zunahme des ^{60}Co -Signals durch Rückstreuung	48
4.1	Optimierung des Abschneideparameters ESTEPE	54
4.2	Optimierte Abschneideparameter der EGS4-Simulation	54
4.3	Lagenstruktur der EMC- und HAC-Sektionen	55
5.1	Exemplarisch gemessene Abstandshalterpositionen am Modul FCD26, Turm 2	65
5.2	Die Häufigkeit von Stapelfehlern	67
6.1	Mittlere Abschwächlängen der verschiedenen Wellenlängenschiebertypen	86
7.1	\bar{T} -Werte aller Szintillatortypen und ihre Abschwächlängen	99
8.1	Die ΔT - und die ϵ -Werte für die Außen- und Innenabtastung beim FCAL	110
10.1	Gesamtsignale einer Sektion mit Stapelfehler	120
A.1	Die verschiedenen Wellenlängenschieber-Typen des F- und RCALs	125
A.2	Abschwächlänge λ_W aus den verschiedenen Spezialmessungen	126
D.1	Transportröhrenführung eines F11 Moduls	133
D.2	Transportröhrenführung eines F12 Moduls	134
E.1	Zuordnung der FCAL-Module	136
E.2	Zuordnung der RCAL-Module	137
F.1	Auflistung der Bezeichnungen für die Photomultiplier	139
F.2	Tabellen der optischen Parameter	141 ff

Einleitung

Der Speicherring HERA bei DESY in Hamburg ermöglicht die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Elektronen mit einer Energie von 30 GeV und Protonen mit einer Energie von 820 GeV. Zur Untersuchung der physikalischen Ereignisse stehen zwei Detektoren zur Verfügung, der H1- und der ZEUS-Detektor, wobei der letztgenannte Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist.

Es wird möglich sein, die Protonenstruktur bis zu 3×10^{-18} cm zu studieren, nach neuen exotischen Teilchen zu suchen, die Strukturfunktionen des Protons bei sehr großen Impulsüberträgen zu messen sowie weitere Tests der QCD, bei höheren Energien als bisher möglich waren, durchzuführen.

Um die Anforderungen der HERA-Physik erfüllen zu können, wurde der ZEUS-Detektor in Hinblick auf eine Reihe von Eigenschaften optimiert. Dazu gehört die möglichst genaue Identifikation von Teilchen-Jets und Leptonen, sowie die präzise Messung der Teilchenenergien. Letzteres wird von dem hochauflösenden Kalorimeter des ZEUS-Detektors gemessen, welches ungefähr 99.7 % des Raumwinkels um den Wechselwirkungspunkt abdeckt und die folgenden Energieauflösungen aufweist:

$$\frac{\sigma}{\sqrt{E}} \approx \frac{18\%}{\sqrt{E}} \quad \text{für Elektronen,}$$

$$\frac{\sigma}{\sqrt{E}} \approx \frac{35\%}{\sqrt{E}} \quad \text{für Hadronen.}$$

Beim Messen der Strukturfunktionen kann es bei einer ungenauen Kalibration zu einer Fehlinterpretation der physikalischen Ergebnisse kommen. Um dies auszuschließen ist eine absolute Kalibration auf dem Niveau von einem Prozent erforderlich, das heißt, daß das Verhältnis zwischen gemessenem Signal und deponierter Teilchenenergie auf dem Niveau von einem Prozent unabhängig von dem Ort und von der Zeit sein muß. Bei dem Kalorimeter handelt es sich um ein sogenanntes Stichprobenkalorimeter (vergleiche dazu Kapitel 1). Es besteht aus sich abwechselnden Lagen Uran als Absorbermaterial und Plastiksintillator als Nachweismedium. Zum Erreichen der geforderten Kalibrationsgenauigkeit war es notwendig, daß das Kalorimeter die folgenden Eigenschaften aufweist:

- ▷ Homogenes Antwortverhalten als eine Funktion der Position im gesamten Kalorimeter,
- ▷ Signalstabilität in der Zeit,
- ▷ und lineare Abhängigkeit der Signale von der Teilchenenergie.

Ist z.B. eine Uranplatte ein Prozent dicker als der Durchschnitt, hat dies zur Folge, daß in etwa ein Prozent weniger Energie im Szintillator nachgewiesen wird. Deponiert an dieser Stelle ein Teilchen Energie, wird das gemessene Signal um etwa ein Prozent niedriger sein als das Signal an einer anderen Position.

Das Beispiel verdeutlicht, daß eine Dickenvariation von mehr als einem Prozent sowohl für die Uranplatten als auch für die Szintillatoren, für die die gleiche Argumentation gilt, nicht akzeptierbar ist. Durch Einhaltung strikter Qualitätskontrollen konnten die Dickentoleranzen eingehalten werden [AND 91].

Durch Einhalten der Qualitätsvorgaben sowie durch eine sorgfältige Produktion des Kalorimeters wurde die angestrebte Genauigkeit der Energiekalibration von einem Prozent erreicht, was Testmessungen mit Teilchenstrahlen am CERN zeigten.

Die gesamte Kette der Signalbildung von der Lichterzeugung in den Szintillatoren über deren Auslese durch Wellenlängenschieber bis hin zur Umsetzung des Lichts in ein elektrisches Signal in den Photomultipliern als auch die Photomultiplier verarbeitende Elektronik kann nicht über die gesamte Betriebszeit als zeitlich stabil auf dem Niveau von einem Prozent angenommen werden. Es bedarf demnach unterschiedlicher Monitorsysteme, um die einzelnen Komponenten der Signalbildung zu überprüfen. Sie können wie folgt kurz zusammengefaßt werden.

Kalibration der Elektronik: Testpulse werden direkt hinter den Photomultipliern in die Analog-Auslese-Elektronik eingespeist, um die Vorverstärker zu kalibrieren und um die Parameter der Signalverarbeitung zu bestimmen.

Laser-Kalibration: Ein System aus optischen Fasern, in welche das Licht eines Lasers eingespeist werden kann, ermöglicht die direkte Anregung der Photokathoden der Photomultiplier zum Testen ihrer Verstärkung und ihrer Linearität. Ferner kann mit diesem System auch die Laufzeit der einzelnen Signale und die Anzahl der Photoelektronen pro GeV der unterschiedlichen Photomultiplier bestimmt werden.

UNO-Kalibration: Die zeitlich und räumlich stabile, niedrige natürliche Radioaktivität des abgereicherten Urans erzeugt in den Szintillatoren Signale und in den Photomultipliern einen Strom, welcher zur relativen Eichung verschiedener Kalorimeteruntergliederungen, sowie zur Überprüfung der Stabilität der Kalorimeterantwort genutzt werden kann.

Mit diesem System von Kalibrationsmethoden kann häufig die Ursache einer Änderung in dem Verhalten des Kalorimeters ermittelt werden. Ändert sich z.B. die Verstärkung eines Photomultipliers, wird sich dieses in dem UNO- als auch in dem Laser-Signal zeigen, nicht aber in den Testsignalen in der Elektronik.

Ändert sich aber nur das UNO-Signal, ist es mit den oben genannten Kalibrationsmethoden nicht möglich, die Ursache innerhalb des Moduls auszumachen.

Die Ursachen solcher Änderungen könnten sein:

- ▷ Mechanische Beschädigungen und/oder Verschiebungen der Wellenlängenschieber oder Szintillatoren bei der Anlieferung bzw. des Einbaus der Module.
- ▷ Alterungs- und Strahlenschäden der Szintillatoren und Wellenlängenschieber, was zu einer Änderung der absoluten Lichtausbeute und der Änderung der Abschwächlänge führen würde.

Die ^{60}Co -Methode ist unter anderem entwickelt worden, um diese Beeinflussungen messen zu können. Dazu wurde von H. Brückmann [BRÜ 86] vorgeschlagen, ein ^{60}Co -Präparat entlang der Szintillator/Uranlagen des Kalorimeters zu bewegen und die gemessenen Signale als Funktion des Ortes darzustellen. Mit diesen Messungen ist es möglich, die longitudinale Uniformität des Kalorimeters zu messen. Ähnliche Messungen mit einem ^{137}Cs -Präparat wurden bereits P. Hahn [HAN 88] gezeigt. Durch das zu den Wellenlängenschiebern parallele Abtasten der Kalorimeterlagen läßt sich die Abschwächlänge λ_W der Wellenlängenschieber bestimmen (vergleiche dazu Kapitel 6). Werden zudem Messungen von beiden Seiten einer Kalorimetersektion durchgeführt, ist durch einen Vergleich der Signale die Berechnung der Abschwächlänge der Szintillatoren λ_{S_z} möglich. Diese Größe ist nicht direkt mit der aus den Messungen mit Teilchenstrahlen erhaltenen Abschwächlänge absolut, sondern nur relativ vergleichbar. Da nur 10 der insgesamt 48 Module des FCALs und RCALs mit Teilchenstrahlen vermessen wurden, lassen sich die Ergebnisse der ^{60}Co -Messungen gegebenenfalls als Korrekturgröße für die übrigen Module bei der Benutzung der Abschwächlänge einsetzen. Auf welche Weise λ_{S_z} bestimmt wurde, läßt sich in Kapitel 7 nachlesen.

Weitere Anwendungsgebiete der ^{60}Co -Methode lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- ▷ Die Ortsmessungen dienen gleichzeitig der Lokalisierung von Einbaufehlern innerhalb des Kalorimeters. Dies wird in Kapitel 5 besprochen.
- ▷ Die Uniformität der Kalorimeterantwort in der Ortskoordinate Z und in dem zeitlichen Verhalten des Kalorimeters lassen sich bestimmen. Ungenauigkeiten dieser Größen gehen direkt in die Genauigkeit der Energieauflösung ein (siehe Kapitel 9).
- ▷ Strahlen- und Alterungsschäden haben einen unmittelbaren Einfluß auf die Energiebestimmung, da sie nicht notwendigerweise an jeder Ortsposition gleichmäßig auftreten und dadurch die longitudinale Homogenität des Kalorimeters verschlechtern. Der Einfluß solcher Störungen wird in Kapitel 8 behandelt.
- ▷ In Kapitel 10 wird gezeigt, daß ^{60}Co -Messungen für Stichprobenkalorimeter mit inaktiven Absorbermaterialien als absolutes Referenzsignal verwertbar sind.

Nach einer Beschreibung des Aufbaus des ZEUS-Kalorimeters in Kapitel 1 folgt die Darstellung des Versuchsaufbaus der ^{60}Co -Methode in Kapitel 2. Die prinzipiellen Abläufe bei der Anregung des ZEUS-Kalorimeters werden in Kapitel 3 besprochen und teilweise mit den Ergebnissen von Monte-Carlo-Simulationen (Kapitel 4) verglichen.

Kapitel 1

Das ZEUS-Kalorimeter

Unter einem Kalorimeter versteht man in der Hochenergiephysik einen Detektor, dessen Wirkungsweise darauf beruht, daß die gesamte Energie eines auslaufenden Reaktionsprodukt in ihm absorbiert wird. Dabei ist es wichtig, daß ein Teil der Energie als ein meßbares Signal zur Verfügung steht. Die Anforderungen an das Kalorimetermaterial sind deshalb einerseits das Vermögen die Teilchen gut abbremsen zu können und andererseits ein auswertbares Signal in Form von elektrischen Impulsen, Čerenkovlicht oder Szintillationslicht zu liefern. Dies kann in der Form eines homogenen Kalorimeters geschehen, in dem das Absorbermaterial gleichzeitig das Nachweismaterial ist (z.B. Bleiglas) oder aber alternativ dazu in Form eines Stichprobenkalorimeters, bei dem Lagen von Absorber- und Nachweismaterial einander abwechseln. Als Absorbermaterial wird zumeist ein Material mit hoher Dichte und Kernladungszahl, wie z.B. Blei, Uran, Wolfram oder Eisen eingesetzt. Als Nachweismaterial bieten sich z.B. Szintillatorplatten, flüssiges Argon, Siliziumdioden und gasgefüllte Ionisationskammern an. Durch eine Segmentierung des aktiven Mediums lassen sich zusätzliche Informationen über die Richtung und den Ort des einlaufenden Teilchens gewinnen. Ferner lassen sich aus der Schauerentwicklung Rückschlüsse auf die Teilchenart ziehen.

1.1 Elektromagnetische Schauer

Durchquert ein Teilchen das Stichprobenkalorimeter, tritt es zunächst mit dem schweren Absorbermaterial in Wechselwirkung. So wird beispielsweise ein hochenergetisches Elektron einige Bremsstrahlungsphotonen emittieren, die ihrerseits durch Paarerzeugung zur Entstehung neuer Elektronen bzw. Positronen beitragen; es kommt zu einem kaskadenförmigen Aufschauern des Teilchens. Im Schauermaximum, d.h. in dem Bereich des Kalorimeters, in dem der größte Teil der Anfangsenergie deponiert wird, können aus einem primären Teilchen mehrere tausend Sekundärteilchen entstanden sein. Bei hoher Energie verlieren die Elektronen vorwiegend ihre Energie durch Bremsstrahlung, während bei niedrigen Energien der Energieverlust durch Ionisation vorherrscht. Die Energie, bei der die Verluste durch Bremsstrahlung und durch Ionisation gleich sind, wird kritische Energie genannt und ist materialabhängig. Unterhalb der kritischen Energie schauern Teilchen nicht weiter auf. Die longitudinale Entwicklung des hochenergetischen Teilchens des elektromagnetischen Schauers, d.h. für Energien oberhalb der kritischen Energie, ist durch die Strahlungslänge X_0 bestimmt. Bei hohen Energien ist der mittlere Energieverlust von Elektronen durch Bremsstrahlung [AMA 81]:

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{E}{X_0},$$

wobei näherungsweise gilt:

$$X_0[\text{g/cm}^2] \approx 180 \cdot \frac{A}{Z^2} \left(\frac{\Delta X_0}{X_0} \leq \pm 20\% \quad \text{für } 13 \leq Z \leq 92 \right).$$

Z ist die Kernladungszahl und A die Massenzahl. Die wichtigsten Eigenschaften elektromagnetischer Schauer sind:

- ▷ die Energie wird fast ausschließlich durch Ionisation abgegeben,
- ▷ die Entfernung t_{max} des Schauermaximums vom Beginn des Kalorimeters wächst logarithmisch mit der Energie an ($t_{max} = X_0 \cdot [\ln(E_0/E_c) - 0.75]$ [FAB 86]),
- ▷ das meßbare Signal ist proportional zur primären Energie E_0 .

1.2 Hadronische Schauer

Im Gegensatz zu Elektronen können Hadronen, die auf Materie treffen, innerhalb eines Kernes (intranuklear) eine Kaskade auslösen. Dabei übertragen die hochenergetischen Hadronen Energie auf die Nukleonen, die ihrerseits wieder mit anderen Nukleonen wechselwirken können. Aufgrund der Vielfalt der möglichen Reaktionen ist eine einfache Beschreibung wie bei den elektromagnetischen Schauern nicht möglich.

Der dominierende Prozeß bei der Entwicklung eines hadronischen Schauers ist die Spallation von Kernen. Die an der Wechselwirkung beteiligten Teilchen können so hohe Energien haben, daß sie noch innerhalb des Kernes in einer ähnlichen Wechselwirkung Energie auf weitere Teilchen übertragen, so daß die Energie des einfallenden Hadrons auf eine große Anzahl von Teilchen verteilt werden kann. Ein mehr oder weniger großer Anteil der Teilchen wird in dieser Stufe der Spallation so viel Energie besitzen, daß sie den Kern verlassen und gegebenenfalls in anderen Kernen weiter aufschauern können. Nach der relativ schnell ablaufenden intranuklearen Kaskade bleibt der Kern in einem hochangeregten Zustand zurück. Leichte Kerne werden ihre Energie durch Verdampfung von Teilchen abgeben. Bei schweren Kernen kann in jeder Stufe der Abregung Spaltung als Konkurrenzprozeß zur Verdampfung auftreten. Bei einem Material wie Uran¹ haben die dann entstandenen Spaltungsfragmente eine sehr kurze Reichweite und stehen nicht als meßbares Signal zur Verfügung. Zusätzlich besitzen die Spaltfragmente aber Anregungsenergien, die wiederum wie bei den Ausgangskernen in Form von Verdampfungsneutronen abgegeben werden können.

Im letzten Schritt der Abregung, wenn die zur Verfügung stehenden Energien zur Verdampfung von Neutronen nicht ausreichend sind, wird die verbliebende Energie in Form von γ -Quanten freigesetzt.

Die charakteristische Länge für die Entwicklung eines hadronischen Schauers ist die Kernabsorptionslänge λ . Sie ist für schwere Materialien erheblich größer als die Strahlungslänge X_0 was dazu führt, daß hadronische Kalorimeter bei gleicher Energie der zu messenden Teilchen wesentlich größer sind als die elektromagnetischen Kalorimeter.

¹Das Absorbermaterial des ZEUS-Kalorimeters ist ²³⁸U.

Im Gegensatz zu elektromagnetischen Schauern wird die Energie des einlaufenden Hadrons bei hadronischen Schauern typischerweise nur zu etwa zwei Drittel in Ionisationsenergie umgesetzt. Der verbleibende Teil geht durch das Aufbrechen der Kerne und durch Neutrinos der Messung verloren. In Stichprobenkalorimeter werden die schweren Kernbruchstücke schon im Absorbermaterial absorbiert und tragen somit zu dem meßbaren Signal im Nachweismaterial ebenfalls nicht bei.

Bei gleicher einlaufender Energie ist die meßbare Energie bei hadronischen Schauern niedriger als bei den elektromagnetischen Schauern. Der Quotient der meßbaren Energie für Elektronen und Hadronen, das sogenannte e/h -Verhältnis, ist größer als eins. Zur Teilchenidentifikation läßt sich dieser Effekt bei der Energiemessung berücksichtigen.

Zusätzlich zu den beschriebenen hadronischen Reaktionen bildet sich bei hadronischen Schauer durch den Zerfall von neutralen Pionen in zwei γ -Quanten ein elektromagnetischer Sub-Schauer aus. Wie zuvor beschrieben, ist die im Detektormaterial deponierte Ionisationsenergie in diesem Fall größer als die eines rein hadronischen Schauers. Durch die unterschiedliche Verteilung der Schauerenergie auf diese beiden Komponenten entstehen erhebliche Fluktuationen in dem meßbaren Signal.

Diese Wirkung von Schauerfluktuationen läßt sich klein halten, wenn es gelingt, das e/h -Verhältnis nahe bei eins zu halten. Eine Kompensation der verlorenen Energie in der rein hadronischen Schauerkomponente durch Ausnutzung der Tatsache, daß die kinetische Energie der Neutronen näherungsweise proportional zum Energieverlust durch Spalten der Kerne ist, bietet eine Möglichkeiten $e/h \approx 1$ zu erhalten. Zu diesem Zweck wird beim ZEUS-Kalorimeter als Absorbermaterial abgereichertes Uran eingesetzt. Es kann sowohl im Anschluß an die Ausbildung einer intranuklearen Kaskade wie auch durch die bei Spallationsreaktionen freiwerdenden Neutronen gespalten werden. Die Spallations- und Spaltungsneutronen durchdringen das Absorbermaterial nahezu ungebremt und verlieren ihre Energie sehr schnell durch elastische Stöße im wasserstoffhaltigen Nachweismaterial. Für das ZEUS-Kalorimeter wurde dafür der Plastikszintillator SCSN-38 eingesetzt.

Durch geeignete Wahl von Absorber- und Nachweismaterial als auch durch abgestimmte Dicken der beiden Materialien eines Stichprobenkalorimeters läßt sich erreichen, daß das e/h -Verhältnis ≈ 1 ist. In diesem Fall spricht man von Kompensation. Eine weitere Möglichkeit zur Kompensation ist die Tatsache, daß neben den wesentlichen sehr schnellen Prozesse beim Aufbau eines hadronischen Schauers auch eine verzögerte Komponente vorhanden ist. Sie stammt aus Reaktionen relativ niedrigerenergetischer Neutronen, die über Rückstoßprotonen, (n,γ) -Reaktionen und induzierte Spaltung der Urankerne zum sichtbaren Signal beiträgt.

Da die verzögerte Komponente im Schauersignal ausschließlich vom rein hadronischen Anteil im Schauer erzeugt wird, hängt die Empfindlichkeit des Kalorimeters für diesen Anteil, und damit auch das e/h -Verhältnis, zu einem Teil von der Zeit ab, über die das Kalorimetersignal gemessen wird, womit die Möglichkeit zur Feinjustierung gegeben ist.

Für das hadronische Szintillator/Uran-Kalorimeter im ZEUS-Experiment wurde Kompensation durch Materialabmessungen von 3.3 mm für das Absorbermaterial zuzüglich 0.4 mm Eisenummantelung und von 2.6 mm für das Nachweismaterial, dem Szintillator, erreicht.

1.3 Der Aufbau des ZEUS-Kalorimeters

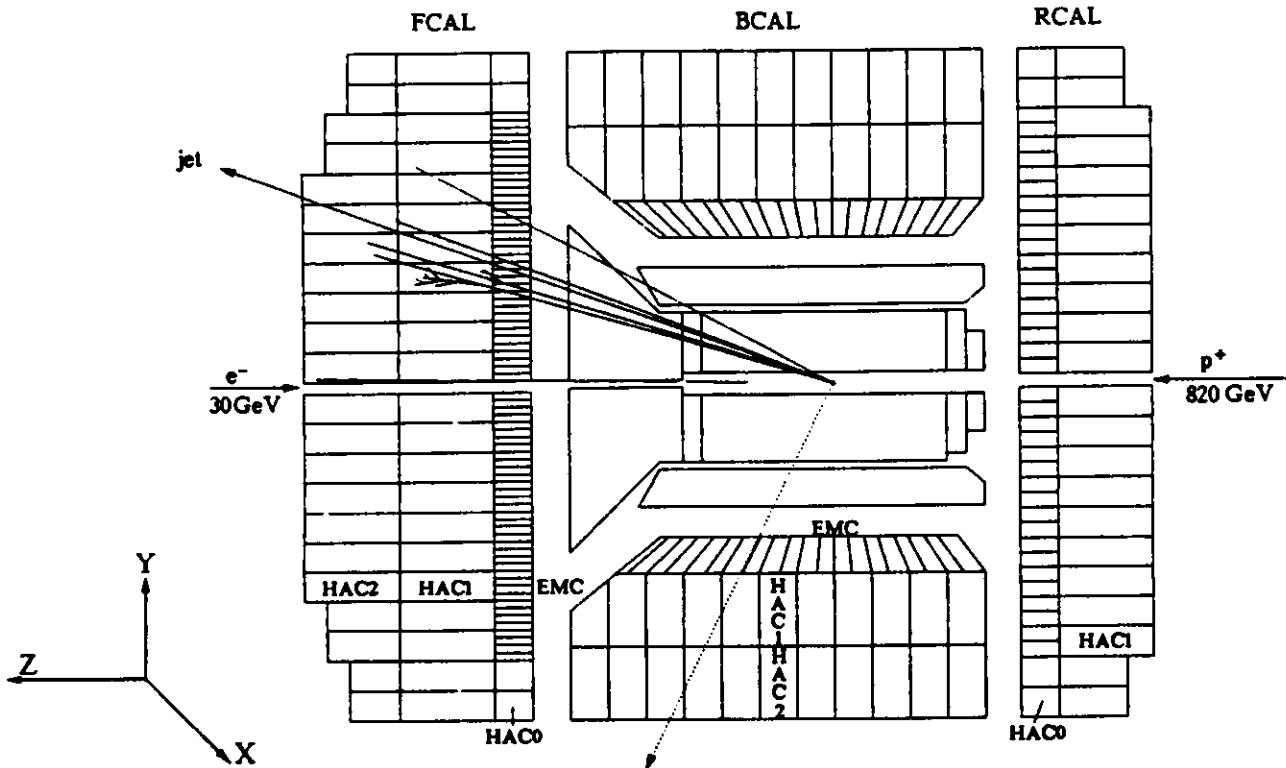


Abbildung 1.1: Anordnung der Komponenten FCAL, RCAL und BCAL des ZEUS-Kalorimeters.

Das ZEUS-Kalorimeter umschließt den inneren Bereich mit der Spule und den Spurkammern fast vollständig (siehe Abbildung 1.1). Der Raumwinkel wird in Vorwärtsrichtung (Protonenrichtung) zu 99.8% und in Rückwärtsrichtung (Elektronenrichtung) zu 99.5% abgedeckt. Das Kalorimeter selbst ist in drei Untereinheiten gegliedert:

- ▷ dem Vorwärtskalorimeter - FCAL,
- ▷ dem Rückwärtskalorimeter - RCAL,
- ▷ dem Rundumkalorimeter - BCAL.

In der vorliegenden Arbeit werden nur das FCAL und RCAL untersucht. Für das BCAL sind ähnliche Messungen mit einem etwas anderen Versuchsaufbau durchgeführt worden.

Das Kalorimeter ist longitudinal (Z-Richtung) weiter in die elektromagnetischen (EMC) und die hadronische Sektion (HAC) unterteilt. Die hadronische Sektion ist für das FCAL nochmals in zwei Einheiten, der ersten hadronischen Sektion (HAC1) und der zweiten hadronischen Sektion (HAC2), unterteilt. Die Tiefe des EMCs beträgt etwa $25 X_0$ bzw. etwa eine Wechselwirkungslänge² $\lambda_{int.}$, die der hadronischen Sektionen zwischen $2.3\lambda_{int.}$ für den äußeren RCAL- und $6.1\lambda_{int.}$ für den inneren FCAL-Bereich.

Alle Sektionen haben die gleichen Dickenverhältnisse von Absorber- zu Nachweismaterial (2.6mm für

²Die Wechselwirkungslänge ist definiert als $\lambda_{int.} = (\sigma \cdot n_a)^{-1}$ mit σ : Wechselwirkungsquerschnitt und n_a : Anzahl der Atome pro Volumeneinheit.

das Nachweis- und 3.3 mm für das Absorbermaterial). Als Absorbermaterial dient abgereichertes Uran, daß in der EMC-Sektion mit 0.2 mm dicken Stahl ummantelt ist. In der hadronischen Sektion ist diese Ummantelung 0.4 mm dick. Es bietet neben seiner hohen Dichte den Vorteil, daß durch seine natürliche Strahlung ein kleines räumlich und zeitlich sehr stabiles Signal in den Szintillatoren erzeugt wird (Uranium Noise = UNO). Dieses Signal läßt sich zur Kalibration der einzelnen Sektionen bzw. Türme untereinander verwenden. Als Nachweismaterial kommt ein Plastiksztillator (SCSN-38) zum Einsatz, der durch sein schnelles Ansprechen und kurze Abklingzeit der Anregung (wenige Nanosekunden) der schnellen Ereignisfrequenz bei HERA (96 ns zwischen zwei Ereignissen) gerecht wird.

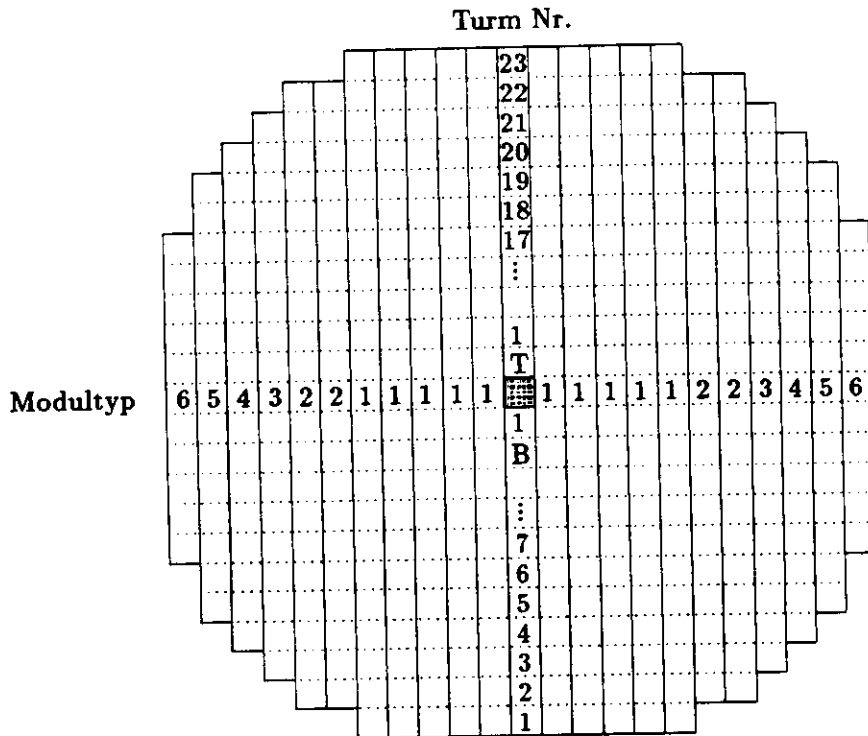


Abbildung 1.2: Sicht auf das Vorwärtskalorimeter in Bewegungsrichtung der Protonen.

In Abbildung 1.2 ist schematisch der Blick auf das Vorwärtskalorimeter (vom Wechselwirkungspunkt aus gesehen) dargestellt. Die Winkelauflösung für hadronische Jets sollte besser als 0.57° sein, was im FCAL einer Ortsauflösung von mindestens 22 mm entspricht. Das Kalorimeter wurde in einzelne Türme unterteilt, die eine Fläche von $20 \times 20\text{ cm}^2$ einnehmen. Durch eine kleinere Segmentierung von $5 \times 20\text{ cm}^2$ für FEMC und $10 \times 20\text{ cm}^2$ für REMC wurde die Ortsauflösung der elektromagnetischen Sektion verbessert. Der Randbereich des FCALs und RCALs ist durch das BCAL-Kalorimeter abgedeckt, so daß hier keine elektromagnetischen Teilchen mehr einlaufen können und deshalb auf die kleinere Segmentierung verzichtet werden konnte. Die Signale der Sektionen werden durch Wellenlängenschieber jeweils von zwei Seiten ausgelesen. FCAL-Türme mit der feinsten Segmentierung besitzen somit zwölf Wellenlängenschieber. Die übrigen sind mit sechs ausgestattet. Die regelmäßige Szintillator/Uran-Struktur der EMC-Sektion ist nach dem vierten und für FCAL auch noch nach dem siebten Szintillator durch 15 mm tiefe (in Z-Richtung) Freiräume unterbrochen. Sie dienen der späteren Aufnahme der Hadron-Elektron-Separatoren (HES). Die einzelnen Türme sind in vertikaler Richtung zu Modulen zusammengefaßt (siehe Abbildung 1.3). Sowohl das FCAL als auch das RCAL bestehen aus 24 Modulen. Mechanisch werden die einzelnen Module durch eine Stahlträgerkonstruktion gehalten. Sie besteht aus einem T-förmigen Stahlträger an dessen Unterseite die Photomultiplier angebracht sind. Der obere Abschluß erfolgt durch die sogenannte Frontplatte, ein 15 mm dickes an den Seiten abgerundetes Aluminiumprofil.

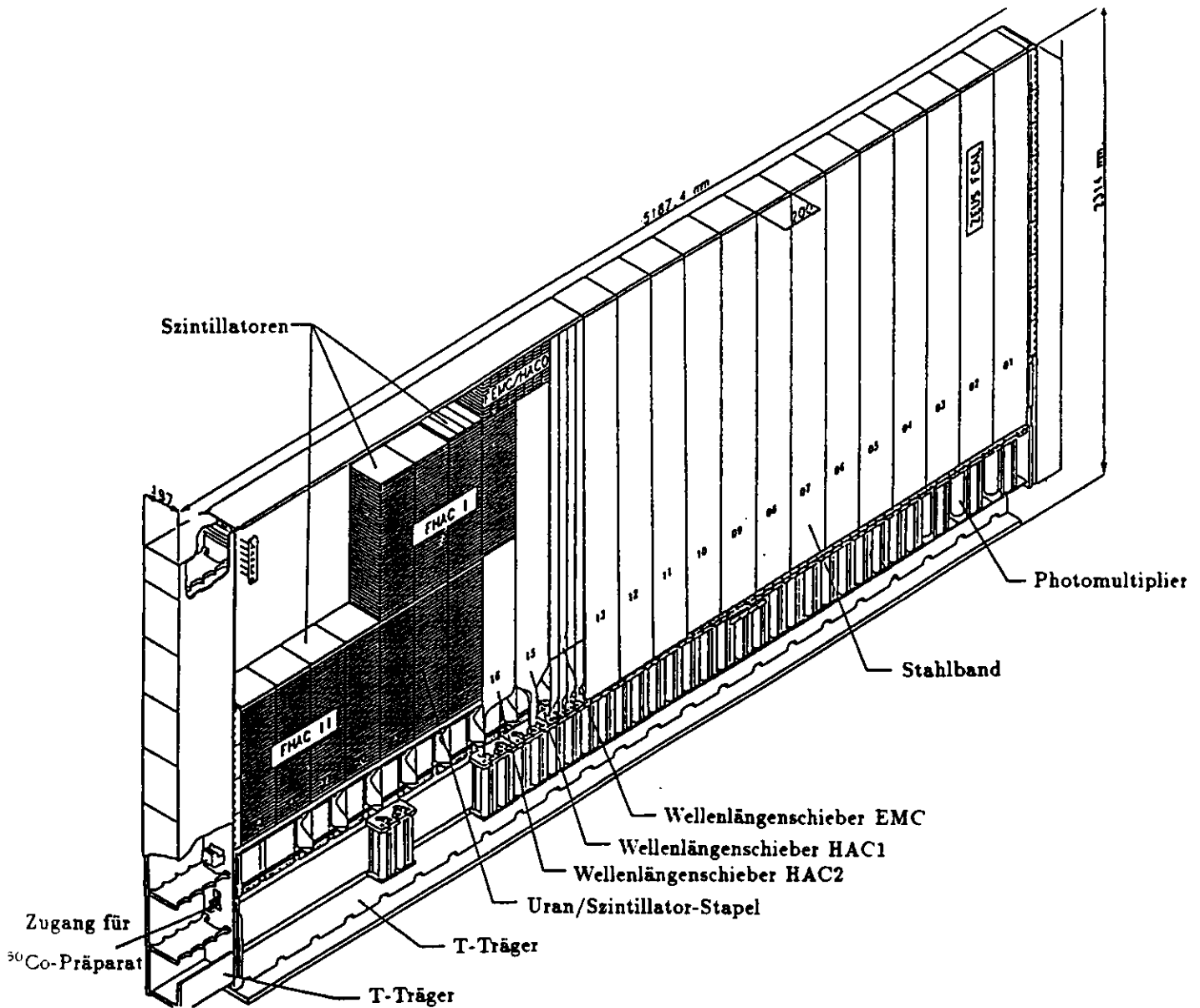


Abbildung 1.3: Mechanischer Aufbau eines FCAL-Moduls.

Jeder einzelne Turm wird durch ein 0.2 mm dickes Spannband aus Stahl unter Druck zusammengehalten. Damit die Uranplatten nicht auf die Plastiksintillatoren gepreßt werden, sind zwischen den Uranplatten Abstandshalter angebracht, die ein freies Bewegen der Szintillatoren ermöglichen. Durch das Anlegen der Wellenlängenschieber werden die Szintillatoren zentriert. Einzelne Module werden im folgenden nach den Herstellungsnummern benannt, die sie an ihrem jeweiligen Produktionsort (NIK-HEF, Niederlande bzw. YORK, Kanada) erhielten, also NL<n> mit (n=1, ..., 22) und CD<m> mit (m=1, ..., 26). Ein vorangestelltes „F“ bzw. „R“ kennzeichnet den FCAL- und RCAL-Bereich. Die Standorte der Module im Kalorimeter findet man im Anhang E. Die hadronischen Sektionen werden HAC<n> mit (n=0,1,2), die elektromagnetischen EMC<n> mit (n=1,2,3,4) genannt. Türme mit EMC-Sektionen werden EMC-Türme genannt, Türme mit HACØ-Sektionen werden HACØ-Türme genannt.

Kapitel 2

Versuchsbeschreibung

Das Ziel der ^{60}Co -Messungen war es, die folgenden Fragestellungen zu klären:

- ▷ Wurden die Anforderungen an die Qualität des mechanischen Aufbaus des Kalorimeters erfüllt?
- ▷ Wie verhält sich die Abschwächlänge der Szintillatoren einer Sektion von Turm zu Turm und von Modul zu Modul?
- ▷ Wird mit der gemessenen longitudinalen Homogenität eines Turmes die geforderte Energieauflösung erreicht?
- ▷ Lassen sich die Messungen als Grundlage für spätere Messungen zur Stabilität der optischen Eigenschaften des Kalorimeters heranziehen (Strahlen- und Alterungsschäden)?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde ein radioaktives Eichpräparat entlang der Kalorimetersektionen geführt. Um eine möglichst lokale Anregung der Szintillator/Uran-Lagen zu erhalten, das heißt nur wenige Szintillatoren innerhalb eines Zeitintervalls anzuregen, sollte das Präparat sehr nahe entlang der Szintillatoren bewegt werden, da die meisten Szintillatoren durch die Uranplatten verdeckt sind. Aus dieser Bedingung heraus entstand die Methode der Innenabtastung, bei der das ^{60}Co -Präparat in einem Transportröhrensystem innerhalb der Wellenlängenschieber-Kassetten bewegt wurde.

Zum Vermessen aller 48 FCAL- und RCAL-Module wurden zwei unterschiedliche Systeme eingesetzt, der Innen- und der Außenabtaster. Für jede Methode wurde ein anderer Aufbau des Eichpräparates benutzt.

Beginnend mit dem Innenabtaster werden in diesem Kapitel die verschiedenen Methoden der Abtastung und der für das jeweilige Abtastsystem eingesetzte mechanische Aufbau des Eichpräparates vorgestellt. Nachdem dann das Motorensystem für den Vorschub des Eichpräparates beschrieben wird, folgt eine Beschreibung des Datennahmesystems. Das Kapitel wird mit einer knappen Darstellung der Versuchsdurchführung abgeschlossen. Die für die Durchführung des Experimentes wichtigen Details einiger Bauteile der Motoreinheit sind im Anhang B aufgeführt.

2.1 Versuchsaufbau

2.1.1 Innenabtastung

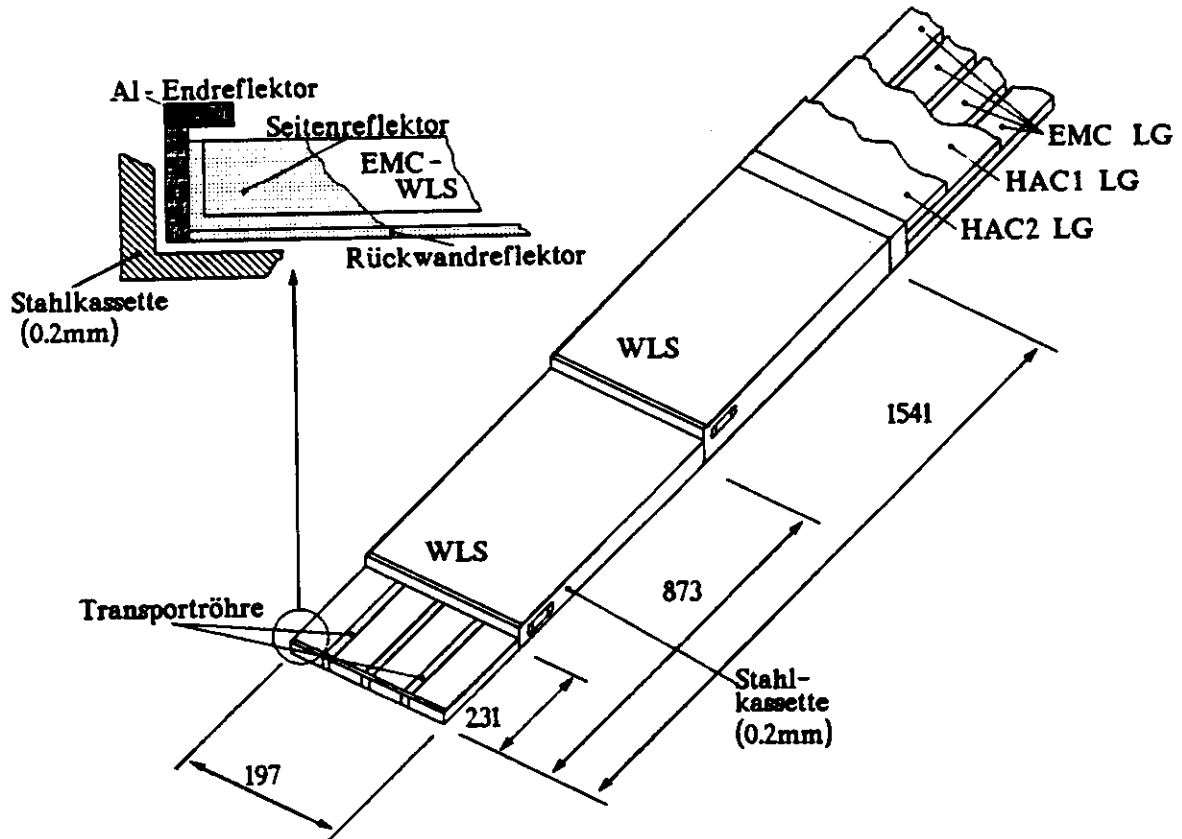


Abbildung 2.1: Wellenlängenschieberkassette des Vorwärtskalorimeter mit Darstellung der Reflektoren.

Die Abbildung 2.1 zeigt die Anordnung einer Wellenlängenschieberkassette für das FCAL, die für beide Seiten des Moduls gleich sind. Die Transportröhren für das Eichpräparat sind für Türme mit einer EMC-Sektion zwischen den EMC-Wellenlängenschiebern angebracht, so daß immer zwei EMC-Sektionen pro Lauf angeregt werden können. Da die EMC-Sektion des RCALs nur zwei Unterteilungen pro Turm hat, ist dafür nur eine Transportröhre notwendig. Die Transportröhren werden entsprechend der Unterteilung der EMC-Sektion benannt. Befindet sich die Transportröhre zwischen der ersten und der zweiten EMC-Sektion, wird sie mit E1E2 bezeichnet, die zwischen der dritten und der vierten mit E3E4. Die Transportröhre des RCALs erhielt die Bezeichnung E1E2. Da für jede Transportröhre immer eine vollständige Abtastung des gesamten Turmes erfolgte, wurden pro Modulseite die hadronischen Sektionen des FCALs von zwei verschiedenen Positionen aus angeregt. Entsprechend der Abbildung 2.2 sind diese Positionen jeweils 5 cm von der Wellenlängenschieberkante entfernt.

Die äußeren Türme eines Moduls, die HAC \emptyset -Türme, die den Randbereich des Kalorimeters ausmachen, sind nur mit jeweils einer Transportröhre zwischen den Türmen bestückt, da hier keine weitere Unterteilung in EMC-Sektionen nötig ist. Die Abtastung erfolgt also hier für zwei Türme gleichzeitig. Diese Transportröhre wird mit HAC \emptyset bezeichnet.

Um zu den Transportröhren auch bei den in den Detektor eingebauten Modulen Zugang zu haben, war es notwendig alle Transportröhren am oberen T-Träger, in dem sogenannten FANOUT, zusammenzufassen. Dies brachte den Vorteil der zentralen Lokalisierung einerseits und andererseits den Nachteil der Notwendigkeit einer Umlenkung der Röhren um 90 Grad mit sich. Um einen möglichst großen Krümmungsradius zu erhalten, wurden speziell gebogene Kurvenstücke eingesetzt, die mittels kleiner Hülsen an die zu verbindenden Röhren geklebt wurden. Die längsten der Transportröhren haben eine Länge von nahezu 7 Metern und weisen eine weitere Verbindungsstelle etwa einen Meter vor der Biegung auf. Eine Übersicht des Verlaufs der Transportröhren zeigt die Abbildung 2.2. Hier ist auch die Position des FANOUTs entnehmbar.

Beim Befahren der Transportröhren mit dem Eichpräparat ist die wirkende Kraft nicht größer als 15 N, trotzdem haben einige der Verbindungsklebung der Belastung nicht standgehalten. Ungenügende Verklebungen lassen sich ohne ein Öffnen der Module schwer nachweisen, so daß einige dieser schadhafte Röhren mehrfach benutzt wurden und sich dabei die Verbindungsstellen lösten. Dabei besteht die Gefahr, daß die Trägerdrähte des Eichpräparates nachhaltig geknickt werden, so daß eine weitere Benutzung nicht mehr möglich ist. Schlimmstenfalls kann das ^{60}Co -Präparat aus der Kapselung von seinem Trägerdraht gelöst werden. Dies zieht in jedem Fall eine aufwendige Bergung des ^{60}Co -Präparat nach sich. Dieser erhebliche Nachteil der Innenabtastung erzwang die Entwicklung eines Außenab-tasters, dessen Transportröhren ohne Verbindungsstücke und ohne starke Krümmungen konstruiert wurden.

Für einen Teil des RCALs wurde eine Testmethode entwickelt, die es erlaubte, die Verbindungen und den Zustand der Transportröhren zu überprüfen, ohne die Module zu öffnen. Aus Zeitgründen wurde dieser Test nur für die Türme durchgeführt, die sich in der Nähe des Strahlrohres befinden. Eine kurze Beschreibung dieser Methode und ihre Resultate werden im Anhang C dargestellt.

Mit der Methode der Innenabtastung wurden 4 Module des FCALs am CERN und 2 Module am DESY vermessen. Nach dieser Zeit traten verschiedene Schwierigkeiten mit den Transportröhren auf, die letztlich zur Zerstörung von zwei Eichpräparaten führten.

2.1.2 Außenabtaster für die Serienmessungen

Zum Vermessen der Module wurde ein Meßstand auf dem DESY-Gelände errichtet. Hier wurden die Module so positioniert, daß die Längsseite des T-Trägers, an der sich die Photomultiplier befinden, auf zwei Betonklötzen steht, und somit die Türme senkrecht¹ stehen, wie in Abbildung 2.2 dargestellt ist. Dadurch war die Möglichkeit gegeben, den Außenabtaster als rollbaren Wagen auf die Frontplatte zu setzen, und die Transportröhren senkrecht in einem Stück entlang eines Turmes zu führen (siehe dazu Abbildung 2.3). Insgesamt acht Röhren für FCAL und vier für RCAL-Module, vier respektive zwei auf jeder Modulseite, wurden auf zwei sogenannten Flügeln zusammengefaßt. Die Abstände der vier Transportröhren für die FCAL-Module zueinander wurden mit 5 cm so gewählt, daß das Eichpräparat entweder in der Mitte jeder EMC-Sektion oder aber wie bei der Innenabtastung zwischen EMC1 und EMC2 oder zwischen EMC3 und EMC4 bewegt werden konnte. Es ließ sich auch jede andere Position gesondert anfahren. Um den straffen Zeitplan einhalten zu können, wurden die Transportröhren wie zuvor bei der Innenabtastung positioniert. Dies verschlechterte zwar die Resultate für einige EMC-Sektionen durch ungenaue Positionierung der Flügel, insbesondere bei Modulen, die nicht genau horizontal aufgestellt wurden und bei denen sich die Transportröhren dadurch nicht über die ganze Strecke an der gewünschten Position befanden, die benötigte Meßzeit aber wurde nahezu halbiert.

¹Zwei der am CERN vermessenen Module befanden sich in horizontaler Position, also flach liegend.

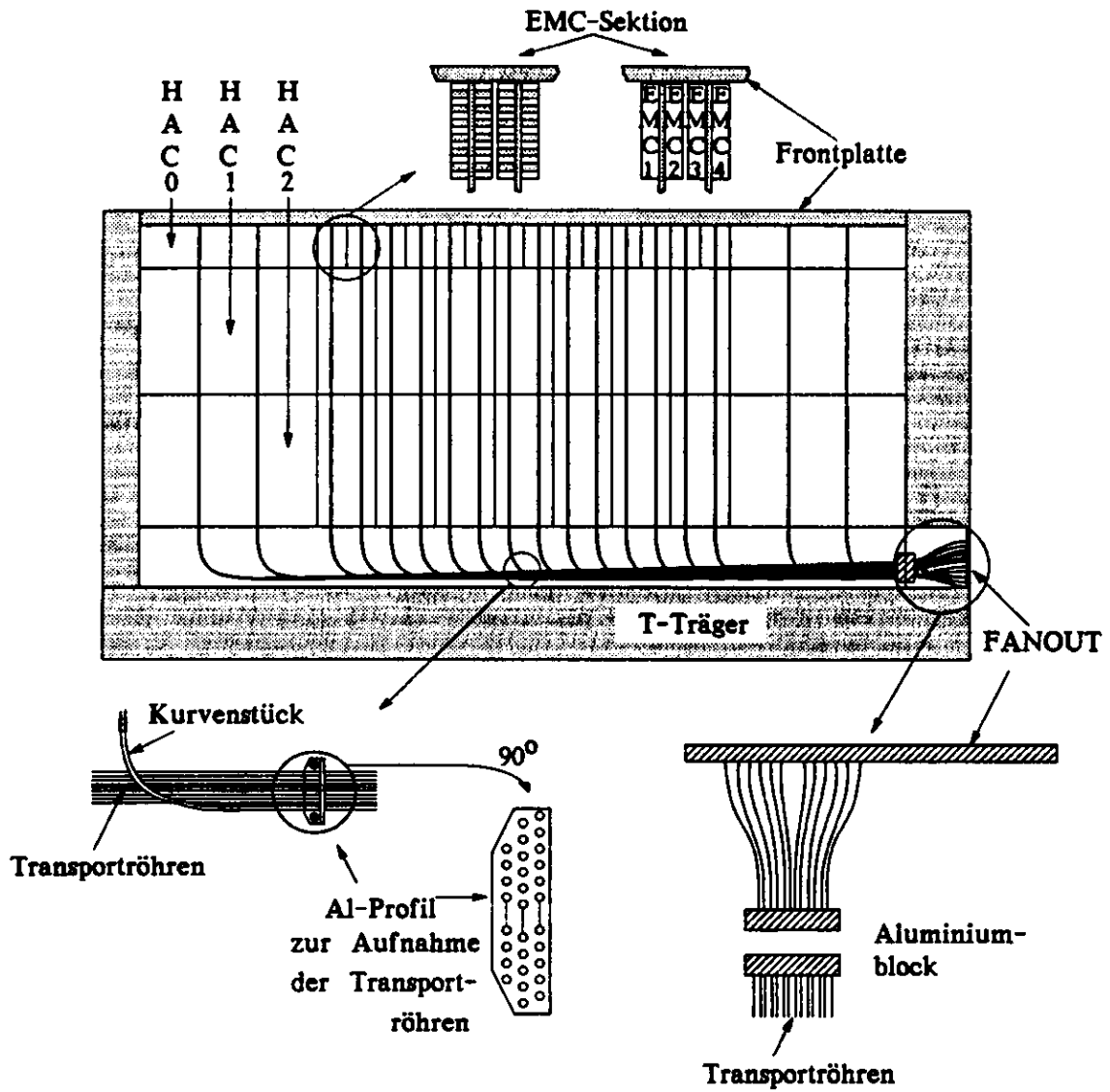


Abbildung 2.2: Verlauf der Transportröhren eines FCAL-Moduls.

Befindet sich der Außenabtaster über dem zu vermessenden Turm, werden die Flügel mit leichtem Druck an die Oberfläche des Moduls mit Hilfe spezieller Halteprofile angepreßt. Der leichte Andruck gewährleistet über den gesamten Turm, daß das Eichpräparat jeweils den gleichen Abstand zu den Szintillatoren hat. Eine Variation von ein bis maximal zwei Millimetern hat keinen nennenswerten Einfluß auf die Ergebnisse. Wichtiger war die senkrechte Ausrichtung der Flügel mit Hilfe der Halteprofile.

Für den Vorschub des Eichpräparates bediente man sich der bereits vorhandenen Schrittmotoren mit den dazugehörigen Bedienungseinheiten. Mit Hilfe des Außenabstasters läßt sich jeder Turm per Hand und jede Transportröhre rechnerunterstützt ansteuern.

Um das Eichpräparat an die zunächst erforderliche Ausgangsposition, die sogenannte Referenzposition, zu bringen, wurde das inaktive Ende des Eichpräparats über eine eigens in einem der Flügel eingebaute Transportröhre zwischen die Gummirollen des Schrittmotors gebracht, wobei das Präparat in einer Bleiabschirmung verblieb. Nachdem die Arretierung an der Bleiabschirmung für das Eichpräparat gelöst wurde, konnte es von den Schrittmotoren zur Referenzposition bewegt werden. Nach Abschluß der Messungen wurde das Eichpräparat auf ähnliche Weise *entladen*. Auch für die notwendigen Bewegungen des Außenabstasters von Turm zu Turm wurde eine Bleiabschirmung benutzt, die sich auf der Grundplatte des Wagens befand und sich durch eine Transportröhre erreichen ließ. Weitere Informationen über den Aufbau des Außenabstasters der Serienmessung finden sich in der Abbildung 2.3 und in den Diplomarbeiten [MEY 91] und [GLO 91].

Dem Abschnitt 2.1.3 vorausgreifend, soll der Außen- mit dem Innenabtaster abschließend verglichen werden.

+ Vorteile des Außenabstasters sind:

- ▷ Schonung des Eichpräparates durch annähernd kurvenlose Transportröhren,
- ▷ Zeitersparnis aufgrund kürzerer Transportröhren,
- ▷ Möglichkeit zur Benutzung eines erheblich verbesserten Aufbaus des Eichpräparates und
- ▷ die Möglichkeit über die gesamte Breite des Wellenlängenschiebers die Transportröhren zu positionieren.

- Nachteile des Außenabstasters sind:

- ▷ die Positionierung der Transportröhren relativ zu den Szintillatoren ist weniger genau definiert,
- ▷ geringere Ortsauflösung aufgrund des größeren Abstandes zwischen Szintillator und ^{60}Co -Präparat,
- ▷ in situ Messungen sind nicht möglich.

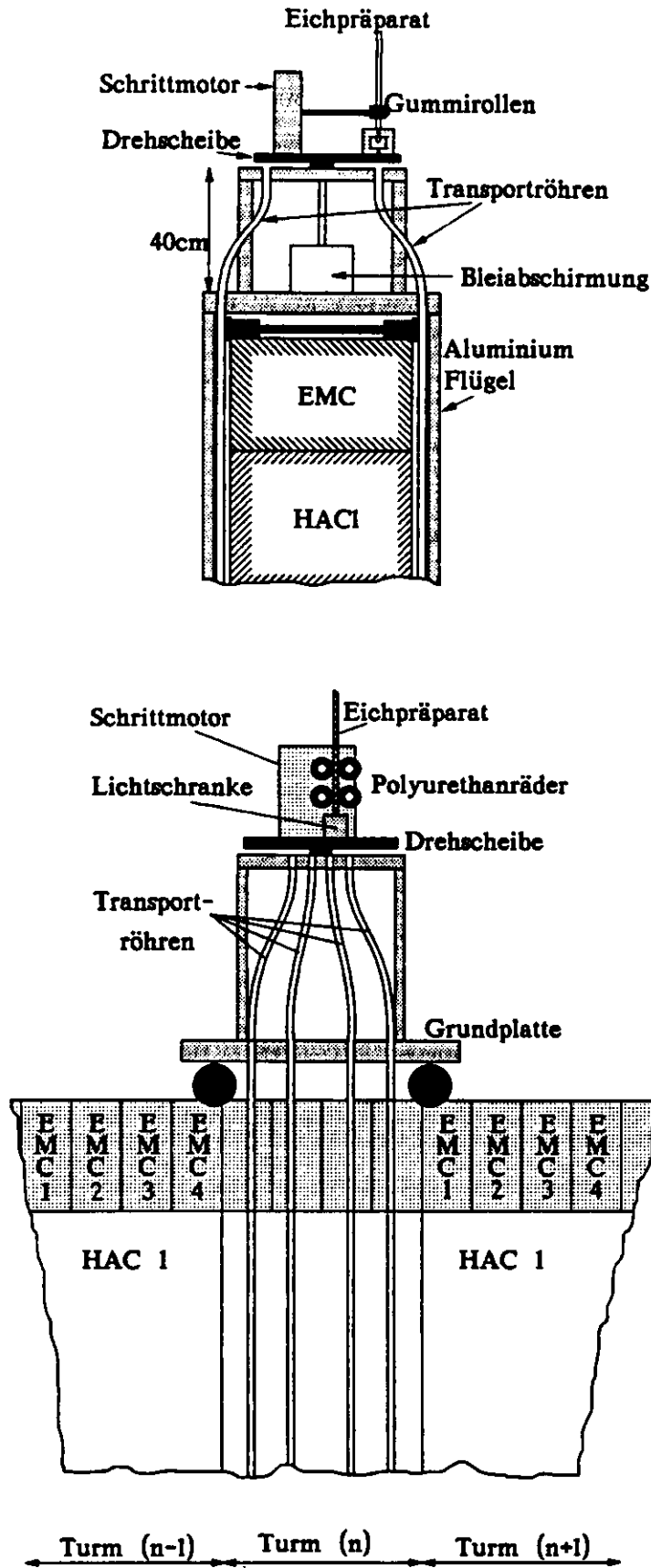


Abbildung 2.3: Vorderansicht und Seitenansicht des Außenabtasters.

2.1.3 Außenabtaster für das ZEUS-Kalorimeter

Nachdem die Messungen mit dem Innenabtaster gezeigt haben, daß ein gewisses Risiko besteht, das Eichpräparat zu beschädigen, und eine Außenabtastung in der beschriebenen Form bei den eingebauten Modulen nicht mehr möglich ist, wurde hierfür ein eigener Außenabtaster entwickelt.

Bei einer Unterbrechung des HERA Betriebs wird es möglich sein, den Detektor zu öffnen, um einen Zugang zu den einzelnen Komponenten zu haben. Bei dieser Gelegenheit werden die vier Module, jeweils zwei im FCAL- und RCAL-Bereich, die ober- und unterhalb des Strahlrohres angebracht sind, für einen Außenabtaster zugänglich sein. Allerdings kann hier die Szintillatoranregung nur von einer Seite erfolgen. Es besteht keine Möglichkeit, das Eichpräparat zwischen zwei Module einzubringen. Statt wie zuvor oberhalb der Türme müssen die Schrittmotoren nun seitlich das Eichpräparat an die Szintillator/Uran-Lagen heranführen, da die Module in ihrer endgültigen Position aufgebaut sind, und ein Turm nun waagrecht steht. Dies bedingt ein niedriges Gewicht des Aufbaus, da die gesamte Konstruktion an den Modulen verschraubt werden muß und keine weitere Unterstützung möglich ist. Auch das Anpressen der Flügel an die Oberfläche der Spannbänder gewinnt hier mehr an Bedeutung, denn in dieser Lage übernimmt das Andrücken ebenfalls die wichtige Funktion der horizontalen Positionierung der Transportröhren, die jetzt nicht mehr allein durch die Schwerkraft vorgenommen werden kann.

Mit der in Abbildung 2.4 skizzierten Konstruktion des Außenabasters lassen sich immer zwei beliebige Türme pro Außenabtasterposition an jeder Ortsposition vermessen. Danach muß der gesamte Aufbau per Hand umgesetzt werden. Der Andruck des Flügels erfolgt über Stangen mit einer drehbaren Aufnahme für den Flügel. Diese Stange wird am unteren T-Träger verschraubt und kann über ein Gelenksystem für jede Position der Flügelaufnahme einen definierten Druck ausüben. Dieses Gelenksystem muß für jede Flügelposition in seiner Höhe neu ausgerichtet werden, um den optimalen Andruck zu erreichen. Insgesamt stehen drei solcher Stangen für FCAL und RCAL zur Verfügung. Der Flügel besteht aus einer gekürzten Wellenlängenschieber-Kassette und ist mit drei Transportröhren ausgestattet. Das Eichpräparat wird auf ähnliche Weise wie beim Außenabaster für den Serienbetrieb in die Referenzposition gebracht. Mit Hilfe dieser Anordnung wird sich in einem gewissen Rahmen feststellen lassen, inwieweit an den Wellenlängenschiebern und Szintillatoren ein Strahlenschaden eingetreten ist (vergleiche Kapitel 8). Ob dann weitere Messungen auch an anderen Modulen mit der Innenabtastung erfolgen müssen, wird von der Schwere des Schadens abhängen. Um die Brauchbarkeit dieses Außenabasters zu überprüfen, stehen auch die Module am Außenbereich des Kalorimeters zur Verfügung. Ein entstandener Strahlenschaden an diesen Modulen sollte sich im wesentlichen aus der Radioaktivität des Urans ergeben.

2.2 Aufbau des Eichpräparates

Die Teilchen des radioaktiven Präparats müssen in der Lage sein, einige Materialsichten zu durchqueren, bevor sie auf das Szintillatormaterial treffen (Plastik, Messing, Stahl). Andererseits war man aus Gründen des Personenschutzes bemüht, ein Präparat einzusetzen, das keine zu großen Energien und Aktivitäten freisetzt. Die Voraussetzungen erfüllen nur γ -Strahler. Die Tabelle 2.1 zeigt die Eigenschaften des gewählten γ -Strahlers Kobalt60 (^{60}Co). Bei diesem Präparat handelt es sich um einen reinen γ -Strahler, da die emittierten Elektronen kaum in der Lage sind, das Präparat selbst oder sogar seine Umhüllung zu durchqueren. Ein relativ hoher Prozentsatz der γ -Quanten des ^{60}Co -Präparats durchdringt das vorgelagerte Material und deponiert seine Energie in mehrere Szintillator/Uran-Lagen. Die Abbildung 2.5 zeigt die Verteilung der Energiedeposition auf die einzelnen Szintillatoren [HUN 91]. Die experimentellen Werte wurden mit dem Außenabtaster (vergleiche Abschnitt 2.1.2) erhalten.

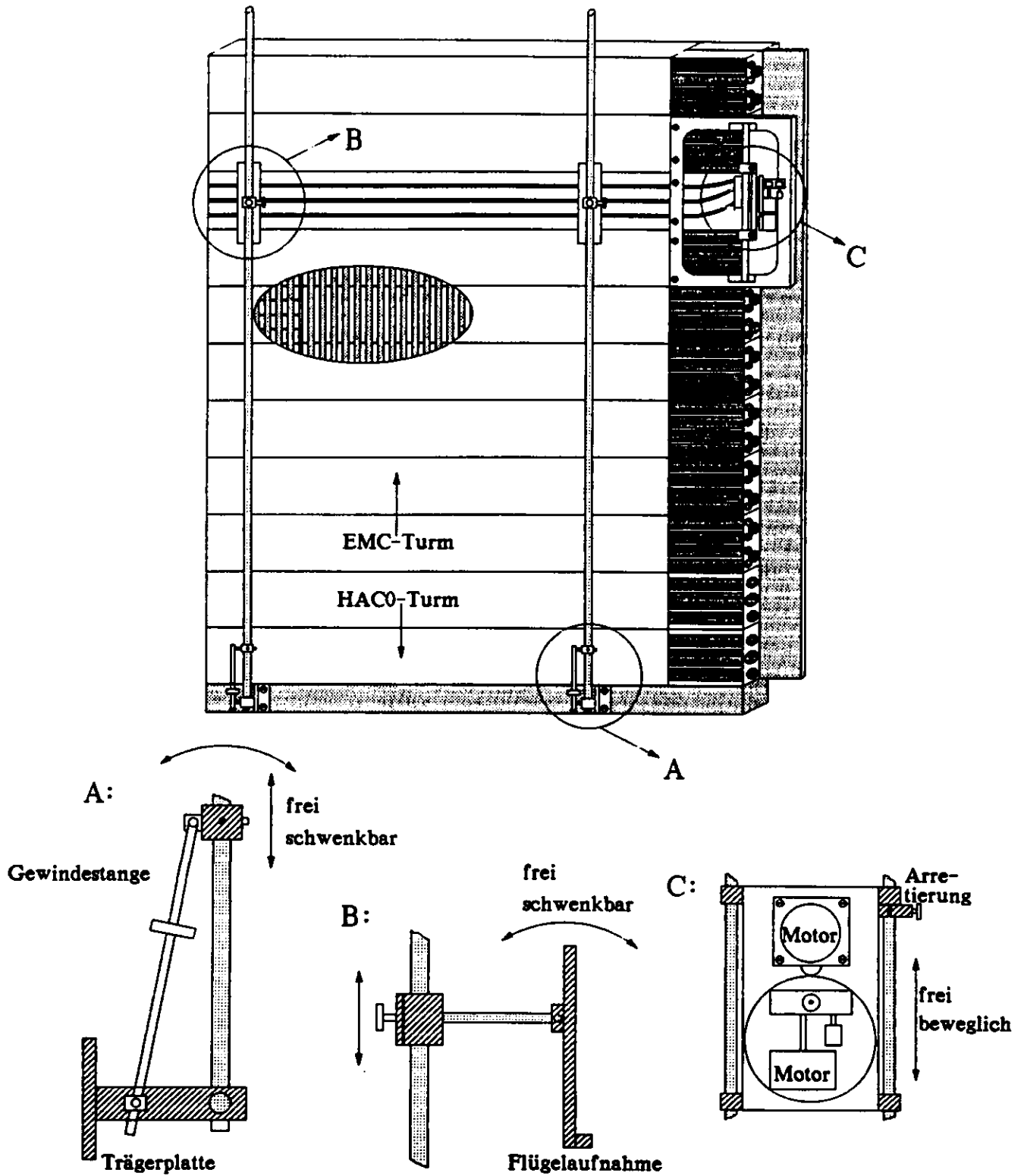


Abbildung 2.4: Prinzipzeichnung des Außenabtasters für den ZEUS-Detektor.

Zerfallsreihe	${}^{60}\text{Co} \xrightarrow{\beta^-} {}^{60}\text{Ni}^{**} \xrightarrow{\gamma_1} {}^{60}\text{Ni}^* \xrightarrow{\gamma_2} {}^{60}\text{Ni}$
Emittierte Teilchen	$\beta^- : 0.314 \text{ MeV}$ $\gamma_1 : 1.173 \text{ MeV}$ $\gamma_2 : 1.332 \text{ MeV}$
Halbwertszeit	5.2 a
Aktivität	2 mCi (zur Zeit der Herstellung)

Tabelle 2.1: Eigenschaften des ${}^{60}\text{Co}$ -Präparates.

Man erkennt beispielsweise, daß in den ersten Nachbarn des dem ${}^{60}\text{Co}$ -Präparat gegenüberliegenden Szintillators noch 11% der sichtbaren Energie deponiert wird, der achte Szintillator trägt noch mit 1% zu dem ${}^{60}\text{Co}$ -Signal bei.

Neben diesem Präparat gibt es noch grundsätzlich andere Alternativen, von denen an dieser Stelle zwei dargestellt werden sollen:

- ▷ Die Verwendung eines kurzlebigen Präparates, beispielweise ${}^{48}\text{V}$, das unter anderen drei γ -Linien bei $E_\gamma = 938.5 \text{ keV}$ (100%), $E_\gamma = 312.1 \text{ keV}$ (97.5%) und $E_\gamma = 2240.3 \text{ keV}$ (2.4%) besitzt. Es müßte aufgrund seiner kleinen Halbwertszeit von 16 Tagen bei einem eventuellen Verlust im Modul nicht aufwendig geborgen werden. Die Herstellung könnte in einem Zyklotron durch Bestrahlung von ${}^{48}\text{Ti}$ mit Protonen erfolgen. Der große Aufwand zur termingerechten Herstellung einer großen Anzahl von Präparaten wäre allerdings organisatorisch bei einem geregelten Zyklotronbetrieb, wo die Herstellung solcher Präparate nur ein kleiner Teilaspekt sein kann, schwer durchzusetzen.
- ▷ Die Verwendung eines Präparates mit γ -Linien geringerer Energien brächte den Vorteil der noch lokaleren Anregung des Kalorimeters und des leichteren Personenschutzes. Hierfür würde sich beispielsweise ${}^{54}\text{Mn}$ eignen, welches eine γ -Linie (nahezu ausschließlich) mit $E_\gamma = 834.0 \text{ keV}$ aufweist und eine Halbwertszeit von $T_{1/2} = 312$ Tage hat. Die Eindringtiefe der γ -Quanten in die Szintillatoren wäre jedoch kleiner, wodurch Randeffekte einen größeren Einfluß auf die Ergebnisse ausüben, was die Aussagefähigkeit der Messungen einschränken würde, wie noch gezeigt wird.

Neben den genannten Vorteilen zu den dargestellten Alternativen hat Kobalt zudem den Vorteil, daß es mechanisch leicht zu bearbeiten und deshalb in fast jeder Größe verfügbar ist. Eine Aktivität von 2 mCi führte zu dem gewünschten ${}^{60}\text{Co}$ -Signal, das in etwa die Größe des durch die Aktivität des Urans in einem Kalorimeterturm erzeugten Signals hat. Um das ${}^{60}\text{Co}$ -Präparat in den Stahltubus mit einem Durchmesser von 1.1 mm einführen zu können, bedurfte es des kleinen Querschnittes von 0.8 mm^2 , um möglichst nur wenige Szintillatoren gleichzeitig anzuregen, der Länge von etwa einen Millimeter.

2.2.1 Eichpräparat für die Innenabtastung

Der kleine vernickelte ${}^{60}\text{Co}$ -Draht wurde an den verschlossenen Anfang eines Stahltubus gebracht, der durch einen langen Federstahldraht aufgefüllt wurde. Die Länge des Stahltubus wurde so gewählt,

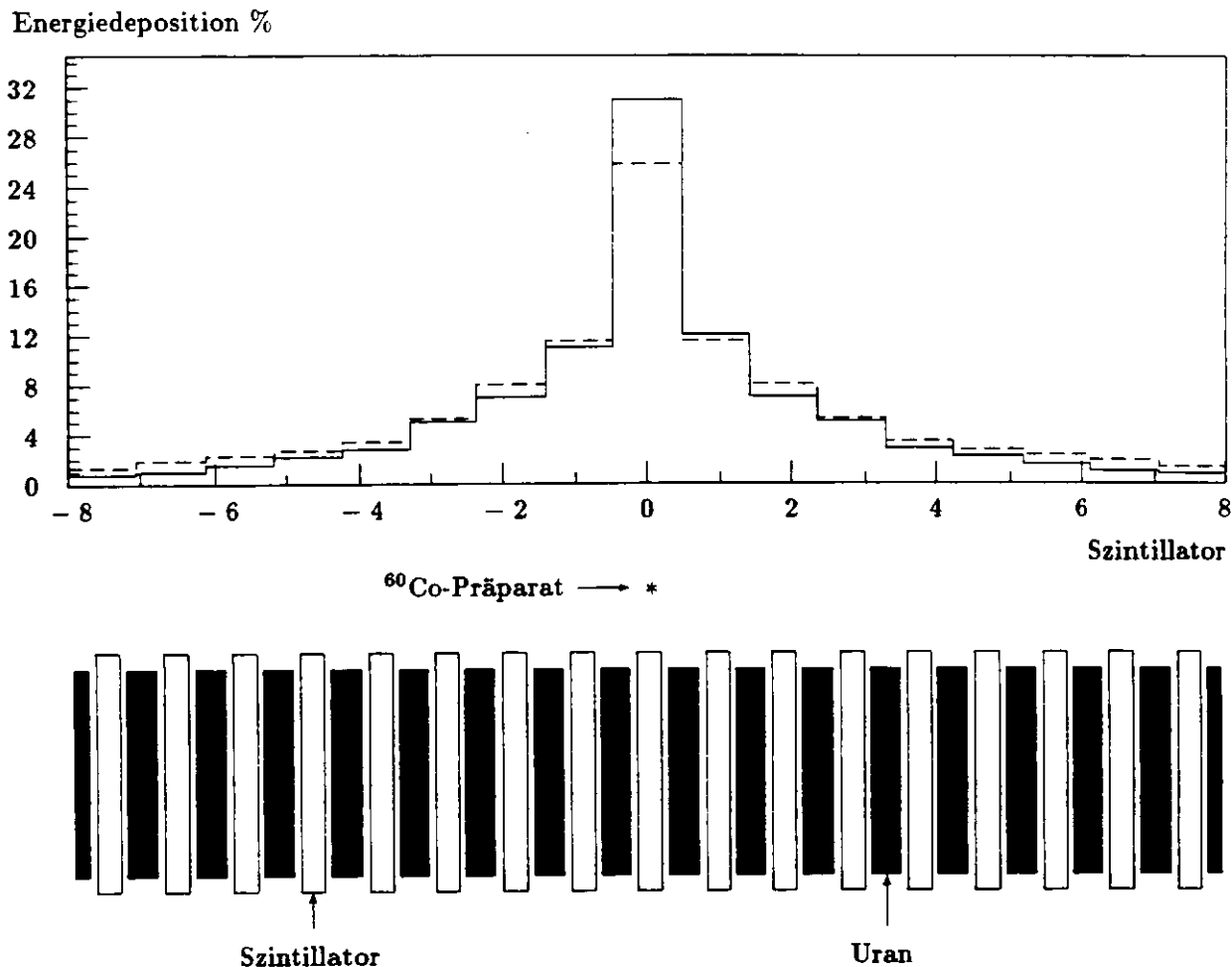


Abbildung 2.5: Energiedeposition in den einzelnen Szintillatoren
 — Monte-Carlo-Simulation
 - - - ^{60}Co -Messungen

daß die Verlotung Stahltubus/Federstahldraht beim Befahren der Transportröhren der Innenabstimmung nicht mehr in die 90 Grad Krümmung hereinragt. Der genaue Aufbau läßt sich aus der Abbildung 2.6 entnehmen, die die Konstruktionszeichnung der Herstellerfirma DuPont darstellt. Im folgenden wird unter dem Begriff Eichpräparat stets der gesamte Aufbau verstanden, d.h. das ^{60}Co -Präparat mit seiner äußeren Umhüllung, dem Stahltubus und dem Federstahldraht. Ist nur der ^{60}Co -Draht selbst gemeint, wird er mit ^{60}Co -Präparat bezeichnet.

Im Zuge der ersten Messungen an den großen FCAL-Modulen am CERN in Genf erwies sich der mechanische Aufbau in vielen Fällen als unzureichend, häufig wurde das Ende der Transportröhren aufgrund mechanischer Probleme nicht mehr erreicht, die nicht selten so groß waren, daß überhaupt keine Informationen an dieser Stelle gewonnen werden konnten. Das Hauptproblem bestand darin, daß die Gleitreibung innerhalb der Transportröhren nach Durchfahren der Krümmung sprunghaft anstieg. Dieses Verhalten läßt sich dadurch erklären, daß der Draht - eingefangen zwischen der Schubkraft des Motors von hinten und der Reibungskraft des Stahltubus von vorne - sich in dem Transportrohr aufwellt, wodurch die Kontaktfläche vergrößert wird. Der Federstahldraht des Eichpräparates weist eine zu kleine Steifigkeit auf. Dieser Sachverhalt wurde durch Messungen an einem Teststand nachvollzogen und bestätigt. Geeigneter ist demnach ein Aufbau mit einem durchgängigen Stahltubus über die volle

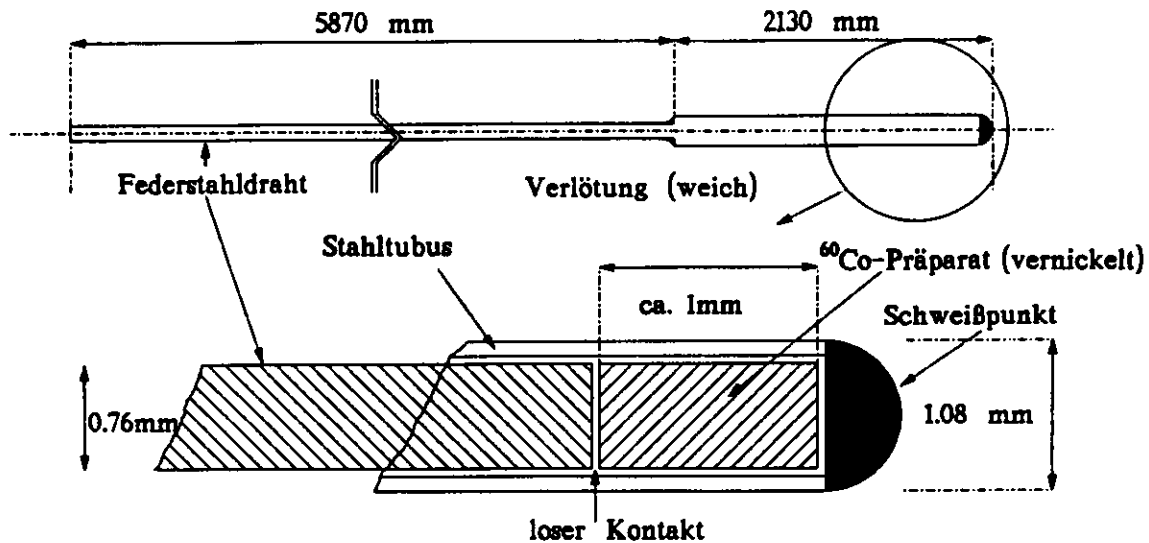


Abbildung 2.6: Ursprünglicher Entwurf des Eichpräparates (DuPont).

Länge des Federstahldrahtes, was zudem eine bessere Kraftübertragung der Antriebsräder garantiert, da die Antriebsräder nur noch auf eine durchgängige Drahtdicke optimiert werden müssen. Für zukünftige Messungen innerhalb der Module wird nur dieser Aufbau Verwendung finden. Es wurden bereits einige inaktive Prototypen hergestellt, die ihre Brauchbarkeit bei unterschiedlichen Messungen unter Beweis stellten.

2.2.2 Eichpräparat für die Außenabtastung

Im Zuge der Entwicklung des Außenabtesters wurde auch ein neuer Aufbau für das Eichpräparat gewählt. Dieser verbesserte Aufbau stützt sich im wesentlichen auf die Idee einer doppelten Kapselung des ^{60}Co -Präparates (Abbildung 2.7). Zu diesem Zweck wurde das herkömmliche Eichpräparat nach etwa 10 cm gekappt und an der Schnittstelle verlötet, um es erneut in einen Stahlrohr, der mit einem pilzförmigen Verschluss versehen wurde, einzusetzen. Das Ganze wurde wieder mit einem Federstahldraht aufgefüllt. Allerdings ist dieser Draht nicht mit dem 10 cm langen vorderen Stück verbunden. Auf diese Weise ist an der Berührungsstelle eine gewollte Schwachstelle entstanden, die bei Verknickungen oder Verwindungen des Eichpräparates zuerst brechen soll, wobei das ^{60}Co -Präparat mit der einfachen Kapselung unbeschädigt bleibt. Dieser Aufbau hat sich in über 4000 Läufen hervorragend bewährt. Die Schwachstelle wurde regelmäßig überprüft und wies erst am Ende der Serienmessungen eine leichte Beschädigung auf.

Für eine Messung innerhalb der Module ist dieser Aufbau aufgrund der Steifigkeit nicht geeignet. Eine Verkleinerung des Querschnitts auf nicht mehr als 1.2 mm würde den Einsatz einer doppelten Kapselung ermöglichen.

Die relativ hohe Aktivität des Eichpräparates zwingt die Benutzer zur besonderen Vorsicht. Das Eichpräparat wurde während aller Unterbrechungen des Meßbetriebes in einer Bleiabschirmung gelagert, die die Dosisleistung von $\dot{D} = 100 \mu\text{Sv/h}$ an der Oberfläche nicht überschritt. Der Bereich um den Teststand wurde für die Zeitdauer der Messungen im Sinne des Strahlenschutzes als Überwa-

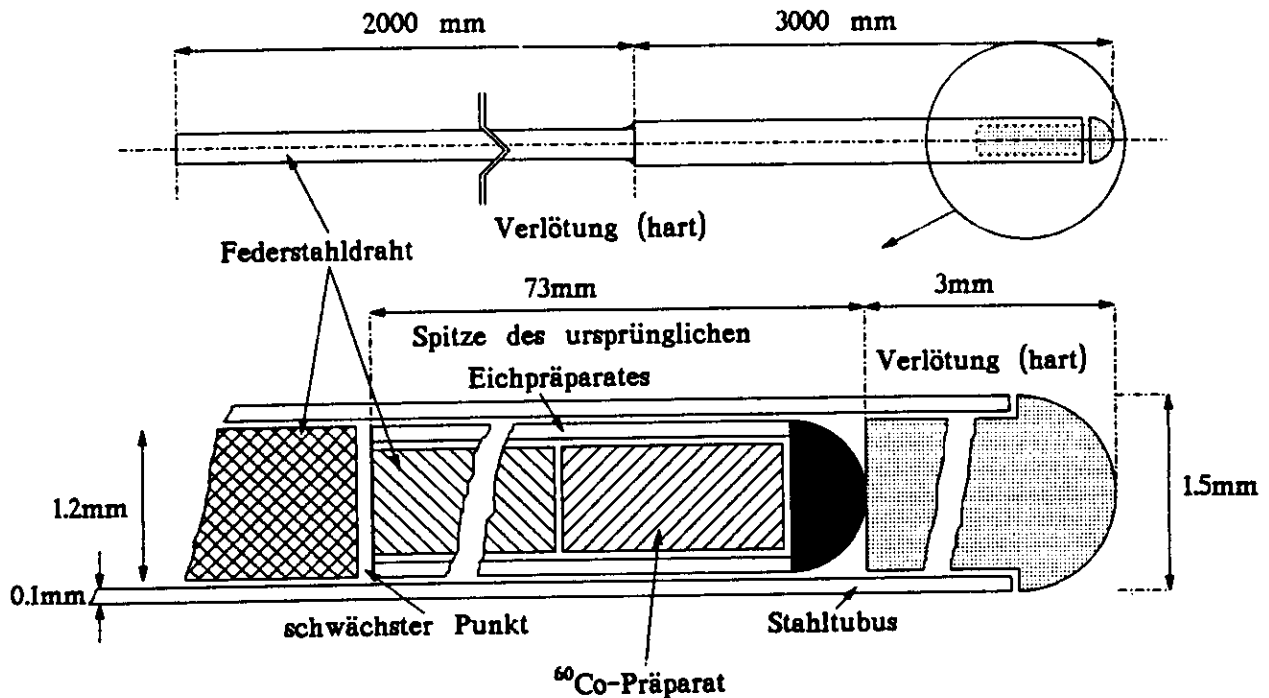


Abbildung 2.7: Der Aufbau des Eichpräparates für den Außenabtaster.

chungsbereich eingerichtet. Die Tabelle 2.2 gibt die Strahlendosisleistungen für das Eichpräparat an, die mit nachfolgender Gleichung [POE 89] berechnet wurde:

$$\dot{D} = 3.2 \cdot 10^{-2} \frac{\alpha [\mu Ci]}{r^2 [cm^2]} [mSv/h] \quad (2.1)$$

mit

- α = Aktivität des Präparates,
- r = Abstand zum Präparat.

Abstand zum ^{60}Co -Präparat r [cm]	Strahlendosisleistung \dot{D} des ^{60}Co -Präparates für 2 mCi
7	5510 $\mu\text{Sv/h}$
15	1200 $\mu\text{Sv/h}$
60	75 $\mu\text{Sv/h}$
80	42 $\mu\text{Sv/h}$
100	27 $\mu\text{Sv/h}$
130	16 $\mu\text{Sv/h}$

Tabelle 2.2: Berechnete Strahlendosisleistungen für verschiedene Abstände vom ^{60}Co -Präparat. Die Werte für die größeren Abstände wurden experimentell bestätigt. Als Vergleich sei hier erwähnt, daß die natürliche Strahlenbelastung ca. 400 - 4000 $\mu\text{Sv/a}$ beträgt.

Bei einem Abstand von 80 cm beträgt die Dosisleistung in etwa so viel wie die des Urans an der Oberfläche der Kalorimetermodule.

2.3 Vorschubsystem des Eichpräparates

Um das Eichpräparat möglichst ohne Personengefährdung und zuverlässig zu den gewünschten Sektionen des Kalorimeters zu transportieren, ist ein automatisierter Vorschub nötig, der die Transportröhre anwählt und das Eichpräparat in ihr bewegt. Hierfür wurden im wesentlichen zwei Schrittmotoren der Firma SIGMA Instruments Inc. eingesetzt. Beide Motoren sind auf einer Grundplatte montiert, die der des FANOUTs gleicht und leicht mit diesem verschraubt werden kann. Der eine Motor bewegt im Voll- oder Halbschrittmodus eine kreisrunde Scheibe, auf der der zweite Schrittmotor angebracht ist. Die Scheibe dient dem Anwählen der einzelnen Transportröhren, die über entsprechende Bohrungen in der Grundplatte erreichbar sind. Die Referenzposition der Wählscheibe wird über eine Lichtschranke (Firma TRW, Typ OBP 804) definiert, die durch eine kleine Metallfahne an der Wählscheibe ausgelöst wird.

100 Bohrungen, die von der Referenzposition (Adresse:0) mit -1 bis -50 (Anwahl im Gegenuhrzeigersinn), beziehungsweise 1 bis 50 (Anwahl im Uhrzeigersinn) durchnummeriert sind, befinden sich kreisförmig auf der Grundplatte. Das Schema wurde so gewählt, weil zwei Röhren mit der Adresse x und $-x$ gleichlang sind, d.h. zum selben Turm führen, aber sich je nach Vorzeichen auf der linken oder rechten Modulseite befinden.

Der Schrittmotor auf der Wählscheibe treibt ein Polyurethanrad² an. Zwischen diesem und einem passiven zweiten Rad befindet sich das Eichpräparat. Ein zweites Paar passiver Räder befindet sich oberhalb des ersten Paares und wird durch die Bewegung des Eichpräparates mitbewegt. Eines der Räder des oberen Paares ist mit einem Winkeldekodierer verbunden (SANDTRON, REX-32), dessen Bewegungen einem HCTL-2000 Baustein übermittelt werden. Seine Umdrehungen messen die Länge des vor- oder zurückgeschobenen Stahldrahtes. Eine Umdrehung seiner Achse setzt sich dabei aus 400 Einzelschritten zusammen. Mit Hilfe dieser Längenmessung läßt sich die Photomultiplierantwort als Funktion des Ortes (Z-Richtung) festlegen. Zudem wird mit dieser Information auch die Referenzposition des Eichpräparates festgelegt. Als Referenzposition wird die Position bezeichnet, in der das Eichpräparat so weit zurückgezogen wurde, daß die Wählscheibe sich frei drehen kann, und ein Herausrutschen des Eichpräparates aus den Polyurethanrädern noch nicht möglich ist. Zusätzlich befindet sich unterhalb des Antriebrads noch eine weitere Lichtschranke, die durch das Eichpräparat ausgelöst wird. Eine Drehung der Wählscheibe ist nur dann erlaubt, wenn die Lichtschranke frei ist, und wenn die registrierte Länge der Bewegung aus der Transportröhre mit der für die Hineinbewegung übereinstimmt.

Für die Ansteuerung der Motoren und für die Auslese des Winkeldekodierers wurde ein Mikroprozessor der Baureihe 68HC11 eingesetzt, der mit einer CPU der Serie 6800/6801 ausgestattet und in der Programmiersprache FORTH kodiert ist. Er versorgt die Schrittmotoren mit einer Rechteckspannung der Weite τ und der Periode Γ , was bei jeder Ansteuerung zu einer Bewegung des Motors während der Dauer von $\tau = 2.5 \mu\text{s}$ führt. Die Geschwindigkeit läßt sich durch Variieren der Periode Γ verändern, d.h. durch die Längen der Pausen zwischen den einzelnen Bewegungsphasen nicht variierbarer Zeitlänge τ . Möglich sind dabei Perioden von $7 \mu\text{s} \leq \Gamma \leq 35 \mu\text{s}$. Für den Meßvorgang selbst wurde die längste mögliche Periodendauer gewählt, was bei einem Raddurchmesser des Antriebrades von 20 mm zu einer mittleren Geschwindigkeit $\bar{v} = (4.4 \pm 0.1) \text{ mm/s}$ führt. Die Abweichung von \bar{v} wurde experimentell ermittelt.

Um den Startpunkt der Messung, also das Ende der Transportröhre zu erreichen, wurde aus Gründen der Zeitersparnis nach Möglichkeit die schnellste Geschwindigkeit gewählt, das war $\bar{v} \approx 80 \text{ mm/s}$. Diese Geschwindigkeit wurde nur in den Bereichen auf das Minimum reduziert, in denen das Eichpräparat

²Polyurethan eignet sich besonders gut, da es einen geringen Abrieb bei einem großen Reibungskoeffizienten aufweist.

einem erhöhten Risiko der mechanischen Beschädigung ausgesetzt war. Diese Bereiche liegen in dem Aluminiernaufbau zur Aufnahme der Lichtschranke, in der Ankopplung des FANOUTs an die Transportröhren, in der 90 Grad Krümmung der Transportröhre der Innenabtastung und 30 mm vor dem Erreichen des Meßstartpunktes, um ein Auffahren des Eichpräparats gegen die Frontplatte des Moduls mit voller Geschwindigkeit zu vermeiden. Die Bewegung des Winkeldekodierers wurde alle 300 ms ausgelesen und mit dem vorherigen Wert verglichen. Ist die Differenz beider Werte kleiner als umgerechnet ein Millimeter, wird der Vorschub gestoppt. Beträgt die gemessene Strecke in etwa die Länge der Transportröhre, beginnt die Messung, das Eichpräparat wird langsam zurückgezogen. Wurde die Länge nicht erreicht, wird davon ausgegangen, daß ein unüberwindbares Hindernis den Transport blockiert. Der Antrieb wird beendet und ohne weitere Aktivitäten wartet der Mikroprozessor die Eingabe des Abruchs ab. Ein weiterer Versuch ist nicht vorgesehen, um das Eichpräparat nicht zu gefährden.

Eine Ortsinformation konnte nur in etwa nach jeder dritten bis vierten Messung des Photomultiplier-signals festgehalten werden, da der Winkeldekodierer aus technischen Gründen nur alle 300 ms ausgelesen werden konnte. Lineare Interpolation lieferte die Ortsinformation für die Meßwerte ohne Winkeldekodierersignal.

2.4 Datennahmesystem

Die Abbildung 2.8 zeigt schematisch den gesamten Aufbau der Außenabtastung, mit dem alle der Module bis auf eine Ausnahme (FCD5) vermessen wurden. Die Auslese der Wellenlängenschieber für die FEMC-Sektionen erfolgte über Photomultiplier des Typs XP-1911 des Herstellers VALVO. Alle anderen Sektionen wurden mit R-580 Photomultiplier von HAMAMATSU ausgelesen. Alle Photomultiplier werden über sogenannte aktive Spannungsteiler (Cockroft Walton Spannungsteiler) mit Hochspannung versorgt, d.h. die Hochspannung wird nicht von einer Spannungsquelle über Kabel herangeführt, sondern direkt am Photomultiplier erzeugt. Dieses System hat im Vergleich zu herkömmlichen Spannungsteilern den Vorteil der geringeren Verlustleistung und stellt sicherheitstechnisch aufgrund der kleinen Spannungen (30 Volt anstelle der benötigten 1100 Volt) in den Zuleitungen eine kleinere Gefahr dar.

Die Spannungsversorgung wurde von Hochspannungskontrolleinheiten gewährleistet, die als CAMAC-Einschübe zur Verfügung standen. Jede dieser Karten ist mit 16 unabhängigen Kanälen ausgestattet, was den Einsatz von 16 dieser Karten für die größten Module (Typ F11) mit 252 Photomultipliern erforderte.

Das Analogsignal der Photomultiplier wurde durch für diese Messung speziell eingesetzten Integratoren verarbeitet. Innerhalb einer Integrationszeit von $\tau \approx 24$ ms laufen in etwa $4 \cdot 5 \cdot 10^5$ Einzelsignale auf. Die Pulshöhe eines Einzelsignals beträgt in etwa 2 mV und hat eine Abklingzeit von 25 ns. Die integrierten Analogsignale wurden schließlich durch einen 16 Bit-Analog-Digital-Wandler digitalisiert. Jeder dieser drei VME-ADC wurde mit jeweils 96 unabhängigen Eingängen benutzt, was zu einer Auslesezeit für die ADC von mindestens 50 ms führt (ein Multiplexer durchläuft nacheinander alle 96 Kanäle). Im Meßbetrieb betrug die Auslesezeit 60 - 90 ms. Die ADC ermöglichen eine Digitalisierung des Signals in 4096 Kanäle, die auf eine Spannung von ± 5 Volt verteilt wurden. Ein Kanal entspricht demnach 2.44 mV. Nähere Informationen können dem Report von Dawson et al. [DAW 89] entnommen werden.

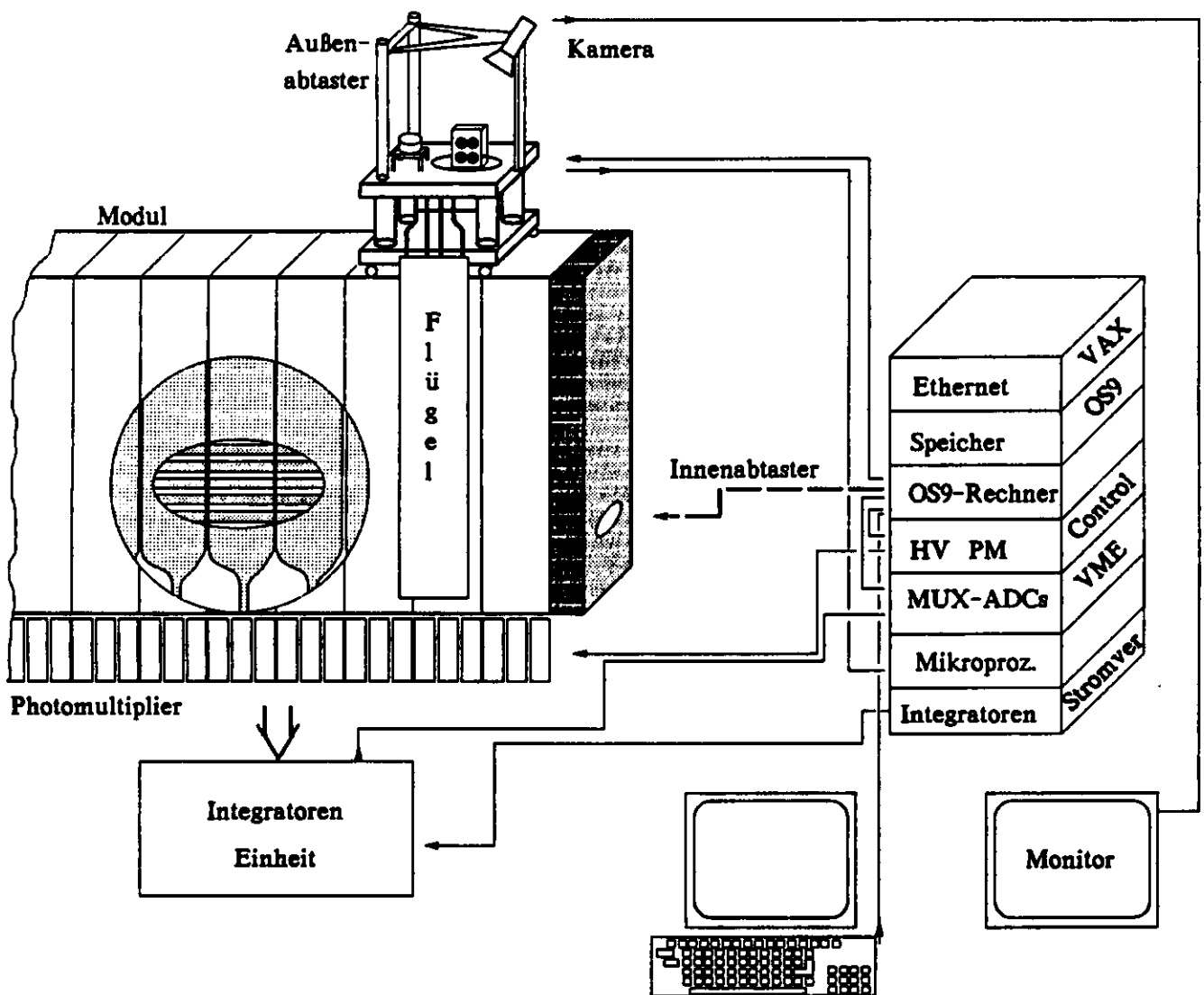


Abbildung 2.8: Die Komponenten des Datennahmesystems.

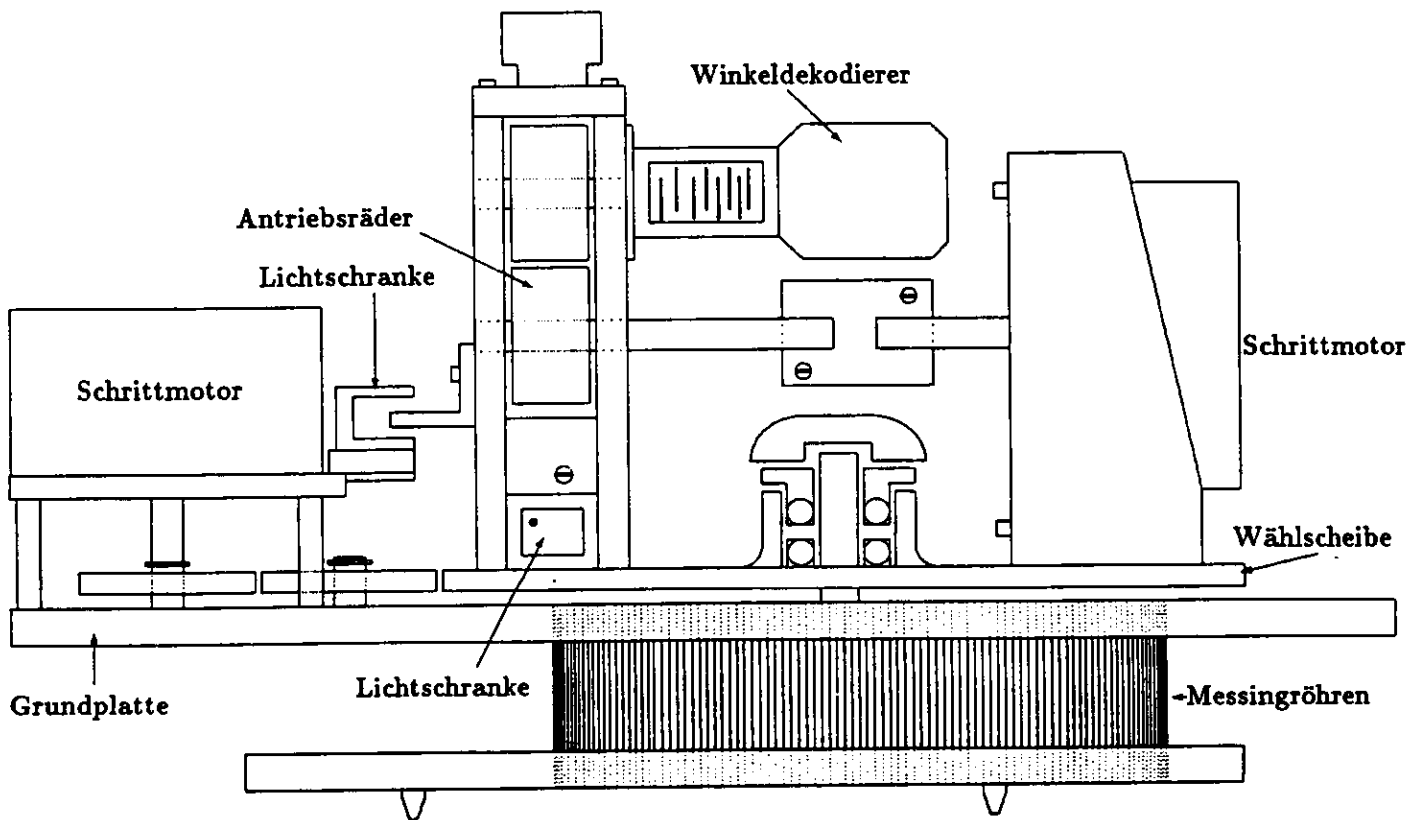
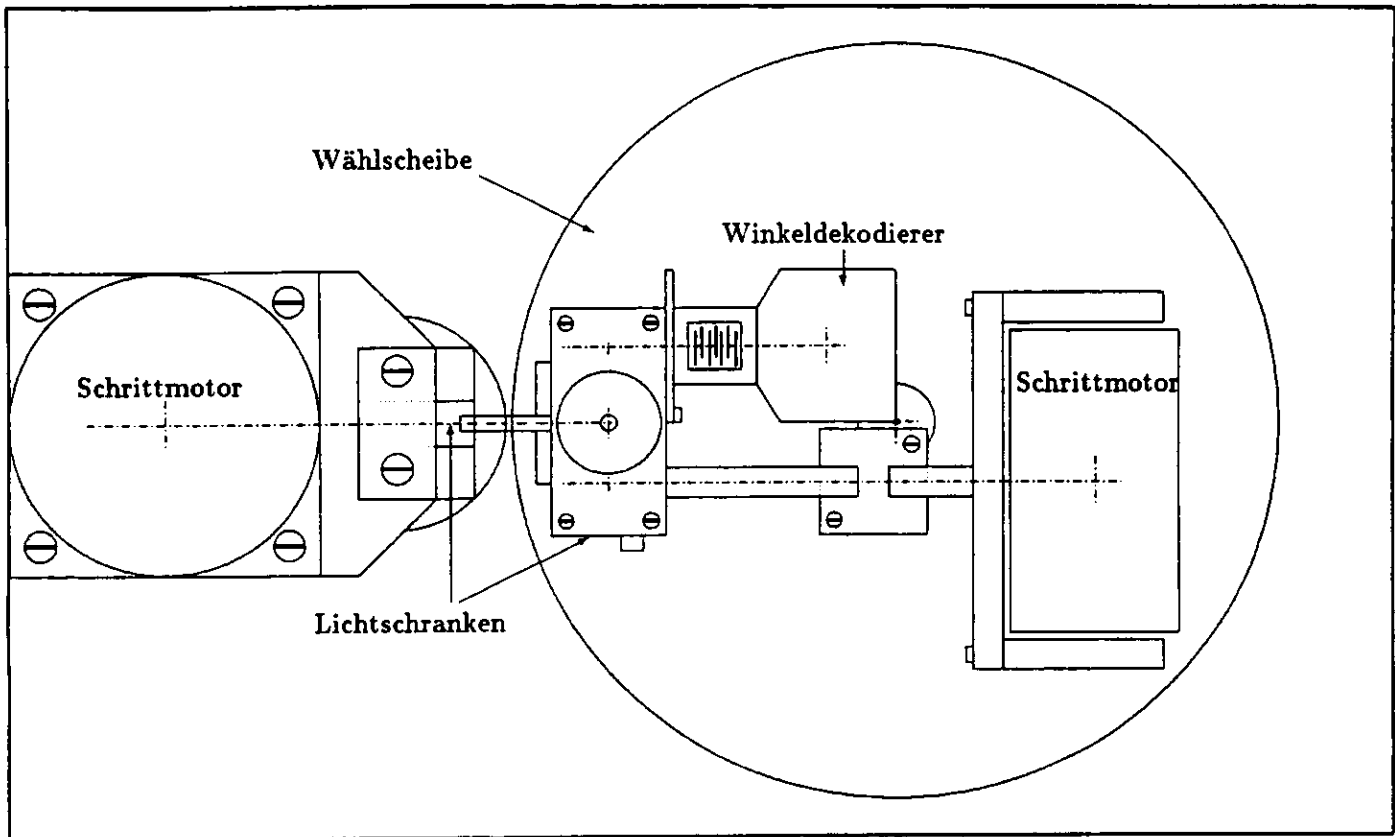


Abbildung 2.9: Die Antriebsmotoren der Wahlscheibe und des Eichpräparates.

Die Datennahme und Speicherung wurde durch einen VME OS-9 Rechner realisiert. Der Rechner steuert den Mikroprozessor für die Schrittmotoren und liest den Winkeldekodierer aus. Als Speichermedium diente dem OS-9 Rechner eine Festplatte mit ca. 80 MByte Speicherkapazität, von der etwa die Hälfte für die Speicherung der ^{60}Co -Läufe zur Verfügung stand. Die Festplatte konnte wegen der großen Datenmenge nicht als permanenter Speicher eingesetzt werden, vielmehr war es erforderlich mit Hilfe einer bestehenden Ethernetverbindung die Daten zunächst auf die erheblich größere Festplatte einer VAX des DESY-Rechenzentrums zwischenspeichern. Die endgültige Speicherung erfolgte dann auf Magnetbänder.

2.5 Versuchsdurchführung

An dieser Stelle soll kurz auf die Durchführung einer Messung eingegangen werden. Eine Beschreibung erscheint notwendig, um die Photomultiplierantwort in ihrer Darstellungsform besser nachvollziehen zu können. Dies gilt besonders für das Kapitel 5.

Weitere für den Meßbetrieb wichtige Beschreibungen sind in [MEY 91, GLO 91, HUN 91] nachzulesen.

2.5.1 Einstellen der Photomultiplier-Betriebsspannungen

Zum Einstellen der Photomultiplier bedient man sich des Szintillatorsignals, welches durch die Radioaktivität des Urans (UNO) erzeugt wird. Da sehr viele Photomultiplier häufiger eingestellt werden müssen, wurde diese Aufgabe von einem Programm³ durchgeführt. Zunächst wird diesem Programmpaket die aktuelle Verdrahtung der Photomultiplier mitgeteilt, indem in eine Tabelle die Hochspannungsanschlüsse und die benutzten Kanäle der Integratoren eingetragen werden. Diese Tabelle legt ebenfalls fest, ob ein Photomultiplier zu einer EMC- oder HAC-Sektion gehört. Diese Information ist aus zwei Gründen wichtig: Zum einem ist die Lichtmenge in den einzelnen Sektionen aufgrund der unterschiedlichen Anzahl der Szintillatoren nicht gleich groß, was unterschiedliche Verstärkungen der Photomultiplier erfordert und zum anderen hat jeder Photomultipliertyp seine in dem Programm festgelegten spezifischen Parameter zum iterativen Einstellen der gewünschten Betriebsspannung. Nach Erstellen der Tabelle werden nacheinander alle Photomultiplier auf eine feste Spannung eingestellt. In der Tabelle 2.3 sind die üblichen UNO-Werte in Millivolt der unterschiedlichen Sektionstypen aufgeführt. Nach einigen Stunden Photomultiplier-Betrieb waren die UNO-Werte für gewöhnlich stabil.

Sektion	FCAL	RCAL
HACØ	2000 mV	2000 mV
EMC	500 mV	1000 mV
HAC1	2500 mV (2200 mV) ^a	2500 mV
HAC2	2500 mV (2200 mV) ^a	

^aDiese Werte galten für Module mit kurzen HAC2-Sektionen

Tabelle 2.3: Einstellung des UNO-Werts für verschiedene Sektionen.

Es wurden keine Schwankungen größer als 0.2 bis 0.3% zugelassen. Dieses Verfahren bietet den Vorteil, daß jede Sektion auf ein zeitlich stabiles Signal eingestellt und ein Vergleichen der Photomultiplierantwort untereinander ermöglicht wurde.

³Dieses Programmpaket wurde von G.Drews entwickelt.

2.5.2 Meßbetrieb

Nachdem auf dem OS-9 Rechner der Programmteil gestartet wurde, der mit dem Benutzer menu-gesteuert kommuniziert, muß erneut eine aktuelle Modultabelle erstellt werden. Durch diese Tabelle wird dem Kontrollprogramm⁴ mitgeteilt, welche Transportröhre mit welcher Länge⁵ zu welchem Turm führt. Alle Transportröhren, bei denen zuvor eine nicht abstellbare Unregelmäßigkeit festgestellt wurde, werden hier als nicht benutzbar deklariert, wodurch ein späteres Anfahren dieser Transportröhren nicht mehr möglich ist. Die Längenangaben der Transportröhren in der Tabelle dienen dem Programm als Referenzwert, um den Startpunkt der Messung in Verbindung mit dem Stoppen des Vortriebs zu erkennen. Mit Hilfe dieser Tabelle lassen sich dann alle Transportröhren anfahren. Das sind für die Innenabtastung maximal 84 und für die Außenabtastung 8. Das Kontrollprogramm leitet die Datennahme selbständig ein, nachdem der Startpunkt, das Ende einer Transportröhre erreicht wurde. Vorwählbar ist außerdem die Größe des Bereichs der vermessen werden soll; das waren bei FCAL etwa 1600 mm und bei RCAL etwa 950 mm. In diesem Bereich bewegt sich das Eichpräparat mit der langsamsten Geschwindigkeit, während immer 12 Photomultiplier ausgelesen werden.

2.5.3 Datenmenge und Zeitaufwand

Die Daten jedes ⁶⁰Co-Laufes werden im Zebra Exchange Format abgelegt und sind größtenteils noch mit redundanten Informationen belegt. Der belegte Speicherplatz dieser Rohdaten beträgt für einen FCAL-Turm in etwa 1.30 MByte. Um diese Datenmenge zu reduzieren, werden Datenpunkte [KRÜ 90, GIL 90] für einen Millimeter zusammengefaßt, und die redundanten Dateninformationen gelöscht. Diese Datenkonzentration führt auf eine Verringerung der Datenmenge des zuvor erwähnten ⁶⁰Co-Laufs auf 0.18 MByte. Im Rohdatenformat war es möglich, bis zur Hälfte der ⁶⁰Co-Läufe für eines der großen FCAL-Module auf der Festplatte des VME-Rechners zu speichern, also etwa 50 Läufe. Danach war es erforderlich, die Daten auf den externen Rechner zu transferieren. Die reine Meßzeit für einen Lauf bei einer Turmlänge von 1600 mm (FCAL) beträgt etwa 6 Minuten, die Mindestzeit für den vollständigen Lauf, d.h. inklusive Anwählen der entsprechenden Transportröhren und aller Bewegungen des Eichpräparats beträgt 10 bis 12 Minuten. Zwischen den einzelnen Läufen entstehen kleine Verzögerungen durch die fällig werdende Bewegung des Außenabtasters, um den nächsten Turm anzuwählen oder um einen UNO-Lauf für den gesamten Modul zu nehmen. Bei einem F11-Modul beträgt dann die gesamte Meßzeit etwa 20 Stunden. Die insgesamt 48 Module ließen sich nur durch das Einrichten eines geregelten Schichtbetriebes bewältigen, zumal alle Module innerhalb einiger Wochen auszumessen waren. Die Tabelle 2.4 gibt die benötigte Meßzeit und die Gesamtanzahl der Läufe einiger Modultypen wieder. Die benötigte Zeit zur Bearbeitung eines Moduls dehnt sich natürlich noch durch die notwendigen Vorbereitungen aus.

Für die gesamten FCAL-, und RCAL-Sektionen waren annähernd 5000 ⁶⁰Co-Läufe erforderlich, inklusive Wiederholungsmessungen und einiger spezielle Messungen. Die anfallende Rohdatenmenge füllt 40 Bänder (6250 bpi Bänder⁶), die der konzentrierten Daten immerhin noch 5 Bänder⁷.

⁴Dieses Kontrollprogramm wurde von H. Kammerlocher erstellt.

⁵Für die Außenabtastung wurde eine feste Länge eingesetzt. Für die Innenabtastung änderte sie sich jeweils mit dem Turm.

⁶bpi = bits per inch

⁷Bei dem gewählten Blockformat für die benutzten Bänder nimmt ein Band ca. 120 MBytes auf.

Modul	Typ	Meßzeit	Läufe	Min./Lauf
FCDN3	F11	20 Std.	94	13
FNL3	F12	23 Std.	82	17
FNL9	F6	4 Std.	25	10
RCDN12	R11	14 Std.	87	10
RNL20	R6	4 Std.	24	10

Tabelle 2.4: Beispiele für den Zeitaufwand zur Vermessung von Kalorimetermodulen. Die Zeitan-
gaben beinhalten alle während der Datennahme entstandenen eventuellen Verzöge-
rungen, woraus auch die unterschiedliche Zeitdauer für einen Lauf resultiert.

Kapitel 3

Anregung einer Kalorimetersektion mit einem ^{60}Co -Präparat

3.1 Wechselwirkung von γ -Quanten mit Materie

Die drei wesentlichen Prozesse, die zu einer Wechselwirkung von γ -Quanten mit Materie führen, sind:

- ▷ Photoelektrischer Effekt, dessen Wirkungsquerschnitt proportional zu $1/E_\gamma^3$ ist,
- ▷ Comptoneffekt, der eine $1/E_\gamma$ -Abhängigkeit aufweist und die
- ▷ Paarerzeugung, die ab einer Schwellenenergie von $E_\gamma = 1.022 \text{ MeV} = 2 \cdot m_e$ in Erscheinung tritt. Bei höheren Energien steigt dieser Anteil stetig an.

Bei dem benutzten ^{60}Co -Präparat mit γ -Energien von $E_\gamma = 1.173 \text{ MeV}$ bzw. $E_\gamma = 1.332 \text{ MeV}$ überwiegt insbesondere in den leichten Medien SCSN-38 und PMMA des Wellenlängenschiebers der Comptoneffekt. Die Abschwächung eines Teilchenstrahls, bestehend aus γ -Quanten, folgt einem exponentiellen Gesetz:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad ; \quad \mu = \sigma \frac{N_0}{A} \quad (3.1)$$

mit

I	=	Intensität der γ -Strahlung nach Durchlaufen der Strecke x ,
I_0	=	ursprüngliche Intensität,
μ	=	Absorptionskoeffizient,
x	=	zurückgelegte Wegstrecke,
σ	=	Wirkungsquerschnitt,
N_0	=	Avogadrozahl,
A	=	Molmasse.

In den Absorptionkoeffizienten μ gehen alle drei erwähnten Prozesse ein:

$$\mu = \mu_{\text{Photoeffekt}} + \mu_{\text{Comptoneffekt}} + \mu_{\text{Paarerzeugung}}$$

Der Verlauf von μ/ρ (ρ = Dichte des Materials) für Kohlenstoff ist als Funktion der Photonenergie in der Abbildung 3.1 dargestellt.

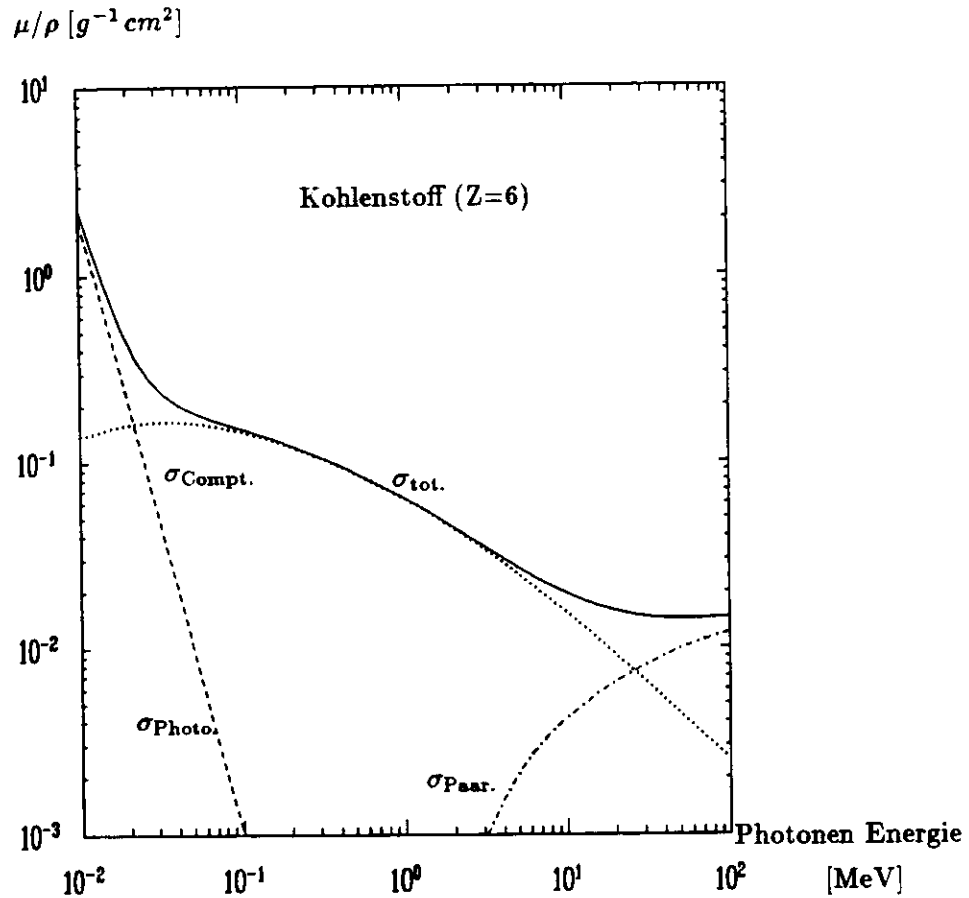


Abbildung 3.1: Massenabsorptionskoeffizient μ/ρ als Funktion der Photonenergie E_γ .

Die kinetische Energie T_e der Rückstreuielektronen ist beim Comptoneffekt gegeben durch [SIC 64]:

$$T_e = h\nu \frac{\alpha(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}, \quad (3.2)$$

mit

- T_e = kinetische Energie des gestreuten Elektrons,
- θ = Winkel zwischen einfliegendem γ und gestreutem γ' ,
- h = Plancksche Konstante,
- m_e = Elektronenmasse,
- c = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum,
- $h\nu$ = Energie des einlaufenden γ 's,
- α = $h\nu/m_e c^2$.

Ihre maximale kinetische Energie ist daher $T_{e,max} = 1.013$ MeV (für $\theta = 180^\circ$ = Rückstreuung des γ 's). Dieser Wert liegt deutlich über dem Schwellenwert für den Čerenkoeffekt. In einem dielektrischen

Medium hat die Schwelle den Wert [FER 86]:

$$T_{Ce,Schwelle} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}} - m_0 c^2, \quad (3.3)$$

mit

$T_{Ce,Schwelle}$	=	kinetische Energie des Teilchens,
m_0	=	Ruhemasse des Teilchens,
c	=	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum,
n	=	Brechungsindex des Mediums.

In dem Wellenlängenschieber-Material ($n \approx 1.5$) beträgt der Schwellenwert $T_{Ce,Schwelle} = 0.17 \text{ MeV}$ für Elektronen und $T_{Ce,Schwelle} = 0.33 \text{ MeV}$ für γ -Quanten, so daß hier Čerenkovlicht erzeugt wird. Dieses Licht kann zur Bestimmung der Abschwächlänge λ_W der Wellenlängenschieber herangezogen werden (vergleiche dazu Kapitel 6).

Der Photoeffekt ist aufgrund seiner Proportionalität zur fünften Potenz der Kernladungszahl nur bei dem schwersten Medium des Kalorimeters, dem Uran, für das eingesetzte Material von Bedeutung, während die Paarproduktion wegen des geringen Überschreitens der Schwellenenergie in allen Materialien praktisch nicht in Erscheinung tritt.

In der Tabelle 3.1 sind die Häufigkeiten der unterschiedlichen Wechselwirkungen in den verschiedenen Materialien zusammengefaßt. Die Zahlen stammen aus Monte-Carlo-Simulationen (vergleiche dazu Kapitel 4).

	Uran	Eisen	Aluminium	SCSN-38
Comptoneffekt	70.7%	99.2%	99.8%	99.9%
Photoeffekt	27.6%	0.4%	0.0%	0.0%
Paarbildung	1.7%	0.4%	0.2%	0.1%

Tabelle 3.1: EGS4 Daten zur Häufigkeit der unterschiedlichen Wechselwirkungen von γ -Quanten mit den im Kalorimeter verwendeten Materialien [GLO 91].

3.2 Szintillatoranregung und ihre Auslese

Die Abbildung 3.2 zeigt das Prinzip der Lichterzeugung und deren Auslese schematisch für einen Kalorimeterturm.

Die Lichterzeugung im Szintillator erfolgt durch die Absorption von Energie der Polystyrol-Matrix des SCSN-38. Diese fluoreszierende Matrix ist mit zwei Fluoreszenzfarbstoffen, Butyl-PBD (1%) und BDB (0.02%), dotiert. In zwei Schritten wird das ultraviolette Licht der Matrix von den Fluoreszenzfarbstoffen zu dem langwelligeren blauen Licht konvertiert. Ferner wird ein Teil der deponierten Energie von der Matrix direkt an den ersten Farbstoff weitergegeben. Der Wellenlängenschieber, bestehend aus einer nicht szintillierenden PMMA-Matrix und aus dem Farbstoff Y-7, absorbiert das aus dem Szintillator kommende blaue Licht und konvertiert es zu grünem Licht.

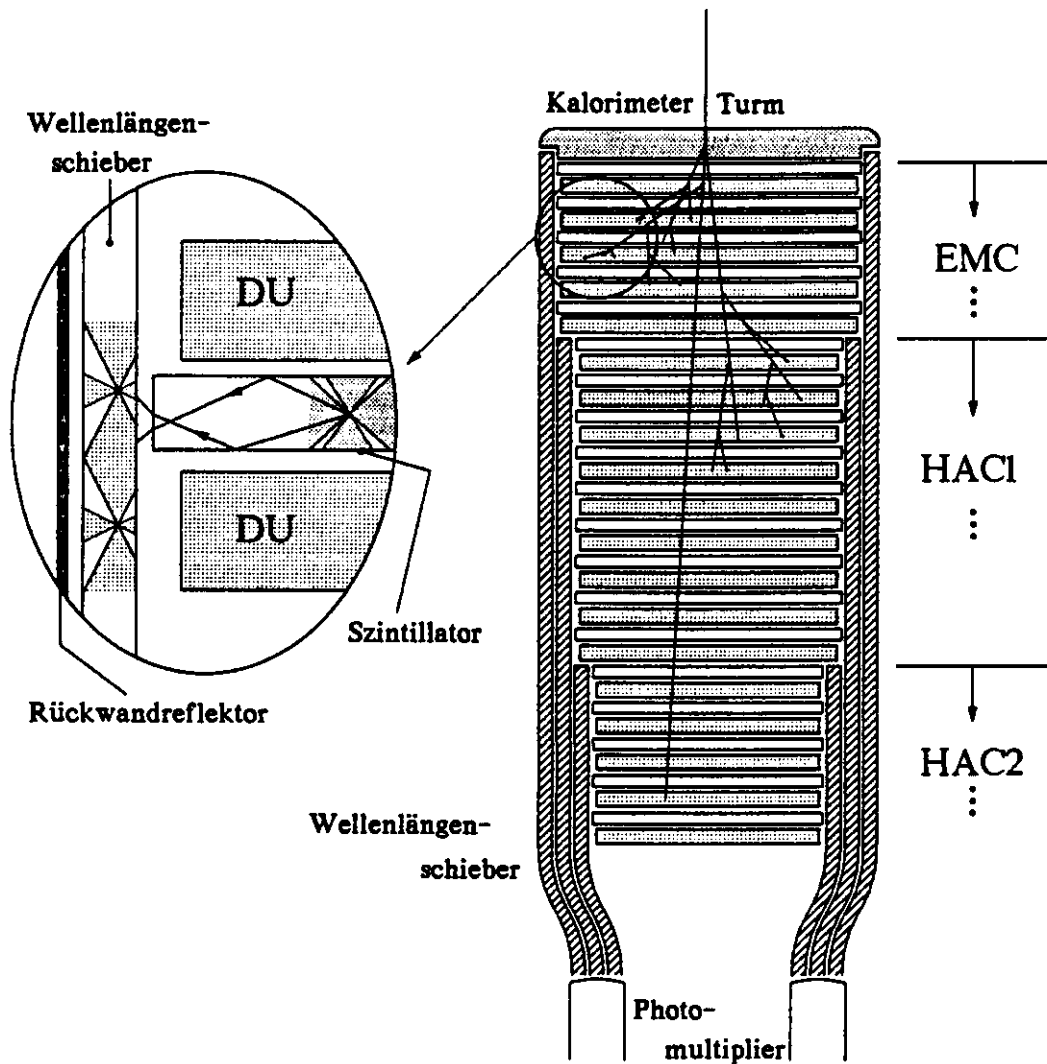


Abbildung 3.2: Darstellung der Licht- und Signalauslese im Kalorimeter.

kann auch noch Licht aus benachbarten Kegeln zum Signal beitragen. Insgesamt kommt es demnach im Randbereich zu einer Überhöhung der Lichtausbeute.

Einen typischen Verlauf der Lichtausbeute als Funktion der Weglänge durch einen Szintillator mit endlicher Abschwächlänge zeigt die Abbildung 3.4 ([KAM 83]).

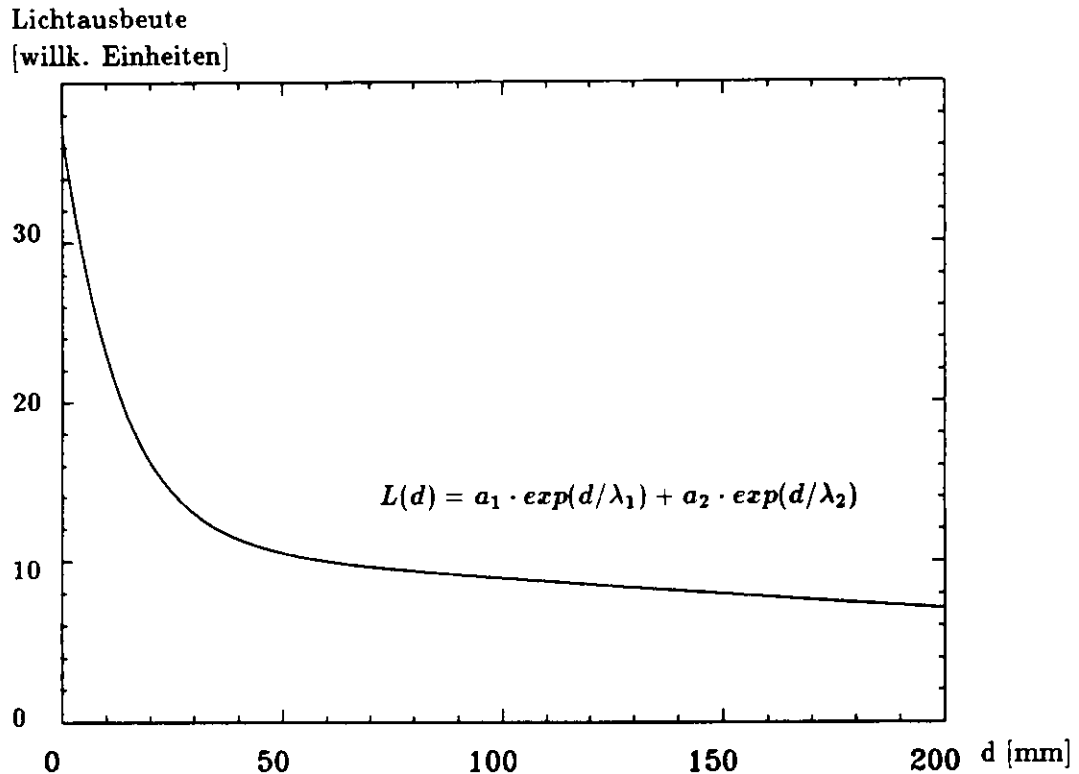


Abbildung 3.4: Lichtausbeute als Funktion des Ortes. [KAM 83] et al berücksichtigen den experimentell ermittelten steilen Anstieg der Daten am Rand der Auslesekannte mit der Einführung einer zweiten sehr kurzen Abschwächlänge. Es ist $\lambda_2=13.1\text{ mm}$ und $\lambda_1=970.0\text{ mm}$. Dabei ist d der Abstand vom Ort der Lichterzeugung zur Auslesekannte.

Durch die Addition beider Photomultiplierantworten wird die endliche Abschwächlänge des Szintillators kompensiert, so daß ein relativ homogenes Signal zu erwarten ist. Um ein vom Entstehungsort unabhängiges Signal im Szintillator zu erhalten, wurden die Szintillatoren in Tyvepapier eingewickelt, welche großflächige schwarz-weiß Muster aufgedruckt haben. Auf diese Weise findet für das aus dem Szintillator austretende Licht der Matrix eine ähnliche Kompensation statt wie bei den Wellenlängenschiebern, was in Kapitel 6 noch erläutert wird. Das Tyvepapier wird durch einen schwarzen Tedlarstreifen auf die Oberfläche des Szintillators gedrückt.

Die γ -Quanten des ^{60}Co -Präparates wechselwirken gerade am häufigsten im problematischen Randbereich eines Szintillators (vergleiche Abbildung 3.5), so daß bei der Präparatenmethode mit einem größeren Einfluß dieser Effekte zu rechnen ist als beim eigentlichen Experiment. Zum Vergleich wurde die Energiedeposition für 3 GeV Elektronen, die in die Mitte einer HACØ-Sektion eingeschossen wurden in Abbildung 3.6 dargestellt. Die Anzahl der Elektronen wurde so gewählt, daß für beide Berechnungen dieselbe Energie in der Sektion deponiert wurde.

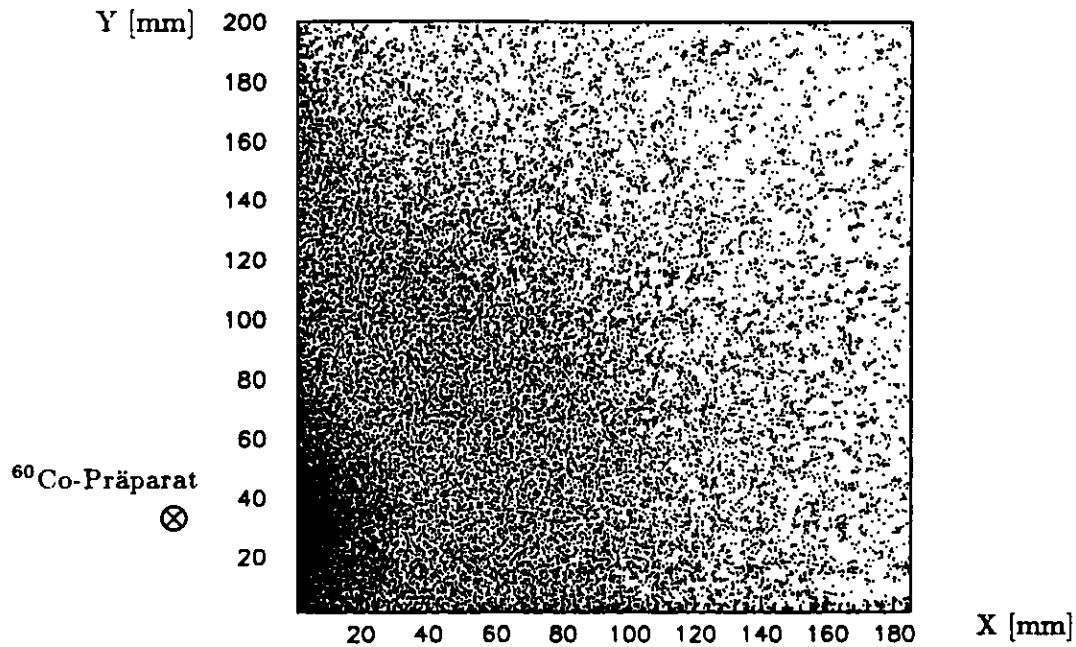


Abbildung 3.5: Anregung eines $200 \times 191 \text{ mm}^2$ Szintillators mit einem ^{60}Co -Präparat. Dargestellt ist das Ergebnis einer Monte-Carlo-Simulation, in der die Energiedeposition in alle Szintillatoren einer RHACØ-Sektion als Projektion auf die X-Y-Ebene dargestellt wurde. Das ^{60}Co -Präparat befindet sich bei $X = -5.5 \text{ mm}$ und $Y = 30.0 \text{ mm}$.

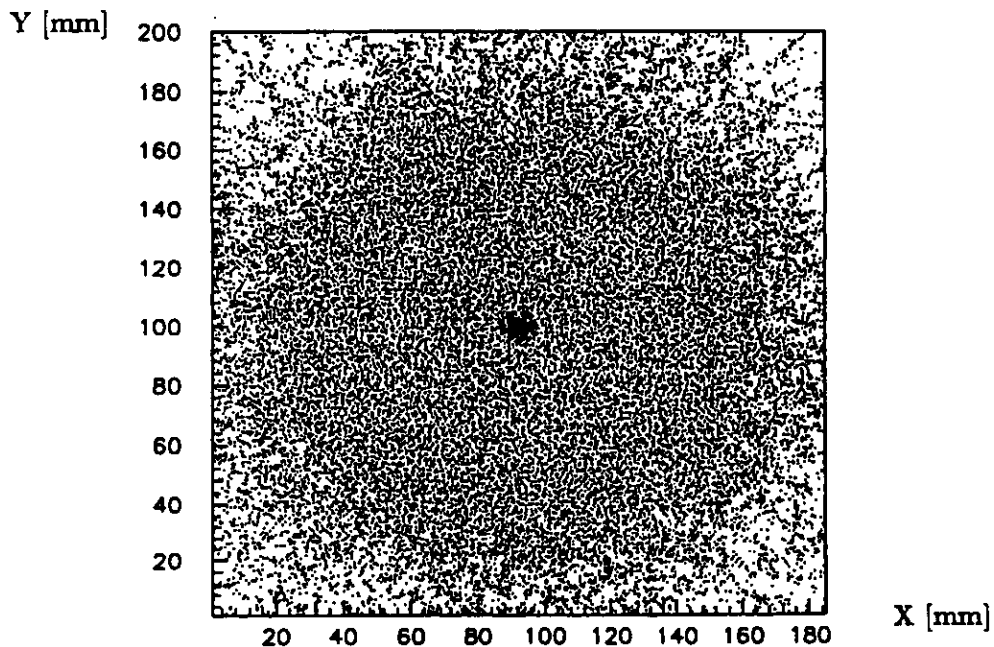


Abbildung 3.6: Anregung eines $200 \times 191 \text{ mm}^2$ Szintillators mit einem 3 GeV Elektronenstrahl. Dargestellt ist das Ergebnis einer Monte-Carlo-Simulation, in der die Energiedeposition in alle Szintillatoren einer RHACØ-Sektion als Projektion auf die X-Y-Ebene dargestellt wurde. Der Teilcheneinschuß erfolgte bei $X_e = 93 \text{ mm}$, $Y_e = 100 \text{ mm}$ und $Z_e = 0 \text{ mm}$.

Die mittlere Eindringtiefe der γ -Quanten, über alle Szintillatoren einer Sektion gemittelt, die zur Photomultiplierantwort beitragen, beträgt nur etwa $\bar{d} \approx 11-14$ mm, je nach Art der Abtastung. Näheres dazu ist in Kapitel 4 dargestellt. Diese Tatsache erschwert in großem Maße die quantitative Analyse, da immer mit einer mehr oder weniger unbekanntem und von Szintillator zu Szintillator schwankenden Erhöhung des Signals für die Ausleseseite zu rechnen ist, auf der sich das ^{60}Co -Präparat befindet. Die Schwankungen sind dabei von dem individuellen Zustand des Tyvekpapiers, der Position des Tedlar-Streifens und der allgemeinen Position des Szintillators abhängig.

3.3 Energiedeposition in einer Kalorimetersektion

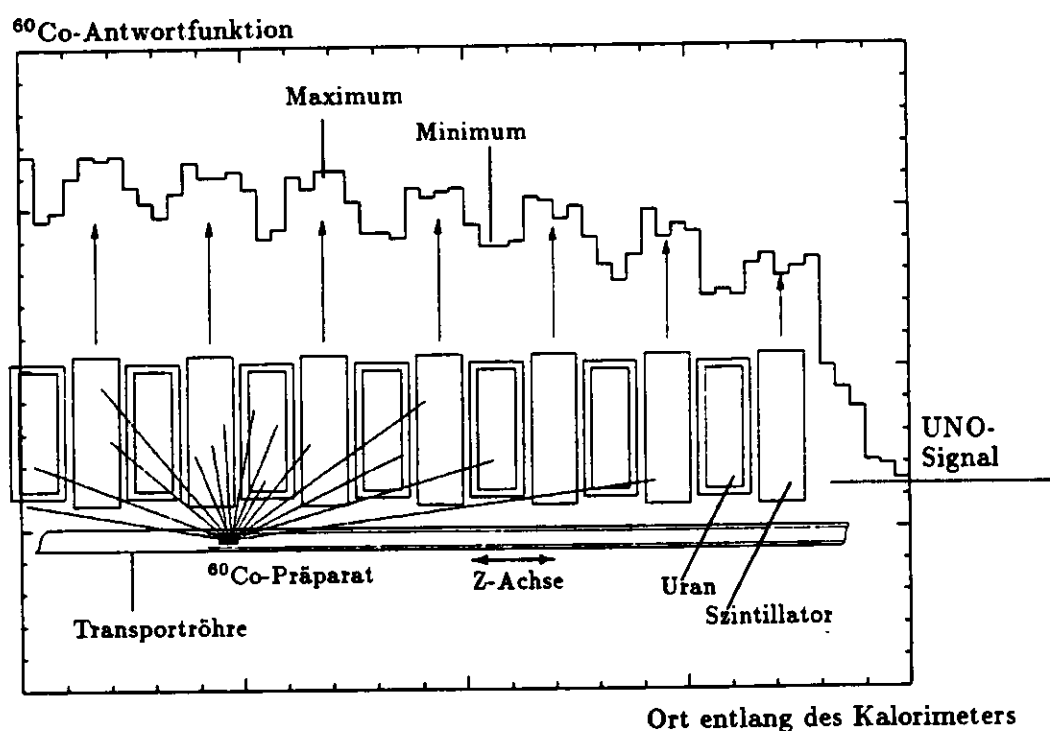


Abbildung 3.7: Prinzipdarstellung zur Entstehung einer ^{60}Co -Antwortfunktion. Die Photomultiplierantwort setzt sich im wesentlichen aus dem ^{60}Co -Signal, ein sich ständig änderndes Signal, je nachdem wo sich das Eichpräparat entlang der Z-Achse befindet und dem UNO-Signal, ein zeitlich und räumlich stabiles Signal, zusammen. Befindet sich das Eichpräparat gegenüber einer Uranplatte wird ein kleineres Signal gemessen als an der Position gegenüber eines Szintillators.

Wird ein ^{60}Co -Präparat entlang einer Szintillatorsektion geführt, wie es in dem Kapitel 2 beschrieben wurde, werden die Szintillatoren nahe des Präparates angeregt. Dabei wird an der Position eines jeden Szintillators ein etwas größeres Signal registriert als an der Position einer Uranplatte. Dadurch wird durch das langsame Abtasten eines Turms eine sich aus Maxima und Minima abwechselnde Struktur gemessen. Zu diesem Signal kommt noch das stets meßbare Signal der Uranaktivität und, wenn sich das Präparat auf der Seite befindet, wo auch die Auslese stattfindet, das Signal von dem in dem Wellenlängenschieber erzeugten Čerenkovlicht. Dieser Sachverhalt ist in der Abbildung 3.7 schematisch dargestellt. Die Abbildung 3.8 zeigt die Photomultiplierantwort eines FHAC1-Wellenlängenschiebers. Im vorderen Bereich ist das Čerenkovlicht, welches im Wellenlängenschieber durch die

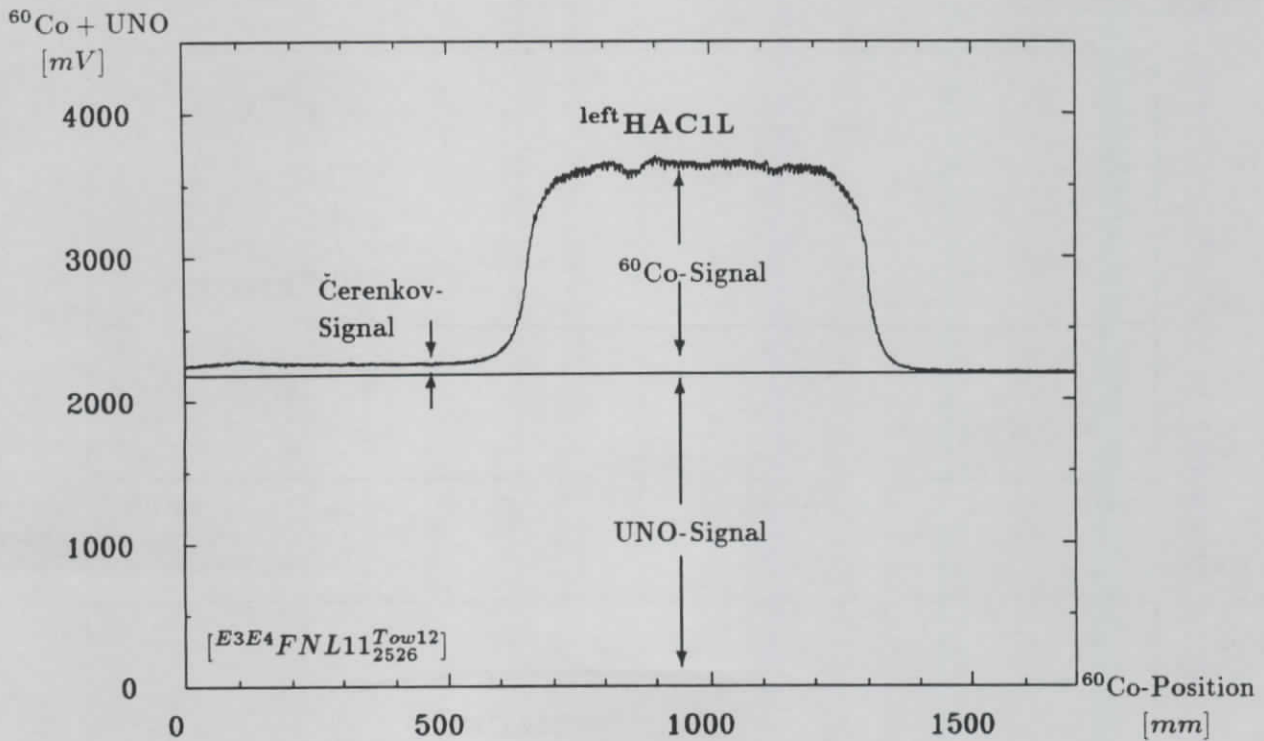


Abbildung 3.8: Antwortfunktion einer HAC1-Sektion.

Sekundärelektronen erzeugt wird, zu erkennen. Im mittleren Bereich liegt das ^{60}Co -Signal der 80 Szintillatoren der HAC1-Sektion. Wird der Photomultiplier dieser Sektion auch noch ausgelesen, wenn sich das Eichpräparat schon in der HAC2-Sektion befindet, erhält man das UNO-Signal ($Z > 1400$ mm). Die Antwortfunktionen eines Turmes lassen sich bei der Außenabtastung¹ in drei Bereiche einteilen, wobei die Längenangaben exemplarisch für einen F11 Modul gewählt wurden:

0 - 655 mm: Das Präparat tastet das Gebiet der HAC2-Sektion ab. Die Antwortfunktion der EMC- und HAC1-Sektion setzt sich aus dem Signal des Uranrauschens (UNO-Signal) und aus dem Signal des Čerenkovlichts zusammen, das durch die Wechselwirkung der Sekundärteilchen der ^{60}Co -Quanten im Wellenlängenschieber erzeugt wird. Es trägt nur dann zur Antwortfunktion bei, wenn die Anregungsseite mit der Ausleseseite zusammenfällt. In der HAC2-Sektion werden die Szintillatoren Schritt um Schritt angeregt. Zu dem ortsunabhängigen UNO-Signal kommt nun doch das ortsabhängige ^{60}Co -Signal (Abbildung 3.9 unten).

655 - 1310 mm: In diesem Bereich erfolgt die Abtastung der HAC1-Sektion. Die Antwortfunktion der EMC-Sektion setzt sich immer noch so zusammen wie zuvor beschrieben, während nun das Szintillatorlicht der HAC1-Sektion hinzukommt. Der Wellenlängenschieber der HAC2-Sektion liefert bei dieser Position des ^{60}Co -Präparats nur noch das Uransignal, da seine Länge nur 645 mm beträgt (Abbildung 3.9 mitte und Abbildung 3.11).

1310 - 1550 mm: In diesem Gebiet werden vom ^{60}Co -Präparat nun die EMC-Szintillatoren angeregt, während die beiden hadronischen Sektionen nur noch das Uransignal liefern (Abbildung 3.9 oben und Abbildung 3.10).

¹Für die Innenabtastung wurde von der EMC-Sektion beginnend gemessen, so daß bei der Ortsposition 0 der Anfang des aktiven Bereichs liegt und ein zur y-Achse spiegelsymmetrisches Bild entsteht.

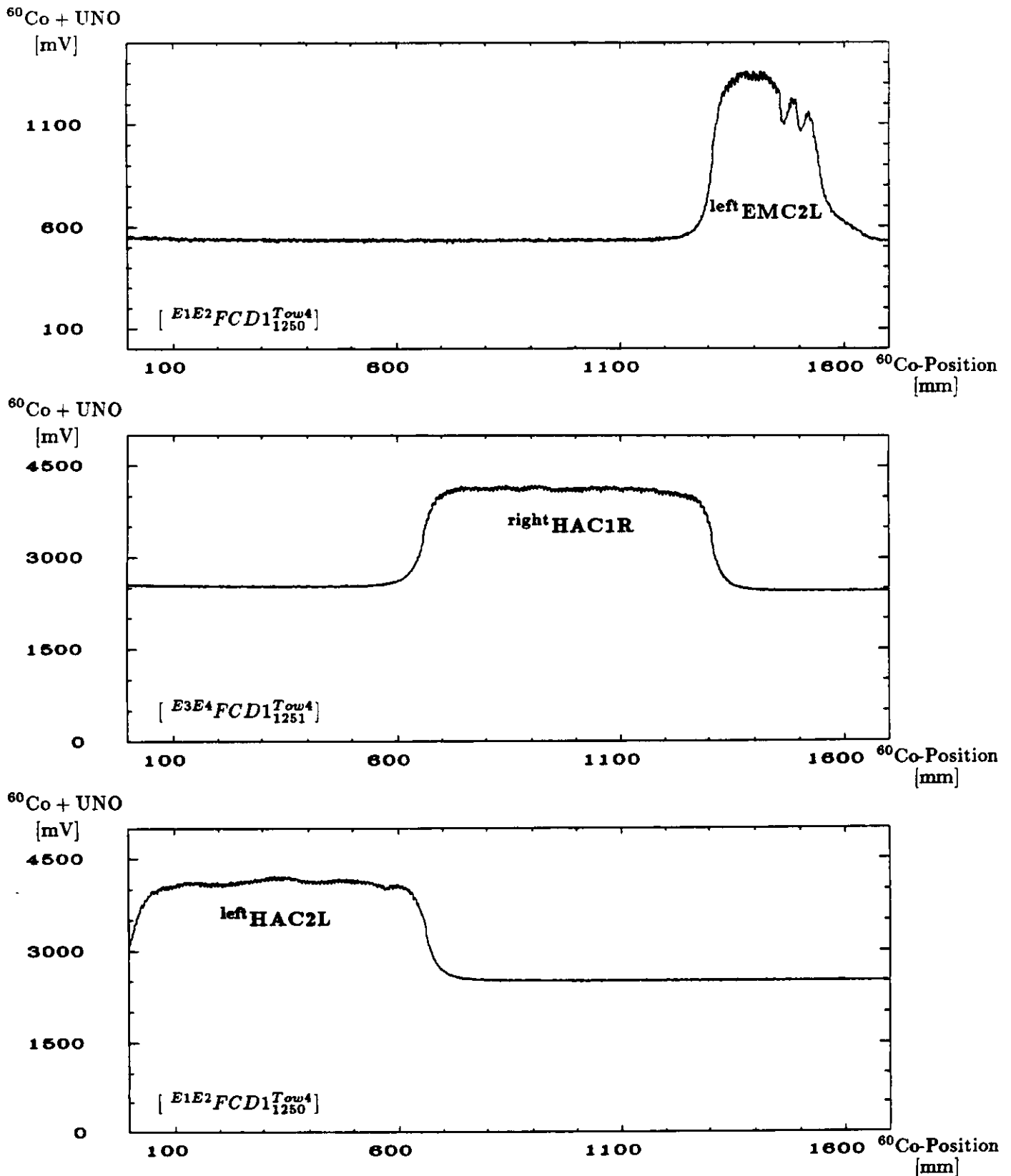


Abbildung 3.9: Antwortfunktionen eines FEMC-Turmes, d.h. EMC-, HAC1- und HAC2-Sektion.

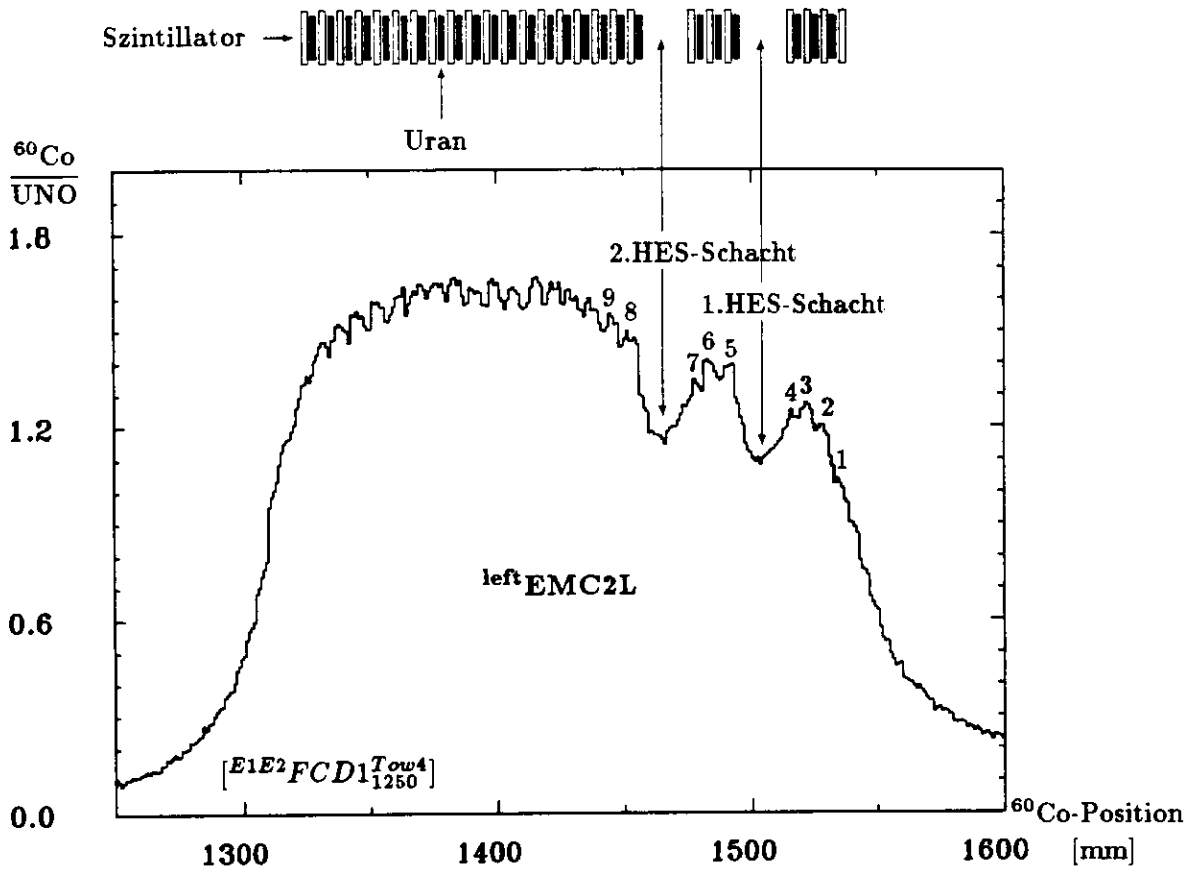


Abbildung 3.10: Antwortfunktion einer FEMC-Sektion (normiert auf das UNO-Signal).
Oben ist der mechanische Aufbau einer FEMC-Sektion schematisch dargestellt.

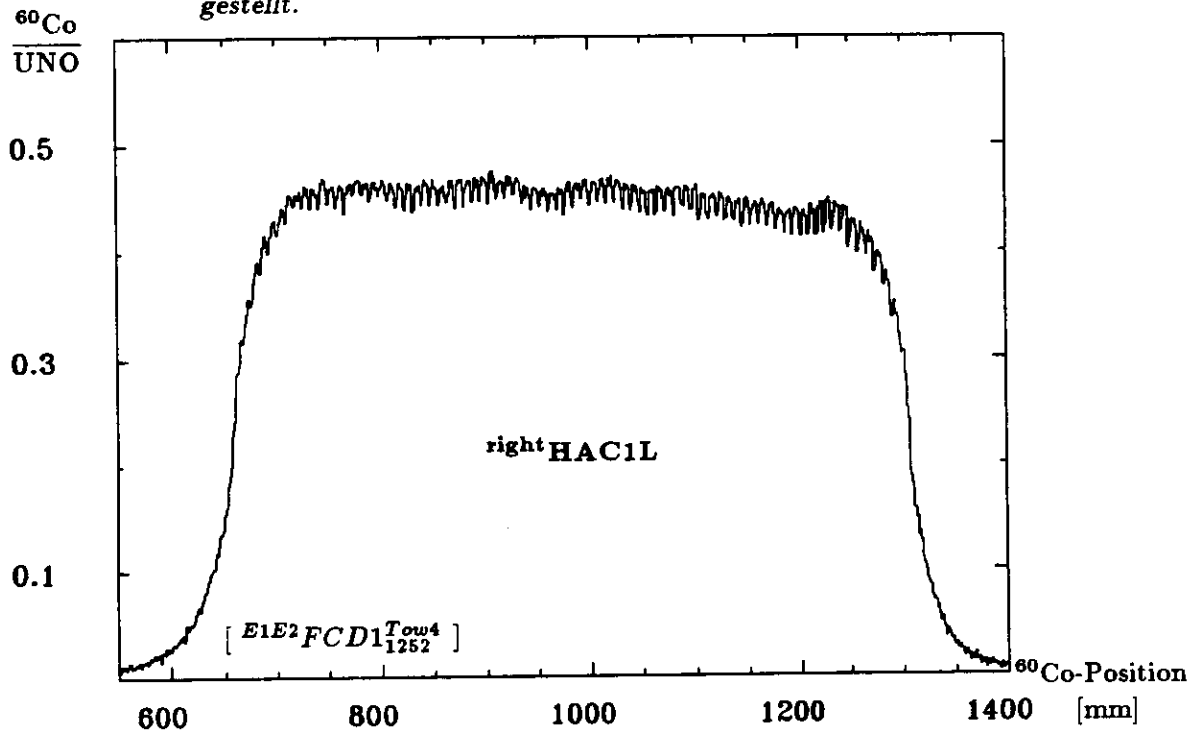


Abbildung 3.11: Antwortfunktion einer FHAC1-Sektion (normiert auf das UNO-Signal).

Um die verschiedenen Antwortfunktionen miteinander vergleichen zu können, d.h. um beispielsweise von der individuellen Verstärkung des Photomultipliers unabhängig zu sein, wurde stets die folgende Normierung vorgenommen:

$$(\text{gemessenes Signal} - \text{UNO})/\text{UNO} \equiv {}^{60}\text{Co}/\text{UNO} .$$

Für die Beurteilung der Antwortfunktionen ist es häufig wichtig, nicht nur die Auslese- und Anregungsseite zu kennen, sondern es ist oft wünschenswert, auch den genauen Ort der Anregung der Szintillatoren mit in die Betrachtung einbeziehen zu können. Dazu ist es notwendig, die Position der Transportröhre für den entsprechenden Lauf mitanzugeben. Zur Abkürzung wird folgende Nomenklatur eingeführt:

$\text{side}^{\text{PM}} \quad \text{ID}^{\text{module}^{\text{Tow}}_{\text{run}j}}$

mit

side = Turmseite, auf der sich das Präparat während der Messung befand,
PM = Photomultiplier,
module = Modulname (Herstellungsnummer),
ID = Position der Transportröhre,
Tow = bestrahlter Turm,
runj = Nummer des entsprechenden Laufes.

Wurde beim Modul FCD2 der Photomultiplier HAC2R des 19. Turmes ausgelesen, während sich das Eichpräparat auf der linken Modulseite in der Transportröhre zwischen den EMC-Sektionen EMC1 und EMC2 befand, würden die Kürzel für den Lauf 2096 wie folgt aussehen:

$\text{left}^{\text{HAC2R}} \quad \text{E1E2}^{\text{FCD2}^{\text{Tow19}}_{\text{2096}}}$

Die Abkürzung „FCD2“ steht für den 2. Modul der kanadischen Produktion für den Vorwärtsdetektor. Dementsprechend werden die niederländischen Module mit „NL“ abgekürzt.

3.4 Reproduzierbarkeit der Antwortfunktionen

Um Aussagen bei der Analyse der Photomultiplierantworten machen zu können, muß gesichert sein, daß die Antwortfunktionen in ihrer Struktur tatsächlich die Eigenschaften der Kalorimetersektion wiedergibt. Weist eine Antwortfunktion z.B. eine wellige Struktur auf, liegt der Verdacht nahe, daß dieses durch die Meßmethode selbst entstanden sein könnte. Der folgende Abschnitt wird zeigen, daß dieser Verdacht unbegründet ist.

Eine einfache Methode zur Klärung dieser Frage ist der Vergleich zweier Messungen der gleichen Sektion unter den gleichen experimentellen Bedingungen. Dies illustriert die Abbildung 3.12, in der zwei solcher Messungen mit einem zeitlichen Abstand von 6.5 Stunden durchgeführt wurden. Man erhält die gleiche Unterstruktur und dasselbe mittlere Signal, - d.h. den gleichen Achsenabschnitt bei einer Geradenanpassung an die Messpunkte - wobei die beiden Photomultiplierantwort für die Darstellung, um einen Vergleich überhaupt zu ermöglichen, gegeneinander verschoben wurden. Durch die Benutzung von Innen- und Außenabastung ist es möglich, zwei Antwortfunktionen zu vergleichen, die unter verschiedenen experimentellen Bedingungen gemessen wurden. Bei der Außenabastung befindet sich

das ^{60}Co -Präparat etwa 3.2mm weiter von den Szintillatoren entfernt als bei der Innenabtastung, was zu einer Reduzierung des Signals um ca. 13% führt.

Sei I_{S_z} das Signal an der Z-Position eines Szintillators und I_{DU} das Signal an der Z-Position einer Uranplatte, so ist der Ausdruck $(I_{S_z} - I_{DU})/I_{S_z}$ ein Maß für die geometrische Auflösung. Aufgrund der verkleinerten Raumwinkelanteile für die einzelnen Lagen verschlechtert sich die Auflösung von ca. 9% der einzelnen Szintillatoren. Dies wirkt sich in den EMC- bzw. HAC \emptyset -Sektionen aufgrund der quadratischen Raumwinkelabhängigkeit der Anregung einzelner Szintillatoren am stärksten aus. Die Auflösung verschlechterte sich hier um 40%, während sie sich in der HAC1-Sektion um ca. 25% und in der HAC2-Sektion um ca. 15% änderte. Die Abbildung 3.13 zeigt den Vergleich der Innen- mit der Außenabtastung. Der erste Lauf wurde mit dem Innenabtaster am CERN an einem horizontal liegenden Modul genommen, der zweite mit dem Außenabtaster am DESY an dem gleichen Modul unter der in Abbildung 1.3 angedeuteten vertikalen Position. Obwohl zwei unterschiedliche Meßmethoden und eine Zeitdifferenz von über 6 Monaten zwischen den Messungen lag, erhält man die gleichen Unterstrukturen. Dieser Vergleich zeigt auch sehr eindrucksvoll, daß beim Transport der Module vom CERN zum DESY keine Qualitätsminderung eingetreten ist.

Um in einer quantitativen Analyse zwei ^{60}Co -Läufe vergleichen zu können, wurde die Feinstruktur der Sektionen durch Mittelung über 8 Millimeter um eine Maximumsposition geglättet. Die Mittelung erfolgt also über eine Szintillator/Uran Lage. Der Mittelwert wird dem entsprechenden Szintillator zugeordnet, so daß man 26 oder 80, je nach Sektionstyp, charakteristische Werte erhält. Ein Maß für die Reproduzierbarkeit ist die Häufigkeitsverteilung des Quotientens dieser Mittelwerte aus zwei Wiederholungsläufen. Die Verteilung wird zusätzlich durch Schwankungen in der Motorengeschwindigkeit (siehe Abschnitt 2.3) sowie durch Ungenauigkeiten in der Bestimmung der Position der Maxima verbreitert. Das zweitgenannte wirkt sich besonders gravierend in den Randbereichen der Sektionen aus, da dort schon kleine Ungenauigkeiten in der Maximumbestimmung große Auswirkungen haben können. Zuverlässige Ergebnisse erhält man, wenn der Randbereich nicht miteinbezogen wird.

Es zeigt sich, daß die Breite σ der Verteilung unter idealen Bedingungen, d.h. unmittelbare Wiederholungen ohne Änderung der experimentellen Gegebenheiten, Werte von etwa:

$$0.49\% \leq \sigma_{ideal} \leq 0.67\%$$

annimmt. Dabei liegen die Werte für Antwortfunktionen, bei der Anregungsseite und Ausleseseite zusammenfallen im unteren Bereich des Intervalls und für Antwortfunktionen mit der umgekehrten Kombination aufgrund der geringeren Lichtausbeute im oberen Bereich. Unter den bereits erwähnten verschiedenen Bedingungen änderte sich der Wert nur geringfügig und blieb im allgemeinen unter 1%. Der statistische Fehler einer Messung wurde experimentell auf 0.2 bis 0.3% bestimmt.

Die Reproduzierbarkeit der Photomultiplierantwort liegt also nahe der statistischen Unsicherheit und läßt im allgemeinen Aussagen über die Qualität der Kalorimetertürme zu. Diese Aussage ist für die Messungen der FEMC-Sektionen durch den Außenabtaster nur noch bedingt richtig, da die Positionierung der Transportröhre zwischen den EMC-Sektionen ungenauer als zuvor waren. Die Abbildung 3.14 zeigt die Anregung einer FEMC3- und FEMC4-Sektion bei der die Positionierung unzulänglich erfolgte. Die Transportröhre befindet sich nicht genau zwischen den beiden Sektionen, sondern einige Millimeter auf der FEMC3-Sektion, was sich in der weniger deutlichen Ausprägung des HES-Schachtes bei EMC4 bemerkbar macht. Für den Nachweis eventueller Einbaufehler reichten diese Antwortfunktion im allgemeinen dennoch aus.

Bedingt durch die Reichweite der ^{60}Co -Quanten werden bei jeder Präparatenposition stets mehrere Szintillatoren zur Zeit angeregt (siehe Tabelle 3.2 auf Seite 47).

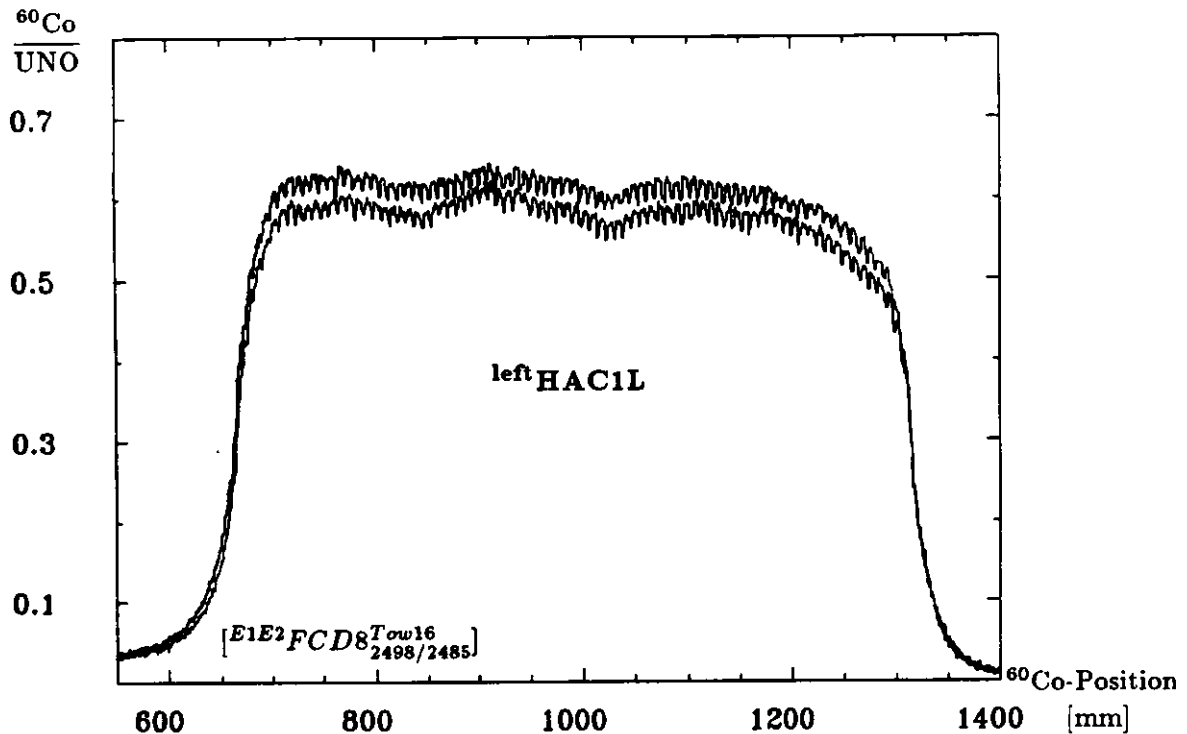


Abbildung 3.12: Wiederholungsmessungen einer FHAC1-Sektion. Beide Läufe wurden mit dem Außenabtaster genommen. (Die Kurven wurden zur Verdeutlichung um 0.03 gegeneinander verschoben.)

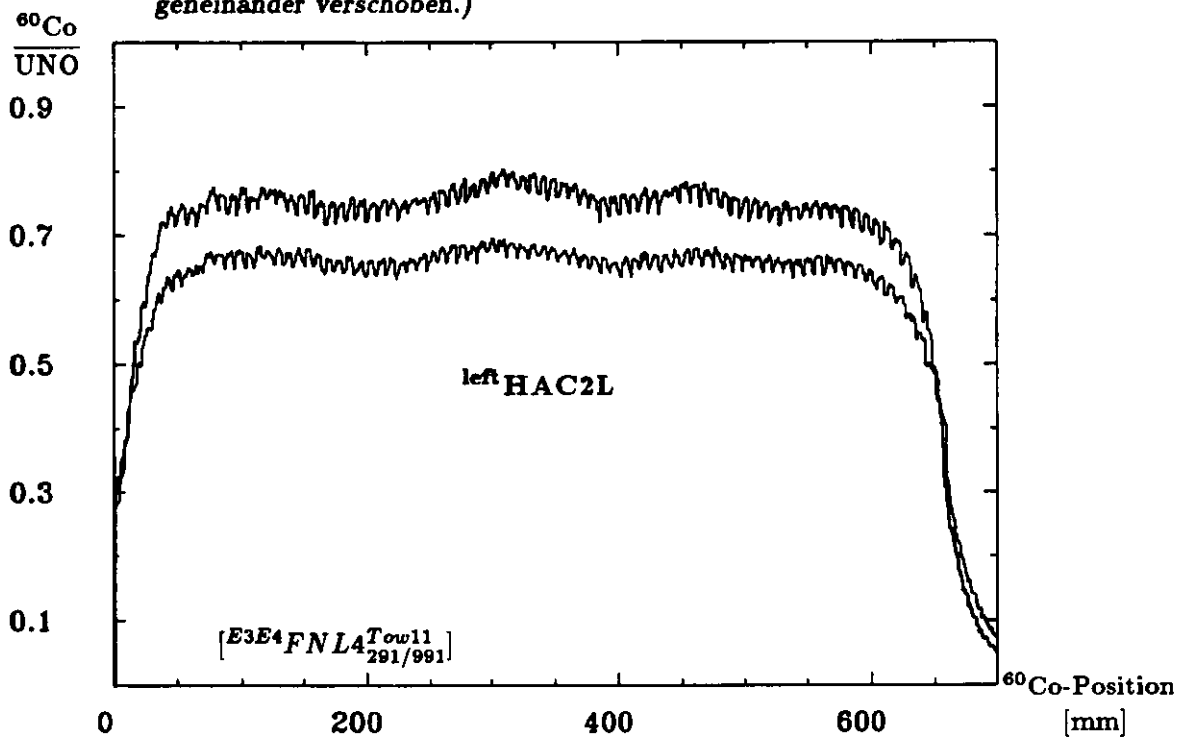


Abbildung 3.13: Wiederholungsmessungen einer FHAC2-Sektion, die sowohl mit dem Außen- als auch mit dem Innenabtaster gemessen wurde. Die unterschiedliche Höhe der beiden Photomultiplierantworten ist auf die unterschiedlichen Abtastmethoden zurückzuführen.

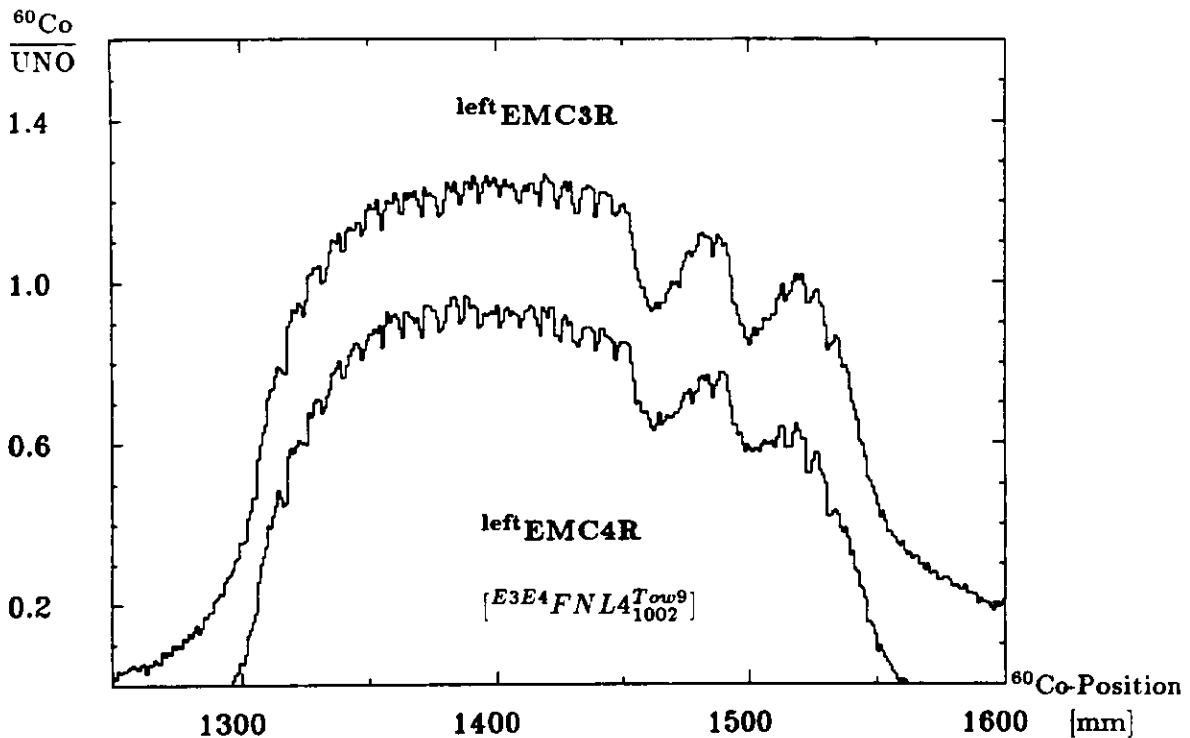


Abbildung 3.14: Auswirkungen eines Positionierungsfehler einer Transportröhre des Eichpräparats. Die oberen Daten entsprechen der Innenabtastung. Für die unteren Daten der Außenabtastung ist der Bereich um den HES-Schacht „ausgeschmiert“.

Jedoch wird der größte Teil des sichtbaren Lichts in dem dem ^{60}Co -Präparat gegenüberstehenden Szintillator erzeugt (ca. 24% - 30%, je nach Art der Abtastung). Befindet sich das Präparat an dem Rand einer Sektion, erniedrigt sich das Signal um die nun fehlenden Beiträge der einen Hälfte der Nachbarszintillatoren. Ein jedes Maximum der Photomultiplierantwort ist somit im wesentlichen durch das Signal des Szintillators bestimmt, der dem ^{60}Co -Präparat am nächsten ist. Benachbarte Szintillatoren tragen dennoch im erheblichen Maße zur Photomultiplierantwort bei. Zur Klärung der Zusammensetzung eines Signals wurden drei Experimente durchgeführt:

- ▷ Das Abdecken eines einzelnen Szintillators, um dessen Einfluß auf die Signalhöhe an der Position benachbarter Szintillatoren zu ermitteln (Methode 1),
- ▷ das Abdecken aller Szintillatoren bis auf einen, um dessen Anregung für verschiedene Positionen des ^{60}Co -Präparates zu erhalten (Methode 2),
- ▷ und das Abdecken aller Szintillatoren zur Bestimmung des im Wellenlängenschieber erzeugten Čerenkovlichts, was in Kapitel 6 näher besprochen wird.

Die Abbildung 3.15 zeigt ein Beispiel, in dem die Auslesekannte eines einzelnen Szintillators mit schwarzer Tedlarfolie verdeckt wurde, so daß sein Licht nicht in den Wellenlängenschieber gelangen konnte. Zum Vergleich wurde die Antwortfunktion derselben Sektion ohne Tedlarfolie überlagert. Das ^{60}Co -Signal an einer bestimmten Position für das Präparat setzt sich aus dem Signal mehrerer Szintillatoren zusammen:

$$^{60}\text{Co} = I = I_0 + 2I_1 + 2I_2 + 2I_3 + \dots$$

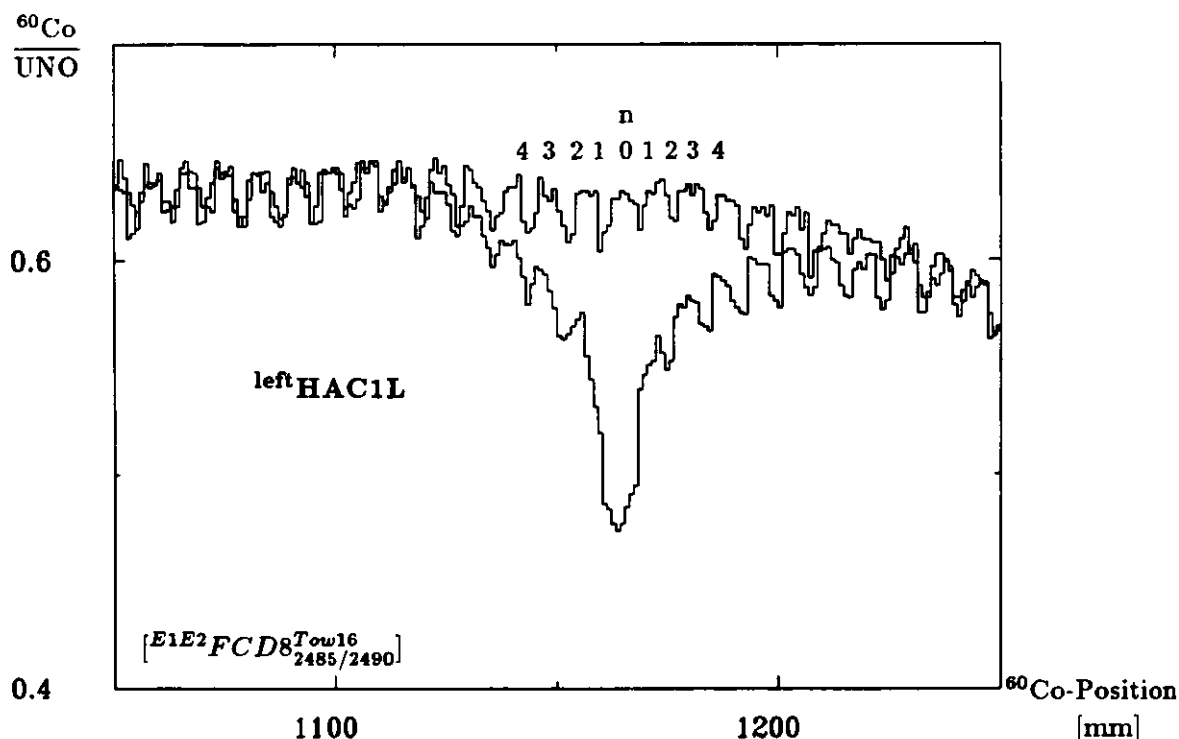


Abbildung 3.15: Antwortfunktion für eine HAC-Sektion mit einem einzelnen abgedeckten Szintillator. Die obere Kurve zeigt die gleiche Messung ohne Tedlarfolie.

Der Index 0 bezeichnet das Signal des Szintillators, der dem ^{60}Co -Präparat genau gegenübersteht, der Index 1 den ersten Nachbarn zu diesem Szintillator, der Index n den n -ten Nachbarn. Aus der Differenz von ungestörtem und gestörtem Signal der verschiedenen Szintillatorpositionen ergibt sich ein Maß für die Energiedeposition im n -ten Szintillator, die wie folgt ermittelt werden kann:

$$E_n = \frac{I_n^{\text{ungest.}} - I_n^{\text{gest.}}}{I_n^{\text{ungest.}}} \cdot 100 \quad [\%],$$

mit

- E_n = relative Energiedeposition im abgedeckten Szintillator,
- $I_n^{\text{ungest.}}$ = Signalthöhe der ungestörten Sektion an der Position des n -ten Szintillators,
- $I_n^{\text{gest.}}$ = Signalthöhe der gestörten Sektion an der Position des n -ten Szintillators.

Die Abbildung 3.16 veranschaulicht die zweite Methode, bei der der 39. Szintillator einer HAC-Sektion nicht verdeckt wurde, während alle anderen Szintillatoren durch eine Tedlar-Folie abgedeckt nicht zur Photomultiplierantwort beitragen. Zur besseren Orientierung der Szintillatorpositionen wurde ein ungestörtes Signal der gleichen Sektion hinzugefügt. Bestimmt man für jede Szintillatorposition die Differenz aus Signal und UNO-Wert, so läßt sich wieder auf die Energiedeposition schließen. Allerdings wurde für E_0 der Anteil an sichtbarer Energie aus der Methode 1 als Referenzwert eingestetzt. Die Ergebnisse beider Methoden sind in der Tabelle 3.2 auf Seite 47 zusammengefaßt.

Während die Methode 2 für die Anteile der ersten Szintillatoren (E_0 bis E_4) keine genauen Werte liefert, da bereits kleine Ungenauigkeiten in der Bestimmung der Szintillatorpositionen größere Fehler verursachen (aufgrund der steilen Flanken), sind die Werte umso genauer je weiter sie von der nullten Position entfernt sind. Die erste Methode liefert im Gegensatz zur zweiten absolute Werte für die

Anteile am Gesamtsignal. Der absolute Fehler, der an jeder Position derselbe ist, wurde zu 1 bis 2% bestimmt. Somit ist Methode 1 in dem Bereich von E_0 bis E_4 am zuverlässigsten.

Die Tabelle 3.2 veranschaulicht auch die Problematik der Kombination der beiden Methoden. Wird der Referenzwert E_0 aus den Daten der ungestörten Photomultiplierantwort ungenau bestimmt, überträgt sich dieser Fehler auf alle weiteren Werte. Offensichtlich sind die Werte für E_0 fast immer zu groß ausgefallen, wie sich aus der Summation aller Anteile schließen läßt. Qualitativ läßt sich dennoch erkennen, daß die Verteilung von der Position des Präparates und des ausgelesenen Photomultipliers abhängt. Ist die Ausleseseite gleichzeitig die Anregungsseite gewesen, fällt der Anteil für den nullten Szintillator kleiner aus als für den umgekehrten Fall, denn die mittlere Eindringtiefe fällt für den nullten Szintillator beträchtlich größer aus als für die Nachbarszintillatoren². Dies führt dazu, daß erstens der Lichtweg zur Auslesekannte auf der dem Präparat abgewandten Seite für den nullten Szintillator kleiner ist als für seine Nachbarn und zweitens wird auf der zugewandten Seite in den Nachbarszintillatoren mehr Licht im kritischen Randbereich erzeugt.

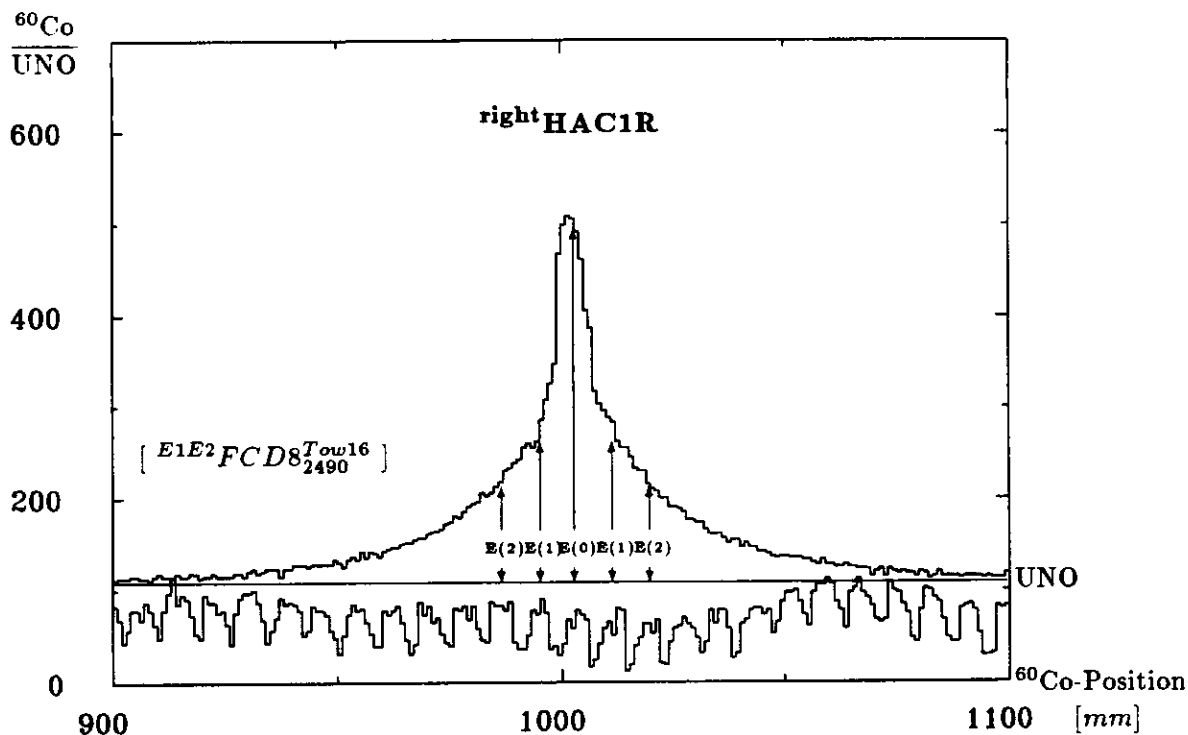


Abbildung 3.16: Antwortfunktion eines einzelnen Szintillators in Abhängigkeit des von der ^{60}Co -Position.

3.5 Rückstreuung von γ -Quanten am Konstruktionsmaterial

Für den Transport der Module wurde eine Konstruktion aus Stahlprofilen benutzt, die diagonal nahe der Oberfläche der Module verlief. Die Profile hatten einen Abstand von der Oberfläche von nicht mehr als 7 cm. Das ^{60}Co -Präparat befand sich so teilweise zwischen dem Kalorimeter und dem Konstruktionsmaterial, was dazu führen könnte, daß ein nicht zu vernachlässigender Anteil an Elektronen

²EGS4-Simulationen ergaben für den nullten Szintillator eine mittlere Eindringtiefe von 26 mm und für die Nachbarszintillatoren Werte um 12 mm (vergleiche Kapitel 4).

Energiedeposition im n-ten Szintillator	Methode 1		Methode 2	
	<i>left</i> HAC1L	<i>right</i> HAC1L	<i>left</i> HAC1R	<i>right</i> HAC1R
E_0	25.6%	27.3%	26.8%	23.6%
E_1	11.4%	10.8%	11.9%	12.0%
E_2	8.6%	7.5%	7.9%	8.1%
E_3	6.1%	4.6%	5.3%	5.5%
E_4	3.6%	2.5%	3.6%	3.8%
E_5	3.2%	2.4%	2.5%	2.7%
E_6	2.8%	2.4%	1.9%	2.0%
E_7	2.6%	2.2%	1.3%	1.6%
E_8	1.7%	1.8%	1.0%	1.2%
E_9	1.4%	1.6%	0.7%	0.8%
Σ	111.2%	102.3%	99.8%	100.4%

Tabelle 3.2: Anteile verschiedener Szintillatoren am Gesamtsignal in Prozent.

oder γ -Quanten durch Rückstreuung an dem Konstruktionsmaterial zu einer Überhöhung des Signals beitragen kann. Aus diesem Grund sind mehrere Messungen durchgeführt worden, bei denen gezielt Blei, Eisen und Aluminium als Reflektormaterial eingesetzt wurde. Abbildung 3.17 verdeutlicht den prinzipiellen Aufbau dazu. Bei der Positionierung des Materials wurde darauf geachtet, daß kein Andruck auf die Wellenlängenschieber ausgeübt wurde.

Zu diesem Effekt tragen im wesentlichen nur zurückgestreute Photonen bei. Sie sind nicht isotrop verteilt in der Richtung, weil die dafür verantwortliche Comptonstreuung um so wahrscheinlicher wird, je geringer die Winkeländerung der γ -Quanten ist. Bei den zurückgestreuten Photonen dominieren also solche, die unter einem flachen Winkel auf das Kalorimeter treffen, was sich in einer kleineren mittleren Eindringtiefe niederschlägt. Dies führt zu einem unterschiedlichen Verhalten der Photomultiplierantwort, je nachdem auf welcher Seite sich das Eichpräparat befand. Es ist also zu erwarten, daß der Effekt insgesamt auf der dem Eichpräparat zugewandten Seite größer ist, so daß im folgenden auch nur dieser Fall betrachtet wird. Experimentell wurden folgende Ergebnisse³ erzielt:

- Blei $\approx 2\%$ ($20 \times 100 \times 200\text{mm}^3$) und ($100 \times 50 \times 200\text{mm}^3$),
- Eisen $\approx 4\%$ ($20 \times 100 \times 200\text{mm}^3$) und ($100 \times 50 \times 200\text{mm}^3$),
- Aluminium $\approx 1\%$ ($16 \times 200 \times 200\text{mm}^3$).

Die für das Kalorimeter entscheidende Rückstreuung findet bei schweren Materialien nur an der Oberfläche statt, so daß die Tiefe des Materials keinen Einfluß auf die Größe des Effekts hat. Monte-Carlo-Ergebnisse an allen relevanten Materialien bestätigen die experimentellen Werte. Sie sind in der Tabelle 3.3 zusammengefaßt.

³Das Rückstreumaterial wurde entsprechend der Abbildung 3.17 angebracht und erstreckte sich in jedem Fall über die gesamte Breite des Turmes von 200 mm. Die Angaben entsprechen immer (Tiefe \times Höhe \times Breite).

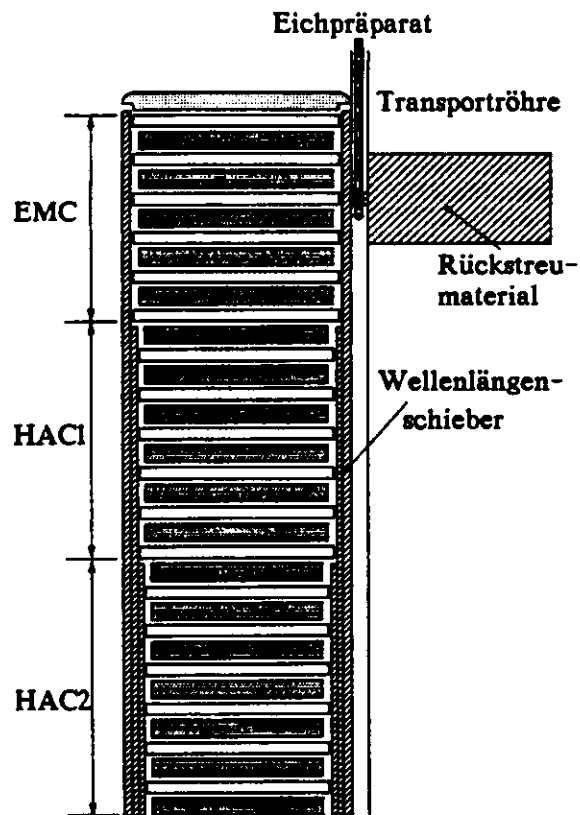


Abbildung 3.17: Versuchsaufbau zur Rückstreuung von Teilchen an verschiedenen Materialien.

Abmessungen	$20 \times 100 \times 200 \text{ mm}^3$		$100 \times 50 \times 200 \text{ mm}^3$		$16 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$	
	Messung	MC	Messung	MC	Messung	MC
Blei	2 %	3.2 %	-	3.1 %	-	-
Eisen	4 %	6.6 %	4 %	7.2 %	-	-
Aluminium	-	-	-	-	1 %	1.2 %

Tabelle 3.3: Zunahme des ^{60}Co -Signals durch Rückstreuung an verschiedene Metallklötzen.

Die Werte sind alle größer als die experimentellen, da bei der Simulation nur die Energie der in einem bestimmten Raumwinkelanteil zurückgestreuten Photonen aufsummiert wird, und nicht mehr berücksichtigt wurde, daß nicht alle dieser Photonen zu einem Signal beitragen. Qualitativ wurde jedoch das gleiche Resultat erzielt: bei Blei ist der Effekt in etwa nur halb so groß wie bei Eisen.

Mit den aufgezeigten Erkenntnissen läßt sich in etwa der Einfluß der genannten Stahlstreben, die bei den niederländischen Modulen hohl und bei den kanadischen massiv sind, abschätzen. Wird für die Simulation ein Abstand von fünf bis sieben Zentimeter betrachtet, erhält man einen Effekt, der kleiner als 1% ist, was nicht zu einer signifikanten Beeinflussung der Signale führt.

Kapitel 4

Monte-Carlo-Simulationen

Häufig ist es sehr hilfreich, komplexe Systeme mit Hilfe von Monte-Carlo-Programmen zu simulieren, da eine analytische Bestimmung des Verhaltens vieler Teilchen nicht möglich ist. So ist es z.B. nur mit einer Simulation möglich, ein genaues Bild von der Anregung einer Kalorimetersektion zu bekommen. Für die Simulation einer Kalorimetersektion, wie sie Abbildung 4.2 zeigt, wurde das EGS4 Programmpaket [EGS 85] benutzt. Es führt Wechselwirkungen von Elektronen bzw. Positronen und Photonen mit jeder Art von Medien durch, die aus Elementen, Gemischen oder Verbindungen bestehen können. Der EGS4-Kode ist in der Lage, den Transport von Teilchen mit Energien von mehreren 1000 GeV bis hinab zu einigen keV zu verfolgen. Da dieses Simulationsprogramm nur elektromagnetische Prozesse betrachtet, welche im allgemeinen gut bekannt und damit berechenbar sind, stellt es sehr verlässliche Ergebnisse zu Verfügung.

Hierbei werden alle wichtigen elektomagnetischen Prozesse berücksichtigt:

- ▷ Bremsstrahlung (— Unterprogramm: **BREMS**),
- ▷ Paarproduktion (— Unterprogramm: **PAIR**),
- ▷ Comptoneffekt (→ Unterprogramm: **COMPT**),
- ▷ Rayleighstreuung (→ Unterprogramm: **PHOTON**),
- ▷ Photoeffekt (→ Unterprogramm: **PHOTO**),
- ▷ e^-e^+ -Annihilation (— Unterprogramm: **ANNIE**),
- ▷ Vielfachstreuung bzw. Molièrestreuung (→ Unterprogramm: **MSCAT**),
- ▷ Møller (e^-e^-) und Bhabha (e^-e^+) Streuung (→ Unterprogramm: **BHABHA**),
- ▷ Energieverlust durch Ionisation (→ Unterprogramm: **ELECTR**).

EGS4 stellt seine Funktionalität in der Form von Unterprogrammen zur Verfügung. Der Benutzer schreibt ein Hauptprogramm, welches den gesamten Ablauf steuert und folgende Struktur aufweist:

- ▷ Initialisierung der Benutzerdaten mit dem Programmpaket PEGS4, welches die Wirkungsquerschnitte der benutzten Materialien berechnet,
- ▷ Initialisierung des EGS Systems (Aufruf des Unterprogramms HATCH),
- ▷ Produktion von elektromagnetischen Schauern. Dazu wird in einer Schleife das EGS-Unterprogramm SHOWER mit den Anfangsparametern des Primärteilchens aufgerufen. Durch die Anfangsparameter Ladung, Energie, Ort und Bewegungsrichtung des Teilchens lassen sich verschiedenartige Teilchenquellen simulieren.
- ▷ Ausgabe der angesammelten Informationen.

Die SHOWER-Routine ihrerseits ruft die vom Benutzer zu stellenden Unterprogramme HOWFAR und AUSGAB auf. Im Unterprogramm HOWFAR wird die Detektorgeometrie festgelegt, die vom SHOWER-Programm benutzt wird. Stellt sich zum Beispiel heraus, daß ein Teilchen den Detektor verläßt, kann in HOWFAR verlangt werden, daß dieses Teilchen nicht weiter zu verfolgt wird.

Die Routine AUSGAB wird vor und nach jedem Ereignis aufgerufen. Der Benutzer legt hier fest, welche Informationen wie z.B. Ort und Art der Wechselwirkung, Größe des Energieverlustes, Transport um eine bestimmte Strecke usw. am Ende des Programmablaufs ausgegeben werden sollen. Der Ablauf ist nochmals in Abbildung 4.1 als Flußdiagramm dargestellt. Das Verhalten des EGS Systems kann durch eine Reihe von Parametern beeinflusst werden, die während der Initialisierung des Hauptprogrammes geändert werden können. Ihr Einfluß auf die erzielten Ergebnisse soll im nächsten Abschnitt näher erläutert werden.

4.1 Die Abschneideparameter

Wie in jedem Monte-Carlo-Programm muß auch bei EGS4 der Energiebereich festgelegt werden, in dessen Grenzen eine Simulation durchgeführt werden soll. Die Wahl der Abschneideparameter hängt von der Fragestellung und der Geometrie ab. Generell lassen sich die Abschneideparameter nicht beliebig klein wählen, da dieses häufig einen drastischen Anstieg der benötigten Rechenzeit verursacht.

Elektronen und Photonen verlieren ihre Energie durch Erzeugung sekundärer Teilchen mit Energien oberhalb der Abschneideparameter AE und AP, unterhalb dieser Schwellen nur noch durch kontinuierlichen Energieverlust. Die Wirkungsquerschnitte zur Erzeugung sekundärer Teilchen werden in dem Programmpaket PEGS4 für einen frei wählbaren Energiebereich berechnet. Die untere Grenze ist durch den Parameter ECUT und PCUT festgelegt. Fällt die Energie eines Teilchen unterhalb des Wertes der Parameter ECUT und PCUT, wird der Weitertransport beendet, und die Energie der Teilchen wird an diesem Ort deponiert. Als EGS-Konvention beinhalten alle Abschneideparameter, die sich auf die Elektronen beziehen, die Ruhemasse des Elektrons.

Die elastische Streuung von Elektronen an einem Kern oder einer Elektronenhülle wird nicht in seinen tatsächlich stattfindenden kleinen Einzelschritten behandelt, sondern das Elektron wird nur einen festen Schritt transportiert. Danach wird die effektive Richtungsänderung und die wahre Weglänge nach der Theorie der Vielfachstreuung von Molière berechnet. Gleichzeitig werden oberhalb von AE sekundäre Elektronen erzeugt. Unterhalb von AE verlieren die Elektronen nur noch kontinuierlich Energie durch Ionisation. Die Berechnung der Elektronen-Schrittweite hängt von vielen Parametern ab, wie zum Beispiel von der Geometrie, der Wahrscheinlichkeit von diskreten Ereignissen und verschiedenen Einschränkungen durch den Formalismus der Vielfachstreuung.

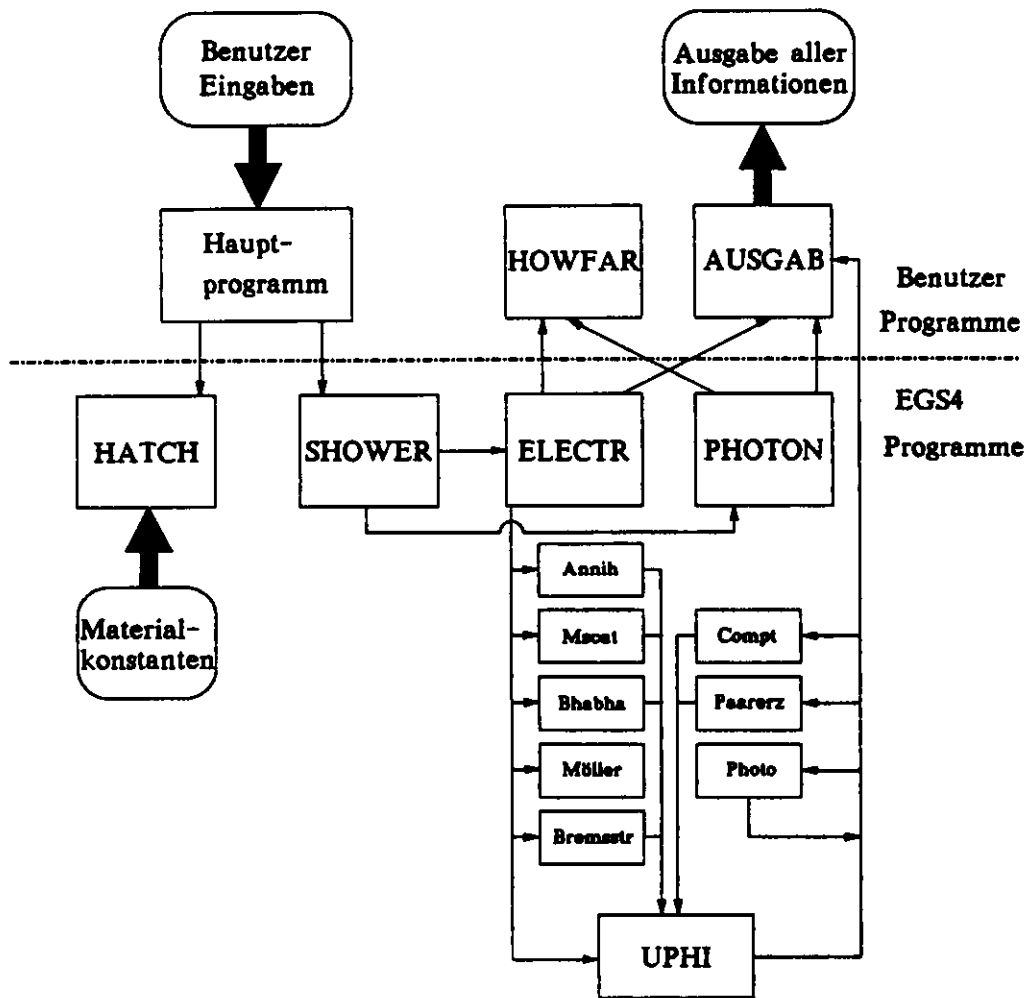


Abbildung 4.1: Flußdiagramm eines EGS4-Monte-Carlo-Programms.

Die mittlere freie Weglänge bis zu einer diskreten Wechselwirkung basiert auf dem Wirkungsquerschnitt, der zu Beginn des Schrittes bestimmt wurde und ist eine Funktion von ΔE und ΔP , wie in [ROG 84] gezeigt wurde. Um den Energieverlust des Elektrons zu berücksichtigen, wird daher ein Korrekturmechanismus benutzt, dem die Annahme zugrunde liegt, daß die mittlere freie Weglänge des Elektrons mit dem Abnehmen der Elektronenenergie ansteigt. Um diese Änderung zu berücksichtigen, werden einige der während des Transportes des Elektrons möglich gewordenen diskreten Wechselwirkungen nicht berücksichtigt. Die Anzahl der unterdrückten Ereignisse wird durch das Verhältnis des Wirkungsquerschnittes zu Beginn und am Ende des Schrittes bestimmt. Für sehr kleine Werte von ΔE führt diese Korrektur zu falschen Ergebnissen auf dem Niveau von einigen Prozent [ROG 84]. Höhere Werte für ΔE und ΔP andererseits unterdrücken den schnellen Energieverlust durch diskrete Ereignisse und erlaubt den Elektronen bzw. den Photonen längere Distanzen zurückzulegen, da hauptsächlich nur die langsamen kontinuierlichen Energieverlustmechanismen betrachtet werden. Dadurch kann ein überproportionaler Anteil der Elektronen das leichte Szintillatormaterial verlassen (im Eisen ist die Reichweite dieser Elektronen sehr gering), was zu einer Verfälschung der Ergebnisse der berechneten Energiedeposition führen kann. Die benötigte Rechenzeit einbeziehend wurde ΔE auf 561 keV und ΔP auf 10 keV eingestellt.

Es läßt sich feststellen, daß für kleinere Werte von $ECUT$ und $PCUT$ genauere Ergebnisse erzielbar sind, bei gleichzeitiger Erhöhung der Rechenzeit. Als Voreinstellung der Abschneideparameter benutzt EGS4 1.5 MeV für $ECUT$ und 0.1 MeV für $PCUT$.

Die Anzahl der Elektronen, die unterhalb $ECUT$ fallen, ist für die schweren Medien erheblich größer als für die Szintillatoren, was dazu führt, daß die Wahl von $ECUT$ für die schweren Medien einen größeren Einfluß besitzt. Da die Uranplatten von dünnen Eisenlagen umgeben sind, spielen alle Abschneideparameter für Uran keine Rolle, sofern sie nicht so groß gewählt werden, daß auch sekundäre Teilchen nahe des Überganges zum Eisen, die aufgrund ihrer Energie das gesamte Eisen durchdringen könnten, nicht berücksichtigt werden. Ferner ist der Wirkungsquerschnitt für die elastische Streuung der Elektronen proportional zu der Ordnungszahl des Materials, wodurch ein Anteil niederenergetischer Elektronen am Eisen zurückgestreut wird.

Der Photonenabschneideparameter $PCUT$ wurde für alle Medien auf einen Wert von 10 keV eingestellt, womit für die die Ergebnisse bestimmenden Materialien alle möglichen Wechselwirkungen berücksichtigt werden.

Der Parameter $ESTEPE$ legt den Anteil des Energieverlustes pro Schritt fest. Wird ein großer Schritt, bedingt durch ein großes $ESTEPE$, nahe einer Geometriegrenze durchgeführt, behandelt der EGS4-Algorithmus diesen Schritt als ob er vollständig in dem Medium stattfindet, in dem sich das Teilchen anfangs befand. Dieser Fehler kann in einer dünnen Viellagenstruktur durchaus signifikante Größenordnungen annehmen. Andererseits verhindern zu kleine $ESTEPE$ -Werte die Berücksichtigung der Vielfachstreuung durch die dann zu kleinen Schrittweiten und erhöhen die Rechenzeit erheblich.

Zur Optimierung der Parameter wurde der Einfluß der Elektronen auf die betreffenden Abschneideparameter untersucht. Dazu wurde eine Photonenquelle mit einer kinetischen Energie von 1.173 MeV bzw. 1.332 MeV, in einer zweilagigen Geometrie, wie sie Abbildung 4.2 zeigt, simuliert. Für spätere Vergleiche der Ergebnisse aus den Simulationen mit den erzielten Daten wurde ein Kalorimeter einer hadronischen Sektion aus dem Vorwärtsbereich und einer elektromagnetischen Sektion aus dem Rückwärtsbereich mit den Abmessungen der Tabelle 4.3 simuliert. $ECUT$ wurde zur Optimierung von 1.511 MeV bis 0.521 MeV variiert. Dabei zeigte sich, daß der Anteil der sichtbaren Energie an der Gesamtenergie mit 3.9 % unterhalb von $ECUT=0.711$ MeV konstant bleibt, so daß dieser Wert für alle Materialien außer Uran und Aluminium gewählt wurde. Die benötigte Rechenzeit für ein Ereignis verhält sich in etwa umgekehrt proportional zu $(ECUT)^2$. Für die gewählte Einstellung hat die Häufigkeit der Vielfachstreuung ebenfalls einen konstanten Wert angenommen.

Den Einfluß von ESTEPE auf die Rechenzeit und die Energiedeposition zeigt die Tabelle 4.1 unter Berücksichtigung der Tatsache, daß nur die Materialien Eisen, Szintillator und Papier für diesen Parameter von Bedeutung sind. Auf die Unterdrückung der Vielfachstreuung hat diese Einstellung

ESTEPE	mittlere Elektronenschrittweite		Rechen- zeit	Energiedep. ^a [MeV]	NOSCAT ^b
	Eisen [mm]	Szint. [mm]			
Voreinstell.	0.013	0.28	≡1	10860	-
0.200	0.014	0.32	3	10434	-
0.100	0.014	0.18	3	10024	-
0.050	0.014	0.10	3	9804	-
0.030	0.0098	0.062	3	9686	-
0.010	0.0037	0.021	4	9762	0.01
0.003	0.0011	0.0065	5	9791	0.01
0.001	0.0004	0.0022	5	9423	0.01

^aabsolute Energiedeposition im Szintillator in [MeV]

^bAnteil der unterdrückten Vielfachstreuung

Tabelle 4.1: Optimierung des Abschneideparameters ESTEPE. Es wurden 10^6 γ -Quanten in Richtung einer zweilagigen Szintillator/Uran-Struktur fliegend simuliert.

keinen nennenswerten Einfluß.

In der Tabelle 4.2 sind abschließend die optimierten Einstellwerte zusammengefaßt.

Medium	EGS4-Parameter				
	AE	AP	ECUT	PCUT	ESTEPE
Uran	0.561 MeV	0.01 MeV	1.500 MeV	0.01 MeV	Voreinstellung
Eisen	0.561 MeV	0.01 MeV	0.711 MeV	0.01 MeV	1%
Aluminium	0.561 MeV	0.01 MeV	1.500 MeV	0.01 MeV	Voreinstellung
WLS	0.561 MeV	0.01 MeV	0.711 MeV	0.01 MeV	Voreinstellung
SCSN-38	0.561 MeV	0.01 MeV	0.711 MeV	0.01 MeV	1%
Papier	0.561 MeV	0.01 MeV	0.711 MeV	0.01 MeV	1%
Luft	0.561 MeV	0.01 MeV	0.711 MeV	0.01 MeV	Voreinstellung

Tabelle 4.2: Optimierte Abschneideparameter der EGS4-Simulation.

4.2 Geometrie der simulierten Kalorimetersektion

Material	EMC-Sektion		HAC-Sektion		Dichte [g/cm ³]
	Dicke [mm]	Dicke [X_0]	Dicke [mm]	Dicke [X_0]	
Stahl	0.2	0.011	0.4	0.023	8.03
Uran	3.3	1.000	3.3	1.000	18.95
Stahl	0.2	0.011	0.4	0.023	8.03
Luft	0.45		0.45		0.0125
Papier	0.2		0.2		1.39
Szint.	2.6	0.006	2.6	0.006	1.032
Papier	0.2		0.2		1.39
Luft	0.45		0.45		0.0125
Summe	7.6	1.028	8.0	1.052	
Effectives X_0	0.74 cm		0.76 cm		
Effectives λ	21.0 cm		20.7 cm		

Tabelle 4.3: *Lagenstruktur der EMC- und HAC-Sektionen.*

Die Abbildung 4.2 zeigt den Aufbau der simulierten Geometrie für eine Szintillator/Uran-Lage am Beispiel einer HAC-Sektion. Alle Maße entsprechen denen im ZEUS-Kalorimeter, nur die Abstandshalter zwischen den Uranplatten wurden bei der Simulation vernachlässigt (vergleiche dazu Tabelle 4.3). Abbildung 4.3 kann die Lage des gewählten Koordinatensystems entnommen werden. Entlang der Z-Achse sind die Szintillator/Uran-Lagen angeordnet, entlang der X-Achse ist die Tiefe des Kalorimeters. Die Y-Achse ist die Breite des Kalorimeters. Sie beträgt zunächst 2000 mm und wird erst bei der Abfrage von Ereignissen auf die jeweilige Breite des Sektionstypes begrenzt. Die Position des Eichpräparates kann je nach Fragestellung frei gewählt werden. Für die Parameterstudie wurden nur zwei Lagen der Szintillator/Uran-Struktur simuliert. Das Präparat hatte dabei einen Abstand von 0.25 mm von der Mitte der zweiten Szintillatorkante.

4.3 Ergebnisse

In diesem Absatz werden nur die Ergebnisse dargestellt, die von allgemeinerer Bedeutung sind. Ergebnisse speziellerer Natur werden in den entsprechenden Kapiteln gezeigt.

Bei dem Vergleich der erzielten Ergebnisse mit den Meßdaten sollte stets berücksichtigt werden, daß EGS4 nur deponierte Energien bzw. die Häufigkeit von Wechselwirkungen betrachten kann. Es berücksichtigt keine optischen Effekte, wie Effizienz zur Konvertierung zu Szintillatorlicht, Lichttransmission oder Reflexionen von Licht an Geometriegrenzen. Es werden auch keine k_p -Werte berücksichtigt.

Zunächst soll gezeigt werden, daß die Simulationen eine gute Übereinstimmung mit den beschriebenen Messungen aufweisen. Dazu zeigt die Abbildung 4.4 die Antwortfunktion einer REMC-Sektion, welche mit der realen Antwortfunktion auf Seite 66 in Abbildung 5.5 unter Vernachlässigung der dort dargestellten Störung vergleichbar ist.

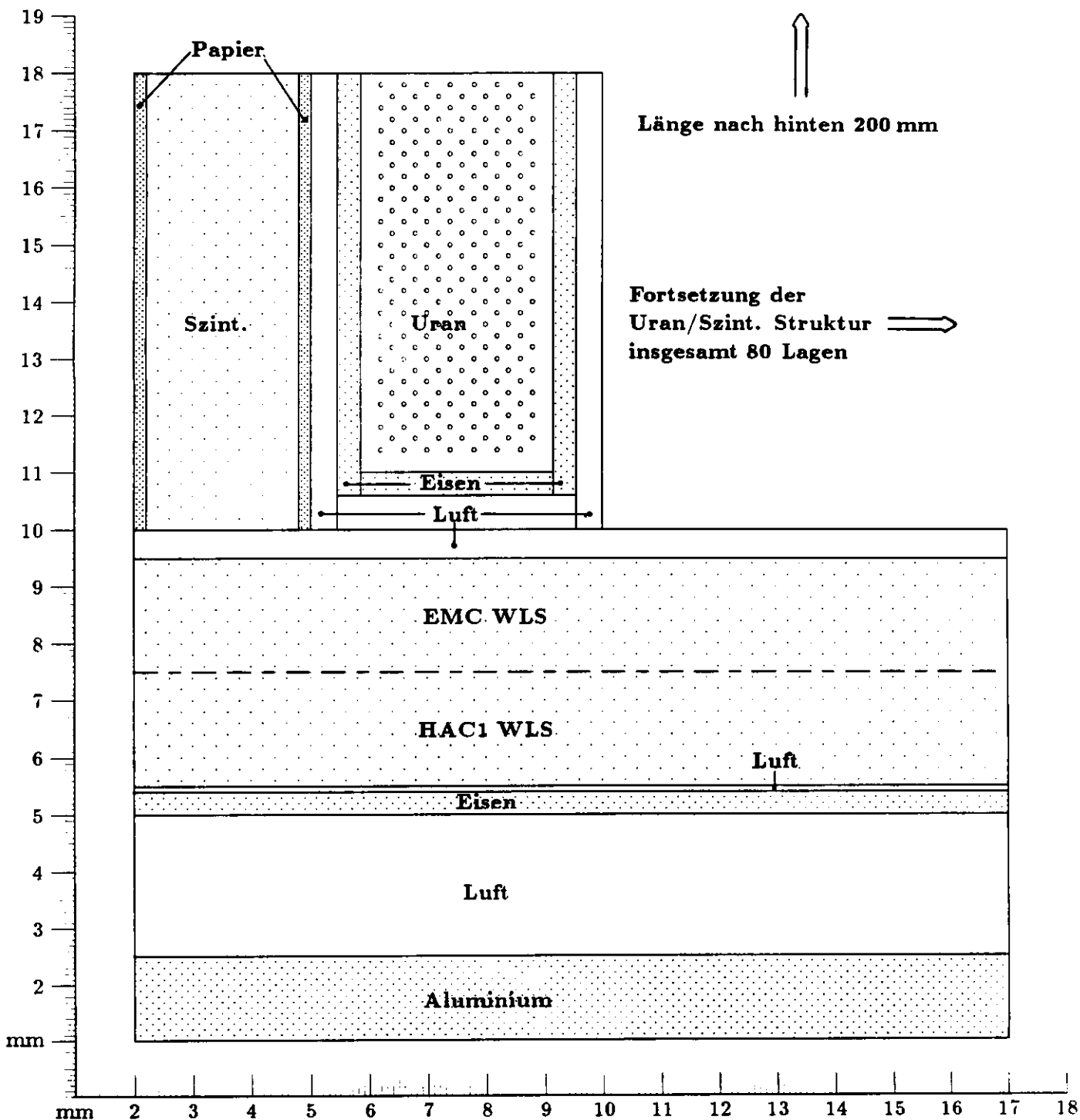


Abbildung 4.2: Geometrie für die Simulation einer HAC-Sektion für den Außen- und Innenabtaster.

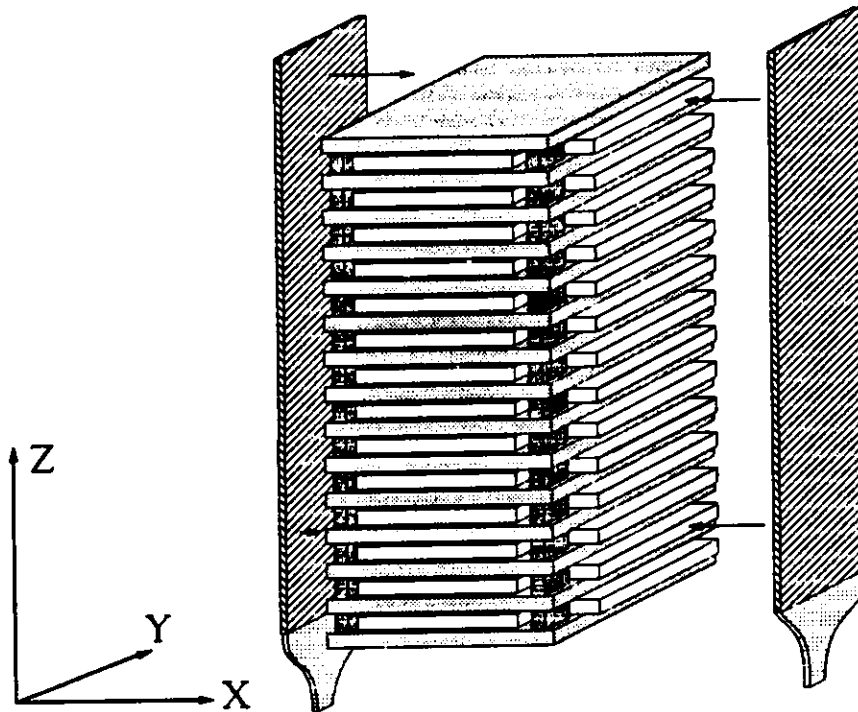


Abbildung 4.3: Aufbau und Koordinatensystem einer Kalorimetersektion.

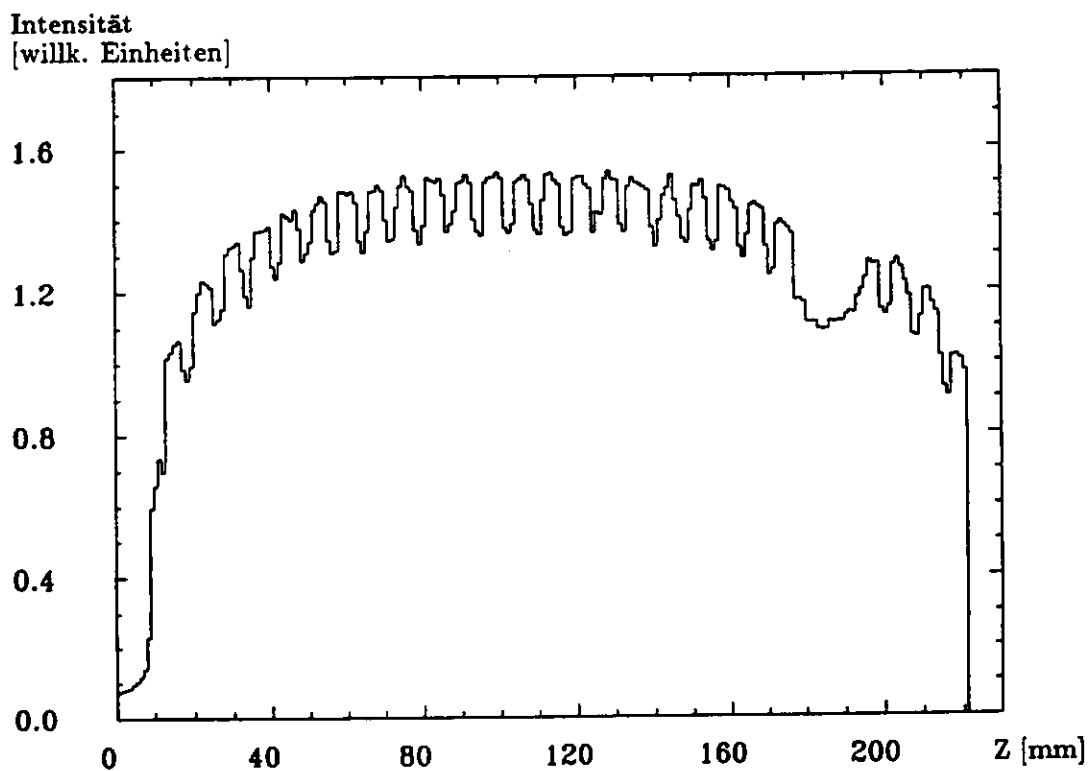


Abbildung 4.4: EGS4-Simulation einer REMC-Sektion.

Die simulierte Anregung erfolgte bei $X=11.5$ mm, was der Innenabtastung entspricht, in Schritten von einem Millimeter. Pro Schritt wurden $5 \cdot 10^5$ γ -Quanten in Richtung des Kalorimeters emittiert, so daß das statistische Verhalten mit der Realsituation vergleichbar ist. Es wurden 222 einzelne Simulationen durchgeführt, die auf einer VMS-VAX 9000-210 eine Rechenzeit von ungefähr 2000 Minuten benötigte. Der Startpunkt wurde bei $Z=222$ mm gewählt, also direkt an der Kante des ersten Szintillators. Die Auflösung¹ bei der Simulation entspricht mit etwa 9% der Realsituation bei der Innenabtastung. Der Schacht für die HES-Detektoren ist in ähnlicher Weise „ausgeschmiert“, wie es schon bei den Messungen der Innenabtastung gefunden wurde. Das Auftreten einer kleinen zusätzlichen Erhöhung bei $Z=12$ mm zeigt, daß der Randbereich größeren statistischen Unsicherheiten unterworfen ist. Er ist nicht die Folge eines an dieser Stelle lokalisierten Szintillators. Solche Erscheinungen wurden auch bei den tatsächlichen Daten gefunden.

Ein wichtiger Aspekt bei der Präparatenmethode ist die Eindringtiefe der γ -Quanten in den Szintillator. Dazu wurde die Energiedeposition in allen Szintillatoren einer HAC1-Sektion betrachtet. Auf Seite 36 Abbildung 3.5 ist ein Häufigkeitsdiagramm der Energiedeposition als Projektion auf die X-Y-Ebene dargestellt. Es ist zu erkennen, daß der Schwerpunkt der Absorption am Rand auf der Seite der Anregung liegt. Soll hieraus die für die Bestimmung der Abschwächlängen der Szintillatoren notwendige mittlere Eindringtiefe \bar{d} der γ -Quanten in die Szintillatoren bestimmt werden, muß eine Projektion der Werte auf die X-Achse durchgeführt werden, wie es in Abbildung 4.5 geschehen ist. Der Wert für \bar{d} wurde nach der folgenden Formel bestimmt:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^{186} X_i \cdot E_{dep}(X_i)}{\sum_{i=1}^{186} E_{dep}(X_i)} \quad (4.1)$$

mit

$$E_{dep}(X_i) = \text{Energiedeposition an der Position } X_i, \\ \text{wobei } i \text{ in ein Millimeterschritten läuft.}$$

Wobei sich die Summation über die volle Breite (186 mm) eines HAC1-Szintillators und über alle 80 Szintillatoren des Turmes erstreckt. Für die Szintillatortypen und unterschiedliche Anregungsposition beträgt sie in etwa $\bar{d} \approx 11-14$ mm. Die mittlere Eindringtiefe unterscheidet sich für jeden Szintillatortyp und jede Bestrahlungsposition, die durch die Position der Transportröhren und der Art der Abtastung gegeben ist. Eine Auflistung der unterschiedlichen Werte \bar{d} für die einzelnen Kalorimetersektionen befindet sich in der Tabelle 7.1 auf Seite 99.

In einigen Zusammenhängen ist es auch von Interesse, diese Größe für einzelne Szintillatoren zu kennen, wie sich also \bar{d} mit zunehmenden Abstand Präparat/Szintillator verhält. Als Abstand ist hier der Abstand in Z-Richtung, also entlang des Turmes, zu verstehen. Die Abbildung 4.6 zeigt dies für die ersten 30 Szintillatoren. Das ^{60}Co -Präparat ist an der Stelle des ersten Szintillators lokalisiert. Mit zunehmenden Abstand verringert sich \bar{d} . Würde man zu dem Szintillator eins auch zur linken Seite die Szintillatoren auftragen, erhielte man ein siegelsymmetrisches Bild. Betrachtet man nun wieder das \bar{d} für die gesamte Sektion, wird deutlich, daß das mittlere \bar{d} für eine Position des ^{60}Co -Präparates am Rand einer Sektion deutlich größer wird, da zu jeweils einer Seite die Nachbarszintillatoren fehlen, die ansonsten \bar{d} senken würden.

Weiterhin wurde die Energieverteilung auf die einzelnen Lagen des Kalorimeters bestimmt. Abbildung 4.7 zeigt ein Häufigkeitsdiagramm der Energiedeposition der Szintillator/Uran-Lagen, die Abbildung 4.8 die Verteilung auf die Szintillatoren dazu. Etwa 28% der gesamten sichtbaren Energie entfällt bei der Innenabtastung auf den Szintillator, der dem ^{60}Co -Präparat am nächsten steht.

¹Die Definition des Begriffes Auflösung wurde bereits in Kapitel 3.4 gegeben.

Energiedeposition
[willk. Einheiten]

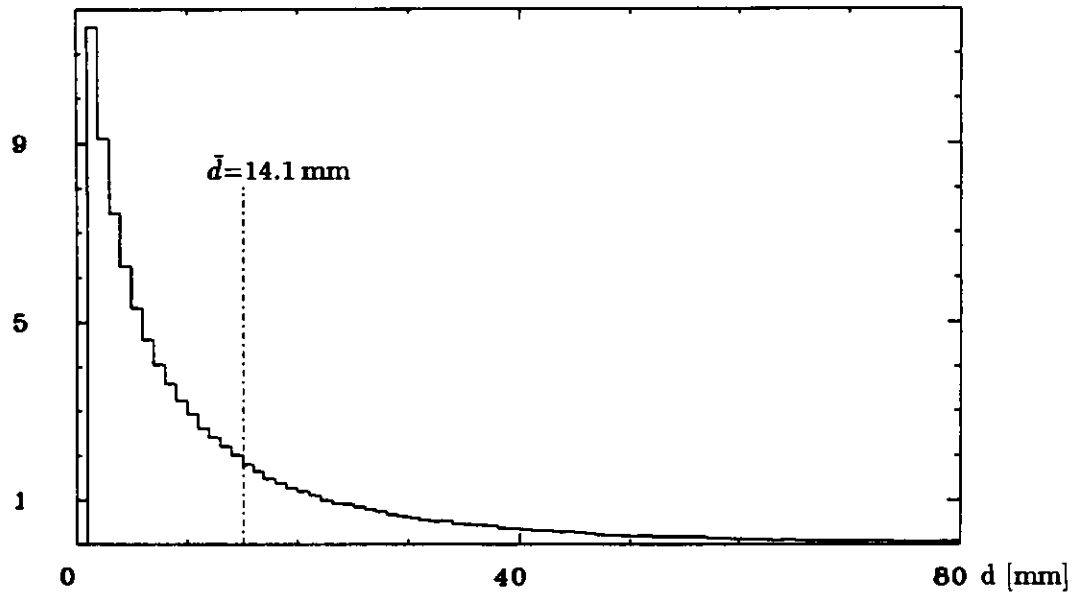


Abbildung 4.5: Energiedeposition in Abhängigkeit von der Eindringtiefe d in den Szintillator für eine RHACØ-Sektion.

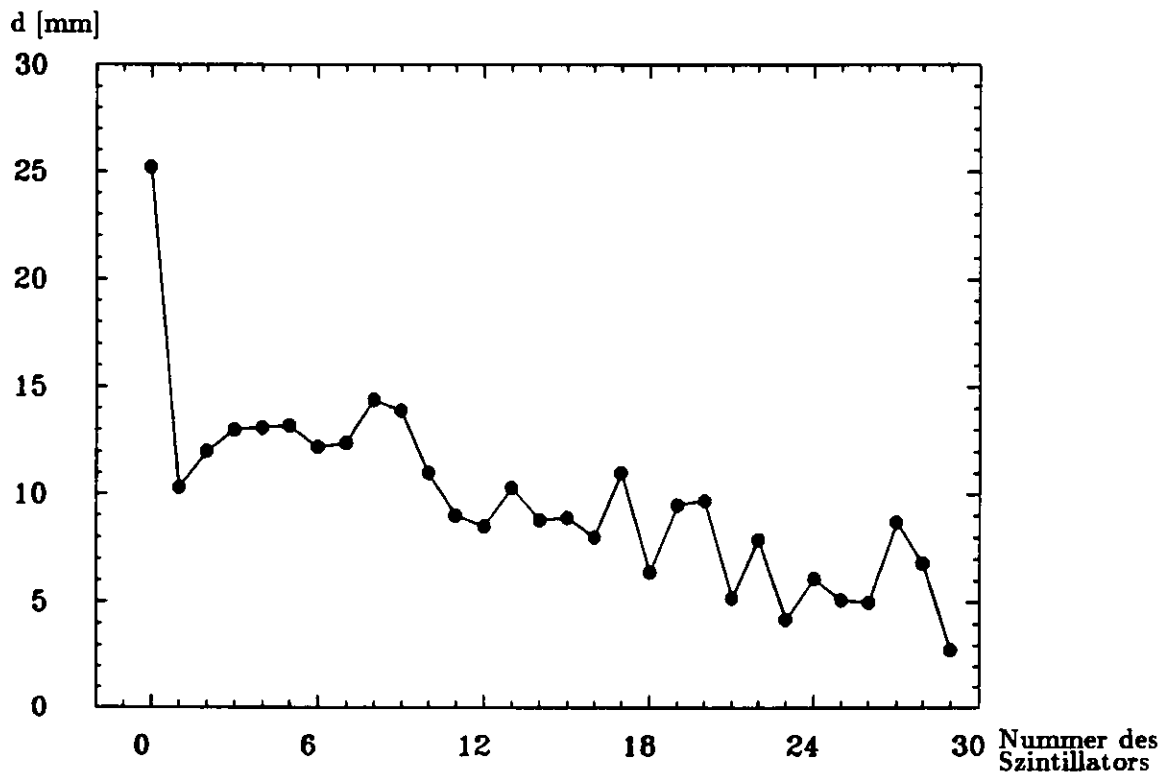


Abbildung 4.6: Mittlere Eindringtiefe \bar{d} in einzelne Szintillatoren. Das ^{60}Co -Präparat befindet sich direkt vor dem ersten Szintillator (Nr.0). Der statistische Fehler wächst mit zunehmenden Abstand vom Szintillator wegen der abnehmenden Energiedeposition ($E_{dep} < 1\%$ ab Nr.12) schnell an.

Dieser Anteil fällt auf etwa 24% für die Außenabtastung wegen des drei bis vier Millimeter größeren Abstands des ^{60}Co -Präparats zum Szintillator ab. Diese Zahlen stehen im guten Einklang mit den in Abbildung 2.5 gezeigten experimentellen Ergebnissen.

Auch konnte das Ausmaß von Szintillatorverschiebungen, wie z.B. auf Seite 65 in Abbildung 5.3 dargestellt ist, abgeschätzt werden. Dazu wurden in der Simulation Szintillatoren relativ zu den Uranplatten zurück- bzw. vorgeschoben. Der Maximalwert dieser Verschiebungen betrug 0.6 mm. Das ist der Wert, den die Szintillatoren normalerweise vorstehen. Diese Simulation führte zu einer Senkung bzw. Erhöhung der Menge an deponierter Energie von etwa 5%. Mit Hilfe dieser Information ließen sich reale Verschiebungen in ihrem Ausmaß, bevor ein näheres Untersuchen möglich war, abschätzen.

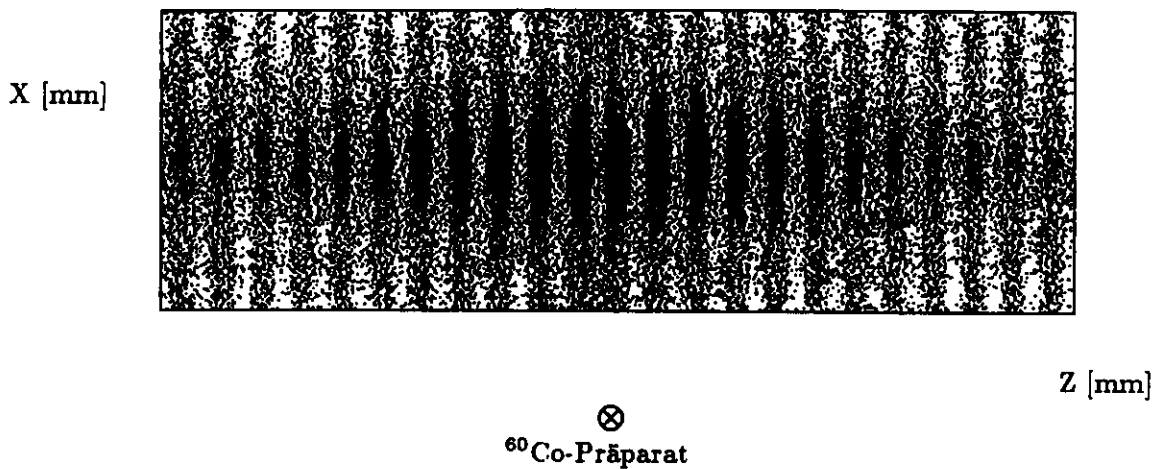


Abbildung 4.7: Energieverteilung auf die einzelnen Szintillator/Uran-Lagen des Kalorimeters als Projektion auf die X-Z-Ebene.

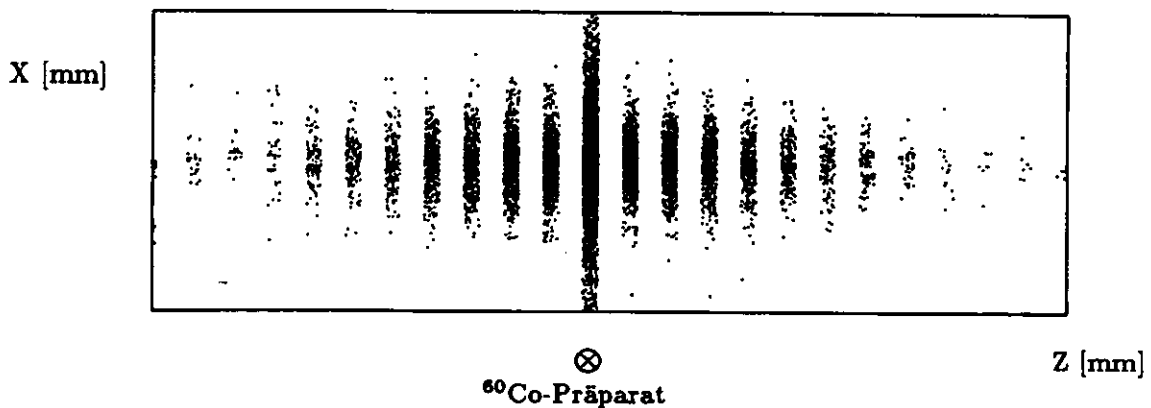


Abbildung 4.8: Energieverteilung auf die einzelnen Szintillatoren als Projektion auf die X-Z-Ebene.

Kapitel 5

Prüfung der mechanischen Qualität des ZEUS-Kalorimeters

Die ^{60}Co -Methode gibt neben den Langzeituntersuchungen der Alterungs- und Strahlenschäden an den optischen Komponenten des Kalorimeters und der Homogenitätsanalyse auch die Möglichkeit, mechanische Aufbau- bzw. Einbaufehler nachzuweisen. Diese Möglichkeit gewinnt besonders an Bedeutung, wenn sich einige dieser Unregelmäßigkeiten vor dem endgültigen Einbau beseitigen lassen. Für den Vorwärts- und Rückwärtsbereich des ZEUS-Kalorimeters konnten damit eine Vielzahl mehr oder weniger schwerwiegender Fehler festgestellt werden. Sofern es möglich war, wurden alle Unregelmäßigkeiten beseitigt, bei denen mit einem spürbaren Einfluß auf die zu erwarteten Ergebnisse im Betrieb des ZEUS-Detektors zu rechnen war. In diesem Kapitel werden alle beobachteten Unregelmäßigkeiten beschrieben, wobei im folgenden nicht zwischen Fehlern während des Aufbaus eines Moduls oder nachträglicher Veränderungen verschiedener Ursachen, wie z.B. Transport der Module, unterschieden werden soll. Es findet eine Einteilung in folgende Klassen statt:

- ▷ Stapelfehler, d.h. unregelmässige Positionierung einzelner Szintillatoren,
- ▷ falsch positionierte Wellenlängenschieber, so daß es zu einer unvollständigen Lichtauslese kommt,
- ▷ Störungen der Lichtauslese, d.h. Reduzierung der Lichtausbeute im Szintillator oder Wellenlängenschieber und
- ▷ Inhomogenitäten ungeklärter Ursache.

Die drei erstgenannten Fehler führen zu charakteristischen Störungen der Uniformität der betroffenen Sektionen. Die Größe der Störung gibt ein Maß für die Schwere des Fehlers, wobei die Unterscheidung zwischen Tolerierbarem und nicht Tolerierbarem manchmal nicht frei von Unsicherheiten war. Für die Fehlerzuweisung standen wenigstens vier Datensätze je Sektion zur Verfügung (siehe Kapitel 2), da immer beide Photomultiplier eines Turmes ausgelesen wurden und das Präparat einmal auf der linken (ergibt zwei Datensätze) und der rechten Modulseite (ergibt zwei Datensätze) entlang eines Turmes bewegt wurde. Da alle EMC-Türme pro Turmseite von zwei Positionen aus bestrahlt wurden, stehen wenigstens acht Einzelantworten für jede HAC-Sektion zur Verfügung.

Die Aufspürung von Unregelmäßigkeiten wurde teilweise Auswerteprogrammen überantwortet, die nach bekannten Arten von Fehlern zu suchen hatten. Eine Beschreibung dieser Programme ist in

[GLO 91, MEY 91] zu finden. Letztendlich wurde die Entscheidung, ob eine Unregelmäßigkeit vorliegt, immer durch direkte Ansicht der entsprechenden Photomultiplierantworten vorgenommen.

5.1 Stapelfehler einzelner Sektionen

Der Platz von 3.9 mm für die Szintillatoren zwischen den stahlummantelten Uranplatten der Gesamtdicke von 4.1 mm (HAC1,2) bzw. 3.7 mm (EMC/HAC0) wird durch Abstandshalter aus Aluminiumoxyd realisiert. Diese haben je nach Sektion und Kalorimetertyp unterschiedliche Abmessungen, wobei die Größe so gewählt wurde, daß immer ein Abstandshalter zwischen zwei Szintillatoren benachbarter Türme sitzt. Pro Szintillator einer HAC-Sektion z.B. sind vier dieser Abstandshalter vorhanden. Die Szintillatoren sollten im Idealfall nur einige Zehntel Millimeter Distanz zu den Abstandshaltern haben, so daß ihre Position im wesentlichen durch die Abstandshalter und nur geringfügig durch den seitlichen Andruck der Wellenlängenschieber¹ bestimmt ist.

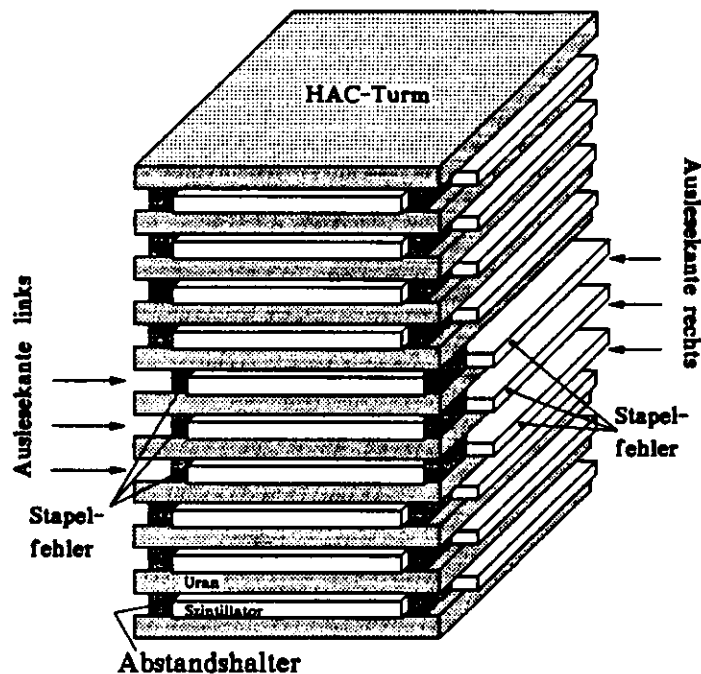


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung eines Stapelfehlers

Abbildung 5.1 zeigt die Situation einer unregelmäßigen Stapelung, die zu einer inhomogenen Photomultiplierantwort (Abbildung 5.2) führt. Um ein Brechen der Abstandshalter zu vermeiden, wurden die Abstandshalter etwas von der Kante der Uranplatte eingerückt. Der Abstand sollte $d = 2.5 \text{ mm}$ betragen. Ist der Abstandshalter zu weit eingerückt, kommt es zu einer Verschiebung der entsprechenden Szintillatoren, was sich in den Photomultiplierantworten niederschlagen wird. Ist der Abstandshalter parallel zu der Kante der Uranplatte zu weit eingerückt, sind immer beide Szintillatoren, die diesen Abstandshalter umgeben, betroffen. Als Konsequenz daraus ist die Störung in beiden Türmen erkennbar. Nur in dem Fall eines zu weit eingerückten und verdrehten Abstandshalter kann

¹Zwischen Wellenlängenschieber und Szintillator befindet sich eine 0.5 mm dicke Nylonschnur, so daß weder direkter mechanischer noch optischer Kontakt besteht.

es zu der Beeinflussung eines einzelnen Szintillators kommen. Hiervon kann durchaus eine größere Gruppe von Abstandshaltern eines Turmes betroffen sein, erfahrungsgemäß seltener aber einzelne.

Neben der Veränderung der Gleichmäßigkeit der optischen Eigenschaften kann dieser Umstand durchaus auch mechanische Schwierigkeiten hervorrufen. Das trifft insbesondere für die Abstandshalter in den HES-Schächten zu, da ein verdrehter oder ein verschobener Abstandshalter das Einbringen der HES-Detektoren verhindern kann. Für den das Problem betreffenden FCAL- und RCAL-Bereich ergaben die ^{60}Co -Messungen, daß alle Abstandshalter hinreichend gut positioniert sind.

Zwei unterschiedliche Gründe tragen zu den in Abbildung 5.2 erkennbaren Unterstrukturen bei. Zum einen ist durch die Verschiebung der Abstand des ^{60}Co -Präparat zu den betreffenden Szintillatoren für die beiden Anregungsseiten unterschiedlich. Dort wo die Szintillatoren herausstehen, wird mehr Energie in den Szintillatoren deponiert als auf der anderen Seite (vergleiche dazu Abbildung 5.1). Zum anderen ist das austretende Szintillationslicht für die Ausleseseite, wo die Kanten der Szintillatoren hinter den der Uranplatten liegen, in seiner Ausbreitung durch die Uranplatten eingeschränkt. Hierbei kommt es zu einer Reduzierung der Lichtausbeute. Die Summe beider Effekte zeigt sich in einer Erniedrigung der Lichtausbeute für die eingerückte und in einer Erhöhung für die herausstehende Seite der Szintillatoren. Während der erst genannte Effekt keinen großen Einfluß auf das ZEUS-Experiment haben wird, da die Anregung hier im wesentlichen von einer anderen Seite erfolgt, spielt der zweite Effekt, die Behinderung beim Lichttransport eine größere Rolle für das Experiment. Als ein wichtiges Ergebnis der Präparatenanregung ergab sich, daß der erste Effekt den entscheidenden Beitrag für die Photomultiplierantwort liefert; der Stapelfehler wird dadurch in Hinblick auf das Experiment durch die ^{60}Co -Methode überbetont. Insgesamt verkleinert sich die für das Experiment verbleibende Störung noch durch die übliche Addition der in diesem Fall komplimentären Signale beider Wellenlängenschieber einer Sektion, so daß im Mittel kaum eine Beeinflussung zu erwarten sein wird, wie Abbildung 5.3 verdeutlicht.

Allgemein läßt sich feststellen, daß die ^{60}Co -Methode ein empfindliches Werkzeug darstellt, um Stapelfehler nachzuweisen. Die Tabelle 5.1 zeigt exemplarisch, wie groß die gemessenen Abstände d bei einem typischen Stapelfehler sind.

Die Abbildung 5.4 illustriert den Einfluß eines einzelnen verschobenen Abstandshalter ($d \simeq 3 \text{ mm}$) in einer FEMC-Sektion. Diese Unregelmäßigkeit konnte in dieser Sektion behoben werden, da sich die Szintillatoren einer FEMC-Sektion aus der Stapelung entfernen lassen, und so ein Zugang zu dem betreffenden Abstandshalter geschaffen werden kann. Für alle anderen Sektionen ist diese Voraussetzung für ein nachträgliches Eingreifen nicht vorhanden, so daß es lediglich bei einer Registrierung blieb.

5.1.1 Optischer Kontakt durch Stapelfehler

Ein besonderer Fall einer fehlerhaften Stapelung entstand an dem Modul RNL14. Die Abbildung 5.5 zeigt eine REMC-Sektion, die von dem Problem betroffen ist. Diese Art von Photomultiplierantwort wurde in fast allen EMC-Türmen dieses Moduls (Turm 4 bis Turm 19) entdeckt. Während bei einem Stapelfehler kleineren Ausmaßes nur eine Überhöhung des Signals zu erwarten ist, wenn die Anregungsseite mit der Seite, auf der der Szintillator herausragt, zusammenfällt, wurde in diesem Fall eine Überhöhung bei Anregung von beiden Seiten ermittelt. Um den Sachverhalt zu klären, wurden zwei der betroffenen Türme geöffnet. Als Fehlerquelle wurde ein stark verschobener Szintillator an der Position drei entdeckt. Die Verschiebung war so nachhaltig, daß der Szintillator fest auf die Oberfläche des Wellenlängenschieber gedrückt wurde. Zwischen Szintillator und Wellenlängenschieber befindet sich ein Nylonfaden, der dazu dient, einen optischen Kontakt der beiden Komponenten zu vermeiden.

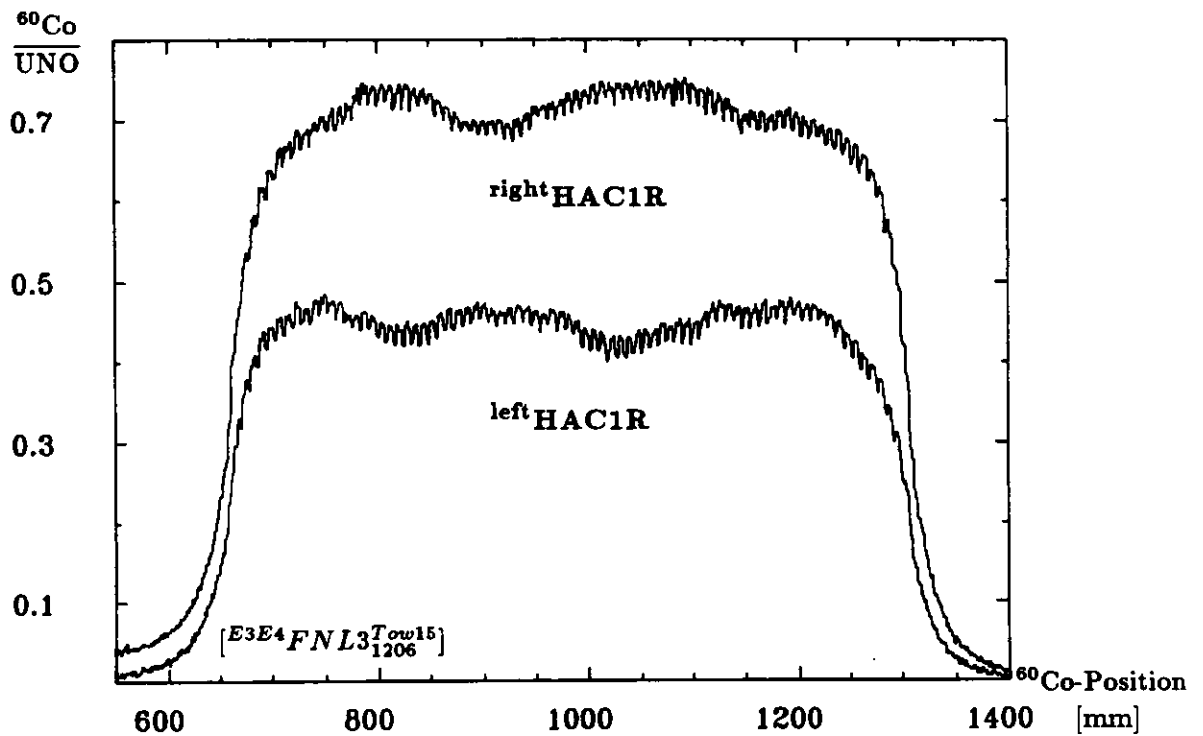
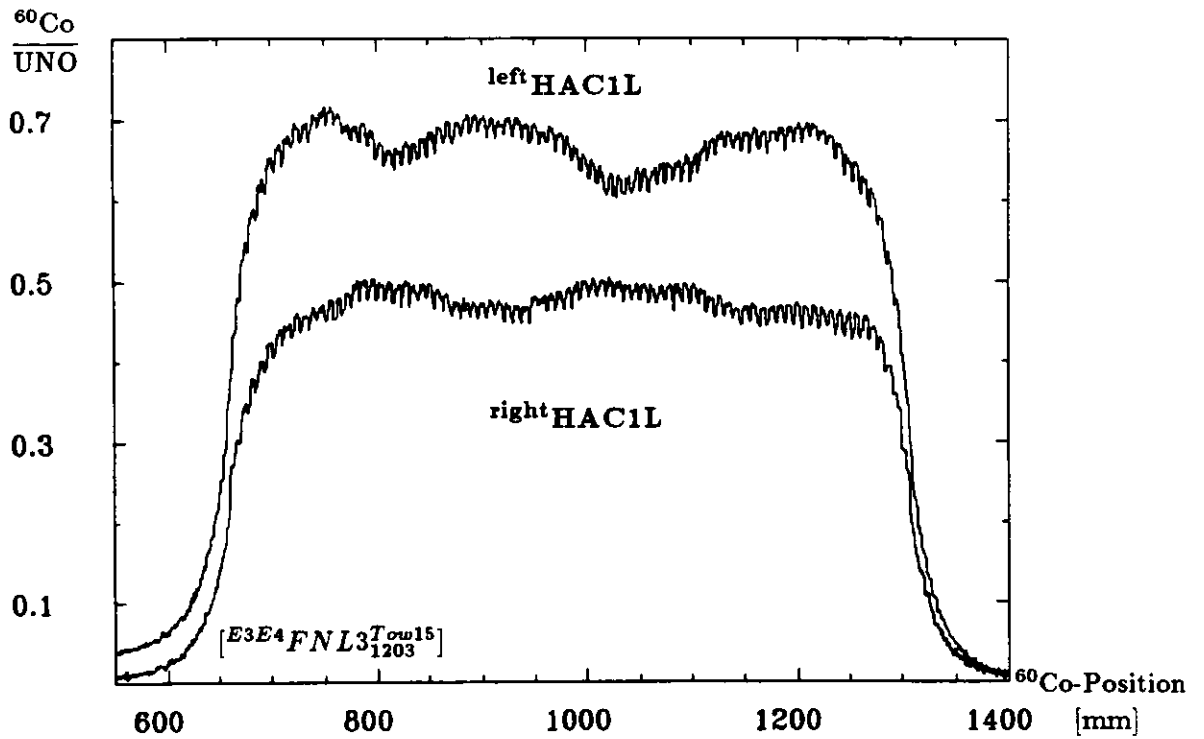
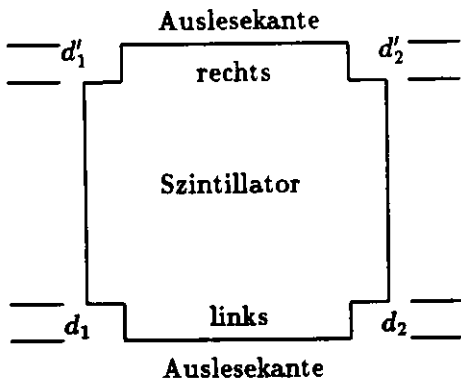


Abbildung 5.2: Die vier Antwortfunktionen einer FHAC1-Sektion mit verschobenen Szintillatoren.



Szintilla tor	Ausleseseite			
	links	rechts	links	rechts
	d_1	d'_1	d_2	d'_2
2.	3.2 mm	-	3.5 mm	-
3.	2.3 mm	-	2.6 mm	-
4.	2.1 mm	-	2.9 mm	-
5.	2.1 mm	-	1.7 mm	-
8.	3.9 mm	0 mm	3.8 mm	0 mm
18.	3.1 mm	-	3.1 mm	0.3 mm
29.	2.4 mm	-	2.6 mm	2.2 mm
45.	2.5 mm	-	3.5 mm	0.2 mm
49.	1.4 mm	-	4.3 mm	0.3 mm

Tabelle 5.1: Exemplarisch gemessene Abstandshalterpositionen am Modul FCD26, Turm 2.

Für die Abstände des vorderen bzw. hinteren Abstandshalter einer Ausleseseite stehen, wie der nebenstehenden Abbildung entnehmbar ist, die Größen d_1 und d_2 zur Verfügung. Aus diesen Größen lassen sich Rückschlüsse auf die Orientierung des Szintillators zu dem Wellenlängenschieber schließen, z.B. ist der 49. Szintillator um fast 2 mm verschoben und zusätzlich verdreht. Das Messen der Abstände wurde häufig durch eine zusätzliche Verdrehung der Abstandshalter erschwert und dadurch ungenau.

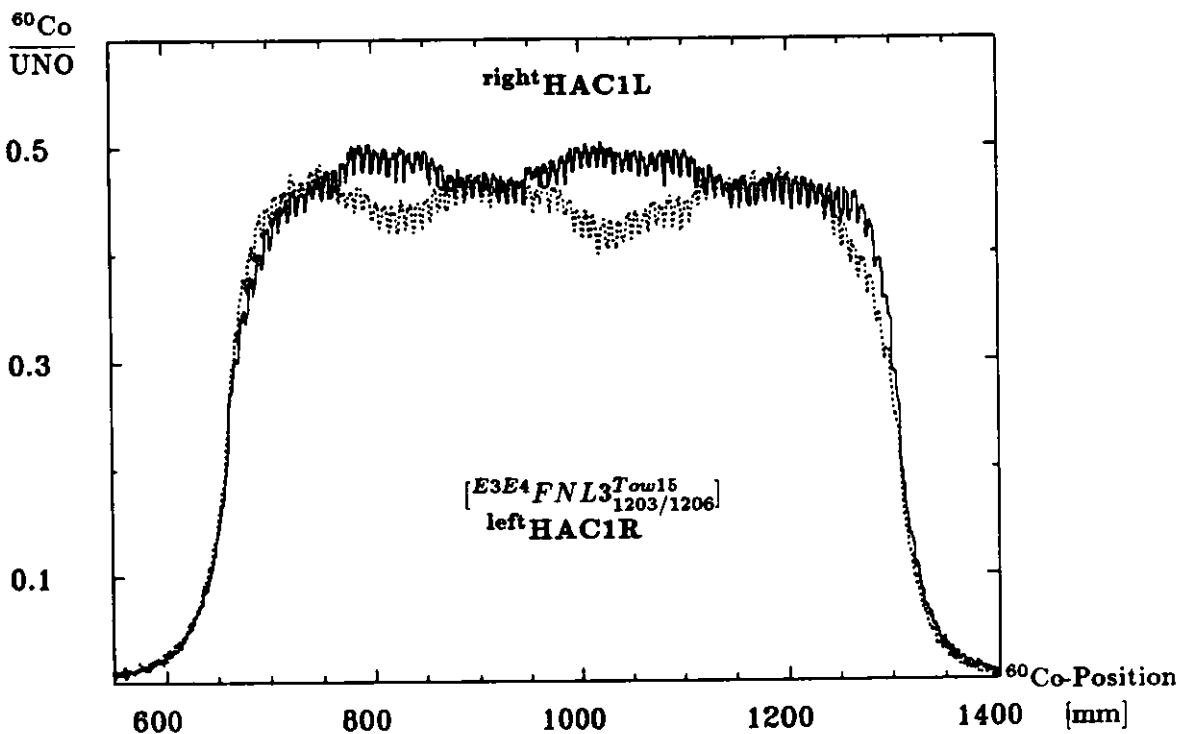


Abbildung 5.3: Überlagerte Antwortfunktionen bei verschobenen Szintillatoren.

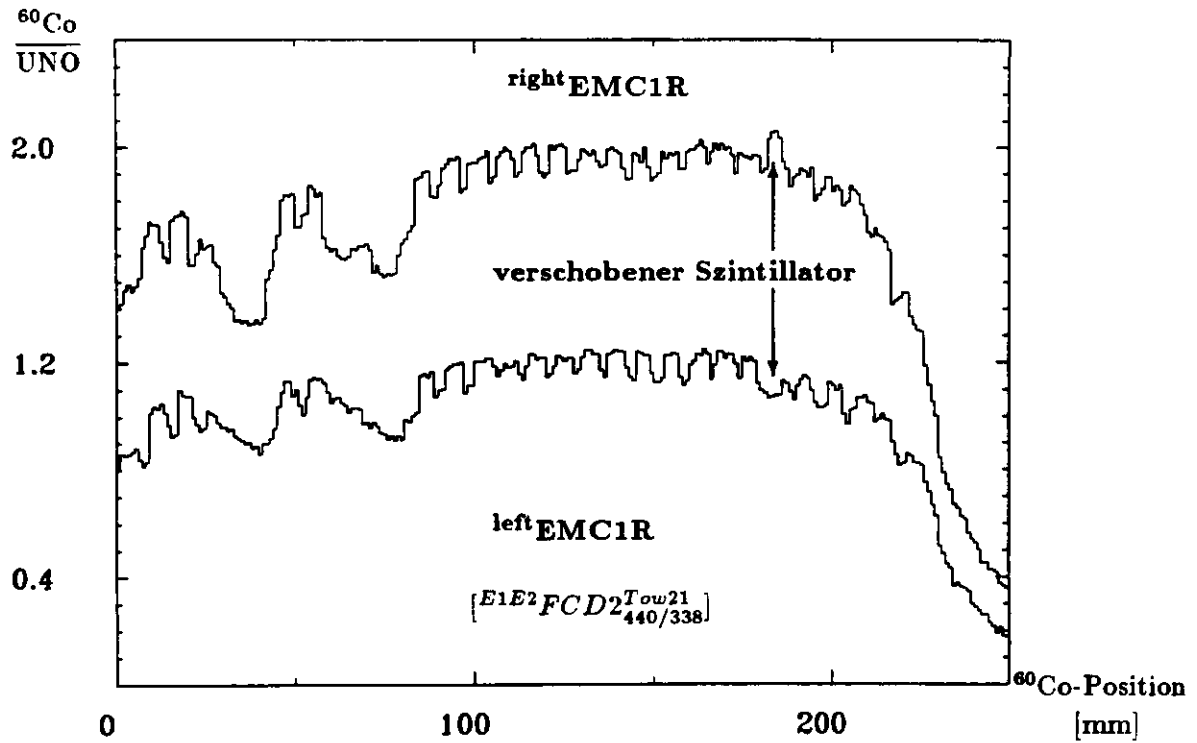


Abbildung 5.4: Einfluß eines einzelnen verschobenen Szintillators in einer FEMC-Sektion.

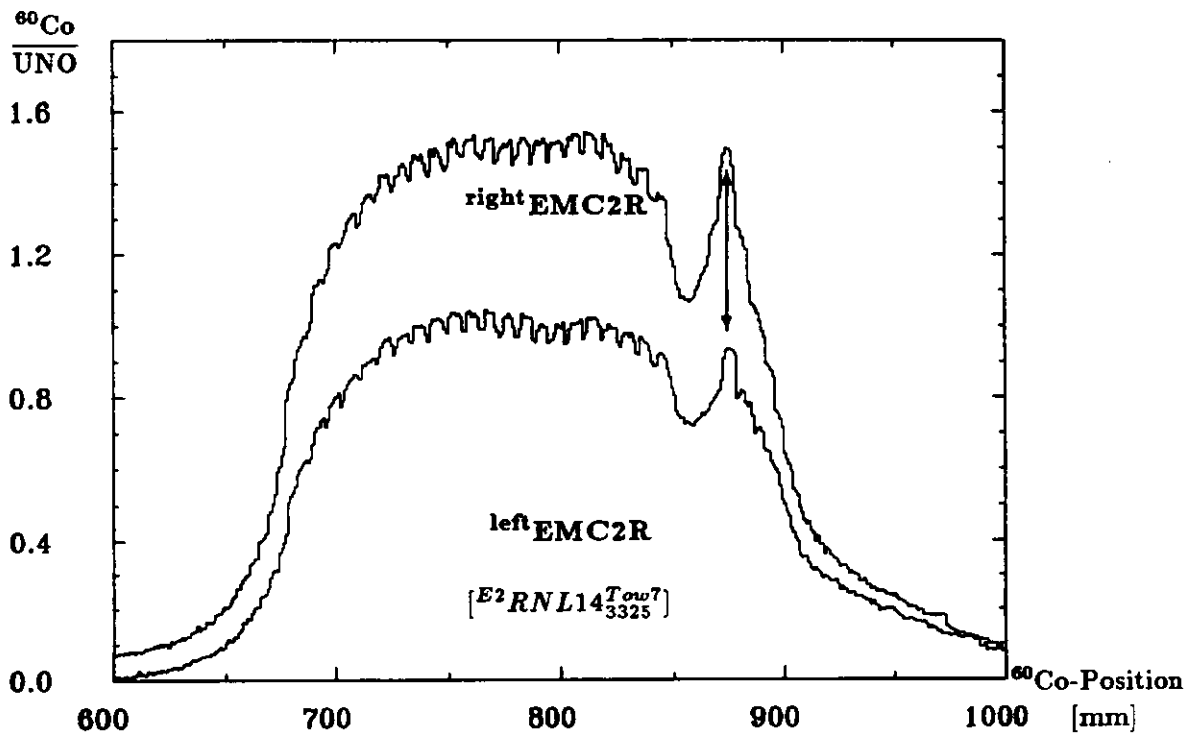


Abbildung 5.5: Antwortfunktion bei optischem Kontakt eines Szintillators mit dem Wellenlängenschieber.

Der Faden verursachte aufgrund der Andruckkraft der Spannbänder eine Einkerbung in den dritten Szintillator. Zuzüglich wurde er noch flach gedrückt, so daß ein optischer Kontakt von Wellenlängenschieber zu Szintillator entstand. Befindet sich das ^{60}Co -Präparat an der Position des Szintillators drei, erhält man ein höheres Signal, da der ansonsten reflektierte Anteil an Licht nun in den Wellenlängenschieber gelangt, hinzu kommen noch die erwähnten Effekte des vorigen Abschnitts. Für die vorausgehenden Szintillatoren der Position zwei und eins sieht die Situation gegensätzlich aus: Licht wird dadurch verlorengehen, daß ein Teil des Lichts aus dem ersten und zweiten Szintillator durch den optischen Kontakt in den dritten Szintillator eingespeist wird und somit nicht den Photomultiplier erreicht.

Im allgemeinen führten die Stapelfehler anderer Module nicht zu solchen Beeinträchtigungen. Dieser Fehler ließ sich in der verbliebenden Zeit nicht mehr beheben. Von einem Einfluß auf die Ergebnisse im Betrieb ist auszugehen.

Um eine Größenordnung, wie oft Stapelfehler aufgetreten sind, angeben zu können, wurde das folgende Verhältnis berechnet: Vom Maximalwert der Abweichung wurde der Mittelwert der Antwortfunktion subtrahiert und anschließend durch den Mittelwert dividiert. War dieser Wert größer als 7% wurde es als Inhomogenität bewertet. In der Tabelle 5.2 wurden alle ermittelten Stapelfehler zusammengefaßt, wobei sich die Zahlen jeweils auf die Gesamtzahl der Sektionen beziehen.

	Sektionstyp		
	EMC/HACØ	HAC1	HAC2
FCAL	3.0%	8.0%	6.5%
RCAL	1.4%	5.8%	—

Tabelle 5.2: Die Häufigkeit von Stapelfehlern, die zu einer Inhomogenität von mehr als 7% führten.

5.1.2 Störungen am HES-Schacht

Bei den ersten Modulen, die am CERN gemessen wurden, zeigten sich besondere Probleme an den HES-Schächten. Die Szintillatoren vor den HES-Schächten werden nicht wie die übrigen von beiden Seiten durch eine Uranplatte umgeben, da vor den HES-Detektoren keine Uranplatte vorgesehen ist. Um die Szintillatoren vor einem Hineinfallen in den zu jener Zeit noch unbelegten Schächten zu bewahren, wurde eine dünne Stahlplatte direkt hinter die Szintillatoren gesetzt. Zur Fixierung dieser Platte wurden kleine Plättchen an die Abstandshalter geklebt. Teilweise lösten sich einige der Verklebungen, wodurch das Hereinfallen einiger Szintillatoren ermöglicht wurde. Dies hätte in jedem Fall das Einbringen der HES-Skis verhindert. Durch ^{60}Co -Messungen konnte die ungefähre Position des betroffenen Szintillators ermittelt werden. Insgesamt tauchte dieser Fehler nur bei zwei Modulen der ersten Produktion auf (FCD1 und FCD2) und wurde durch solidere Verklebungen beseitigt. Programmtechnisch kann dieser Fehler durch eine Prüfung der Abstände der Maxima zueinander erfaßt werden, was sich der Abbildung 5.6 entnehmen läßt.

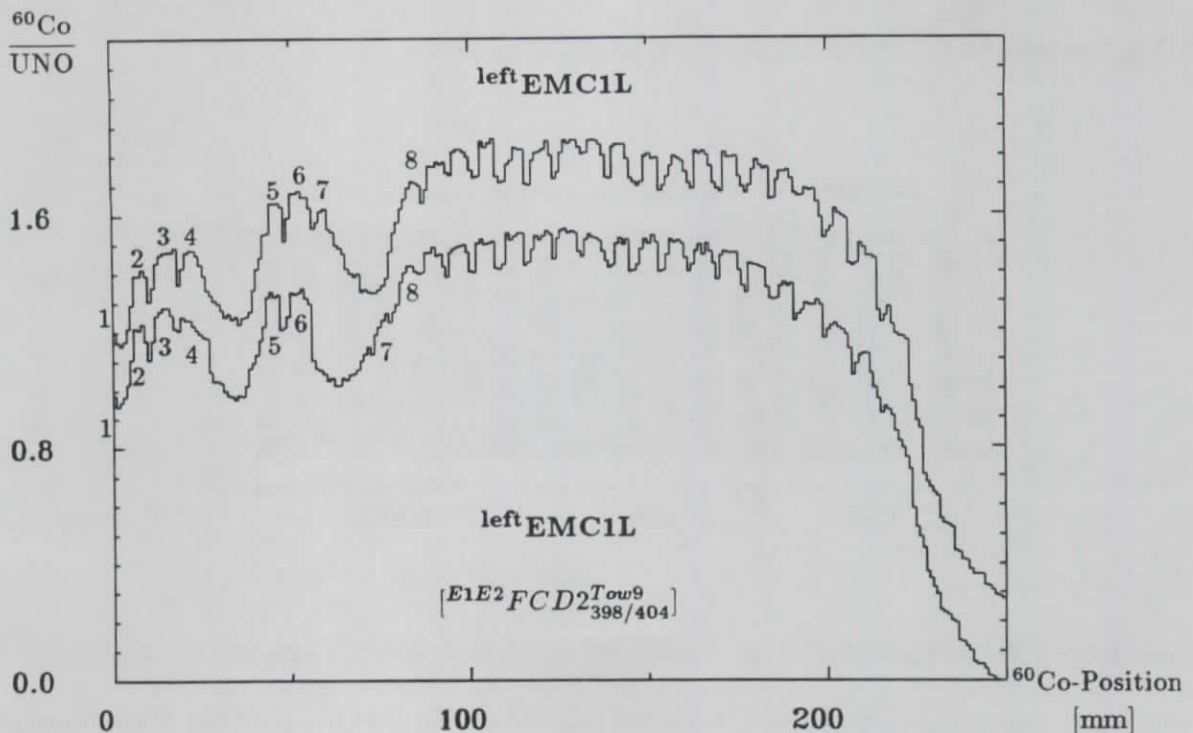


Abbildung 5.6: Auswirkungen eines in den HES-Schacht gefallenen Szintillators (NR. 7 in der unteren Kurve). Zum Vergleich zeigt die obere Kurve eine ungestörte Antwortfunktion. Beide Antworten sind mit dem Innenabtaster bestimmt worden.

5.2 Falsch positionierte Wellenlängenschieber

Eine weitere Klasse von Unregelmäßigkeiten wird unter falsch positionierte Wellenlängenschieber zusammengefaßt. Hierunter werden alle Fehler verstanden, die entweder mit der fehlerhaften Positionierung der gesamten Kassette oder aber mit einzelnen Komponenten der Kassette zusammenhängen. Die Kassette dient zur Aufnahme aller Wellenlängenschieber einer Turmseite, um diese dann als gesamte Einheit an die Auslesekannten der Szintillatoren zu bringen. Für einen FEMC-Turm besteht diese Einheit aus vier unabhängigen Wellenlängenschiebern für die EMC-Sektionen und zwei Wellenlängenschiebern für die beiden hadronischen Sektionen. Der Lichttransport unterscheidet sich im aktiven und inaktiven Bereich des Wellenlängenschiebers. Während im aktiven Bereich das blaue Szintillatorlicht vom Wellenlängenschieber absorbiert und isotrop im grünen Wellenlängenbereich wieder reemittiert wird und dann durch Totalreflexion weiter transportiert wird, erfolgt der Lichttransport im inaktiven Bereich nur durch Totalreflexion. Der Wellenlängenschieber wirkt in diesem Bereich nur als Lichtleiter. Um möglichst viel Szintillationslicht, welches den Wellenlängenschieber bereits verlassen hat, wieder zurückzereflektieren, ist der Wellenlängenschieber im aktiven Bereich mit einem Rückwand-, Seiten- und Endreflektor ausgestattet (vergleiche Abbildung 2.1). Der inaktive Bereich des Wellenlängenschieber ist mit schwarzen Tedlar umwickelt.

5.2.1 Verschobene Wellenlängenschieber-Kassetten

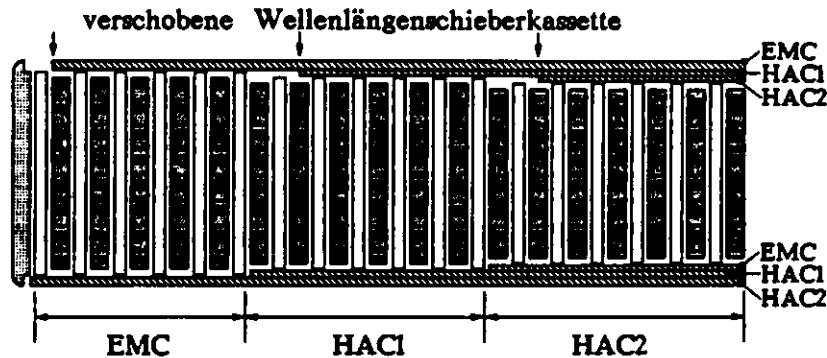


Abbildung 5.7: Schematische Darstellung einer falsch montierten Wellenlängenschieberkassette.

Ist die Wellenlängenschieberkassette einwandfrei montiert, überdeckt der jeweilige Wellenlängenschieber alle Szintillatoren einer Sektion. Im allgemeinen wurden die Wellenlängenschieberkassetten mit großer Sorgfalt hergestellt, was durch die ^{60}Co -Methode bestätigt wurde, im besonderen ist es dennoch bei einige Kassetten vorgekommen, daß die Wellenlängenschieber in der Metallkassette nicht an der richtigen Position eingelegt wurden. Bei der Montage an einem Turm läßt sich das nicht mehr erkennen, mit der Konsequenz, daß, je nach Richtung der Verschiebung, die ersten oder die letzten Szintillatoren einer Sektion nicht mehr von dem entsprechenden Wellenlängenschieber überdeckt werden.

Die Abbildung 5.7 zeigt schematisch einen gravierenden Fall einer verschobenen Wellenlängenschieberkassette. Dabei wurde in diesem Beispiel die obere Kassette so angebracht, daß in jeder Sektion der erste Szintillator nicht von dem Wellenlängenschieber ausgelesen wird. Ferner besteht auch die Möglichkeit, daß von der fehlerhaften Montage nur die HAC-Wellenlängenschieber betroffen sind, da der EMC-Wellenlängenschieber weiter als die HAC-Wellenlängenschieber über ihre Sektion hinausragen.

Häufiger, als bei dem hier gezeigten Beispiel in Abbildung 5.8, waren in der Regel geringere Verschiebungen zu registrieren.

Auswerteprogramme übernahmen sowohl das aufwendige Zählen der einzelnen Szintillatoren als auch die Bestimmung der mittleren Breite einer Sektion. Beides diente als Kriterium für den Nachweis einer verschobenen Wellenlängenschieberkassette, wobei letzteres auch die Größenordnung der Verschiebung lieferte. Bei der Entscheidung, eine Korrektur vorzunehmen, spielt der Grad der Verschiebung eine wesentliche Rolle, da der große Zeitaufwand nur für betroffene EMC-Sektionen aufgebracht werden konnte, die für den Nachweis niederenergetischer elektromagnetischer Teilchen von Wichtigkeit sind. Bei 12 von 1832 Kassetten (0.7%) mußte eine Neupositionierung vorgenommen werden, bei weiteren 55 (3%) waren nur die hadronischen Wellenlängenschieber betroffen. Auf ihre Neupositionierung wurde verzichtet, weil stets nur ein Szintillator betroffen war - 1/80 der Sektion für eine Photomultiplierantwort und 1/160 bei Addition beider Photomultiplierantworten.

Beim Prototypen des ZEUS-Kalorimeters wurde eine weitere Variante einer verschobenen Wellenlängenschieberkassette beobachtet, die bei den FCAL- und RCAL-Modulen nicht entdeckt wurde.

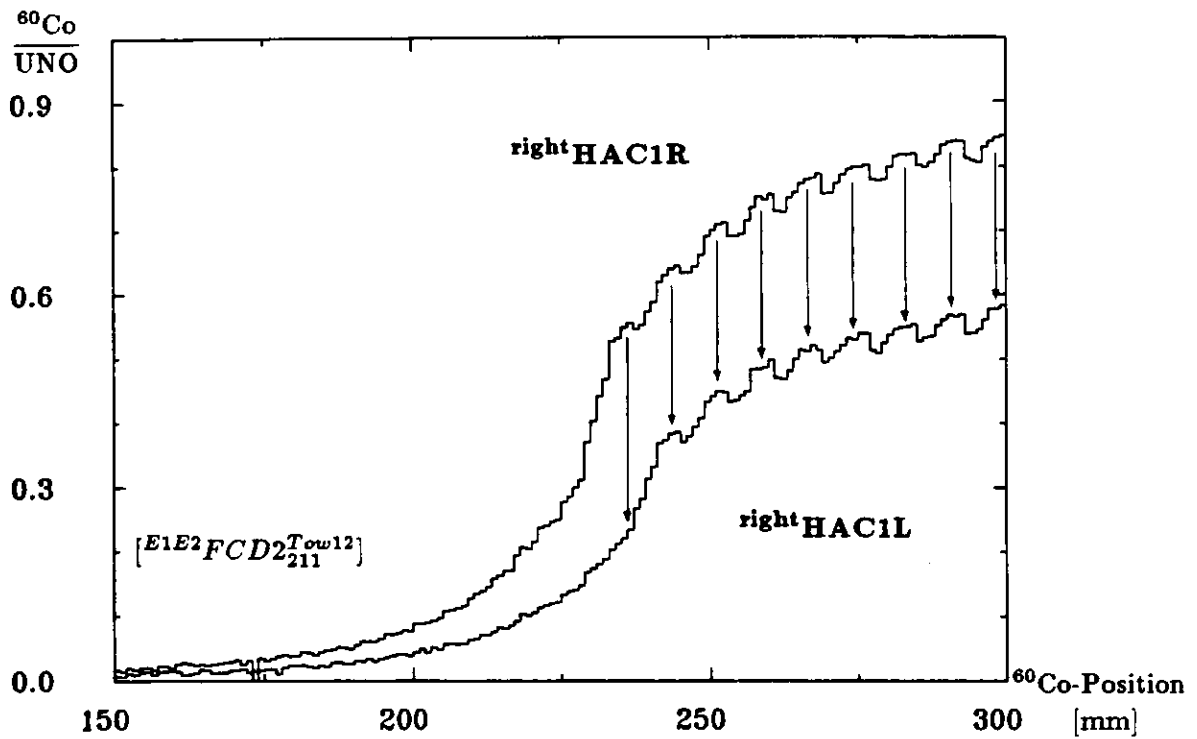


Abbildung 5.8: Beispiel einer verschobenen Wellenlängenschieberkassette. In der unteren Abbildung ist kein Maximum für den ersten Szintillator vorhanden, so daß davon auszugehen ist, daß die Wellenlängenschieberkassette der linken Turmseite, um eine Szintillatorposition verschoben, montiert wurde.

Hierbei handelte es sich um die Situation, daß die EMC-Wellenlängenschieber einwandfrei montiert waren, so daß beim ersten Szintillator keine Störung auftrat. Die HAC-Wellenlängenschieber überdeckten aber den jeweils letzten Szintillator der vorangehenden Sektion, so daß die EMC-Sektion nur 25 Szintillatoren und die HAC1-Sektion nur 79 Szintillatoren aufwies [RIM 90].

5.3 Störungen der Lichtauslese

Hierunter werden alle Inhomogenitäten verstanden, die durch eine Beeinflussung des Lichtweges verursacht wurden, wobei an dieser Stelle nur Fälle dargestellt werden, die eindeutig verifiziert werden konnten. Ein drastisches Beispiel eines teilweise verstellten Lichtweges zwischen Szintillator und Wellenlängenschieber zeigt die Abbildung 5.9. Diese Art von Störung ist unabhängig von der Bestrahlungsseite des Turmes. Bei dem gezeigten Beispiel handelt es sich um den dreimal aufgetretenen Fall einer teilweisen Verdeckung von etwa 10 Szintillatoren, die durch eine zwischen Wellenlängenschieber und Szintillator liegende durchsichtige Plastikfolie verursacht wurde. Die Folien wurden für den Transport der Wellenlängenschieber eingesetzt und haben eine Größe von $8 \times 20 \text{ cm}^2$. Da diese Folie durchaus noch Licht hindurchläßt, kommt es nur zu einer Lichtausbeutereduzierung von etwa 14%. Die Überhöhung des Signals der anderen Ausleseseite läßt auf eine Reflexion eines Lichtanteils schließen. Den weitaus häufigeren Fall einer Beeinträchtigung zeigt die Abbildung 5.10. Zur Vermeidung von Randeffekten und Fixierung des Einwickelpapiers der Szintillatoren wurde ein etwa 12mm breiter schwarzer Tedlarstreifen nahe der Ausleseseiten gespannt. Es konnte passieren, daß dieser Streifen zu weit über die Ausleseseite des Szintillators gerutscht ist. Beim Anbringen des Wellenlängenschieber wurde dieser Streifen häufig so umgeknickt, daß ein Teil der Auslekante verdeckt und somit die Lichtausbeute reduziert wurde. Bei dem gezeigten Beispiel wurden nicht mehr als 4% der Ausleseseite verdeckt, was zu einer Lichtreduzierung von etwa 10% führt. An diesem Beispiel wird deutlich, daß die ^{60}Co -Methode solche Störungen überbetont, denn nur für den Fall, daß das Präparat nahe dieser Störung das Licht produziert, entsteht eine zehnpromtente Störung. Wird das Licht auf der anderen Turmseite erzeugt, kommt es zu fast gar keiner Beeinflussung, denn die Auslekante wird durch das auf der anderen Seite erzeugte Licht vollständig ausgeleuchtet, so daß die Störung nicht größer als die 4% sein kann. Da diese Fehler im Experiment nur einen sehr geringen Einfluß auf die Ergebnisse haben werden, wurde diese Störung nur im Zuge der Beseitigung anderer Unregelmäßigkeiten behoben.

5.3.1 Störungen am Rückwandreflektor

Wurde das Licht der Szintillatoren von dem Wellenlängenschieber absorbiert und dann mit einer längeren Wellenlänge wieder reemittiert, erfolgt der Lichttransport durch Totalreflexion. Die Bedingung für Totalreflexion ist aber nur gegeben, wenn der Wellenlängenschieber von Luft umgeben ist ($n_{WLS} \approx 1.5$ und $n_{Luft} \approx 1.0$). Der Lichttransport wird gestört, wenn der Rückwandreflektor fest auf dem Wellenlängenschieber haftet, weil das Papier (Mylar) einen ähnlichen Brechungsindex wie der Wellenlängenschieber hat. Die dann für den Weitertransport des Lichts wichtige Totalreflexion findet an diesen Stellen nicht mehr statt und es kommt zu einer Reduzierung der Lichtausbeute, wie Abbildung 5.11 belegt. Diese Fehlerursache ließ sich nur durch ein optischen Vermessen des Wellenlängenschieber eindeutig erkennen. Die eigentliche Ursache für das Anhaften ließ sich nicht bestimmen, jedoch läßt sich eine Erklärung über elektrostatische Aufladung ausschließen, da sich dieser Effekt in dieser Deutlichkeit nur in diesem einen Beispiel zeigte.

Möglicherweise sind aber einige der weiteren aufgefundenen Inhomogenitäten auf das Anhaften des Rückwandreflektors an dem Wellenlängenschieber zurückzuführen. Da es sich aber bei diesen Fällen immer nur um kleinere Störungen handelte, wurde auf die aufwendige optische Vermessung verzichtet.

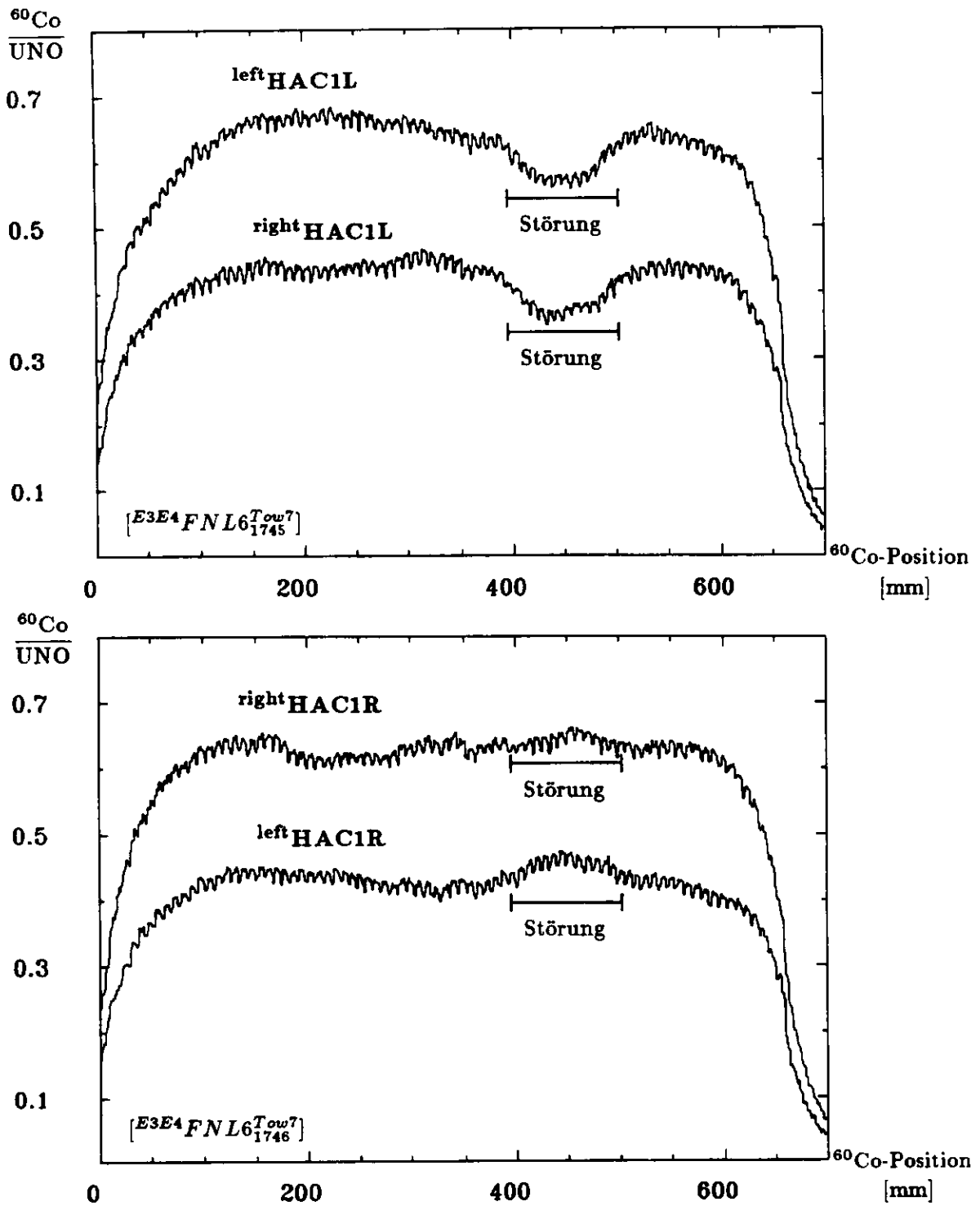


Abbildung 5.9: Die vier Antwortfunktionen einer HAC-Sektion mit Störung des Lichtweges.

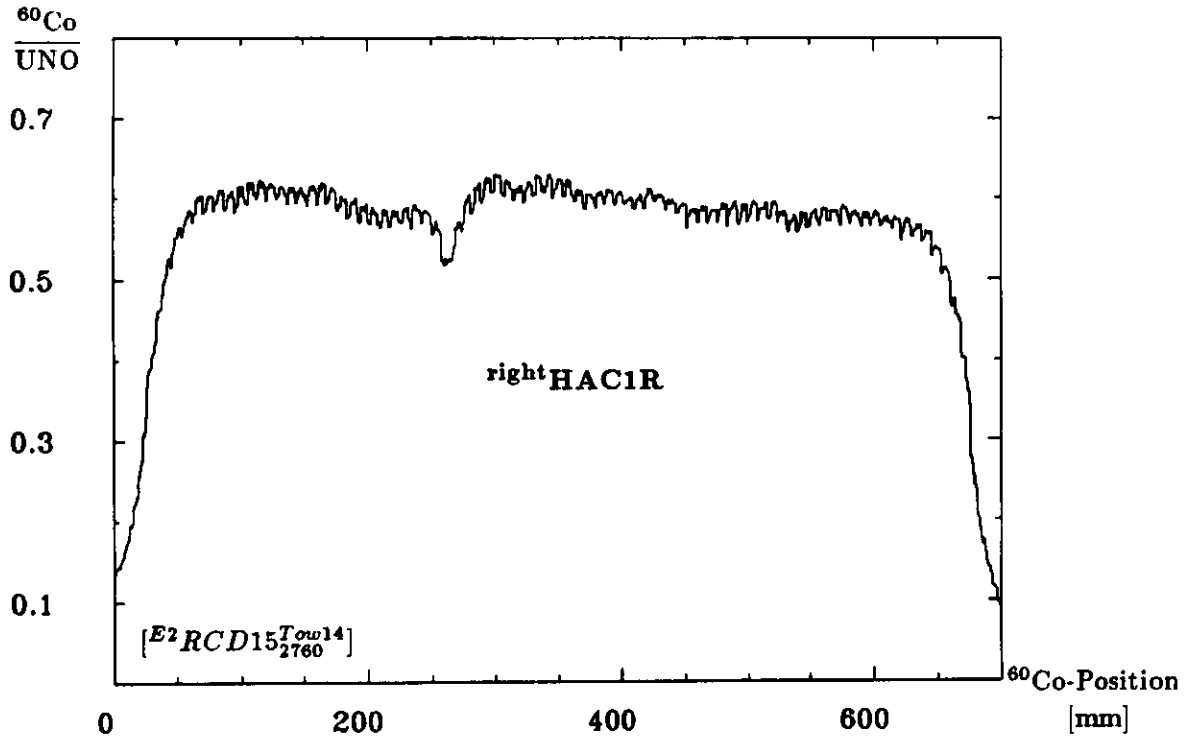


Abbildung 5.10: Ein einzelner verdeckter Szintillator. Diese Störung wurde nur in 0.7% aller Sektionen gefunden.

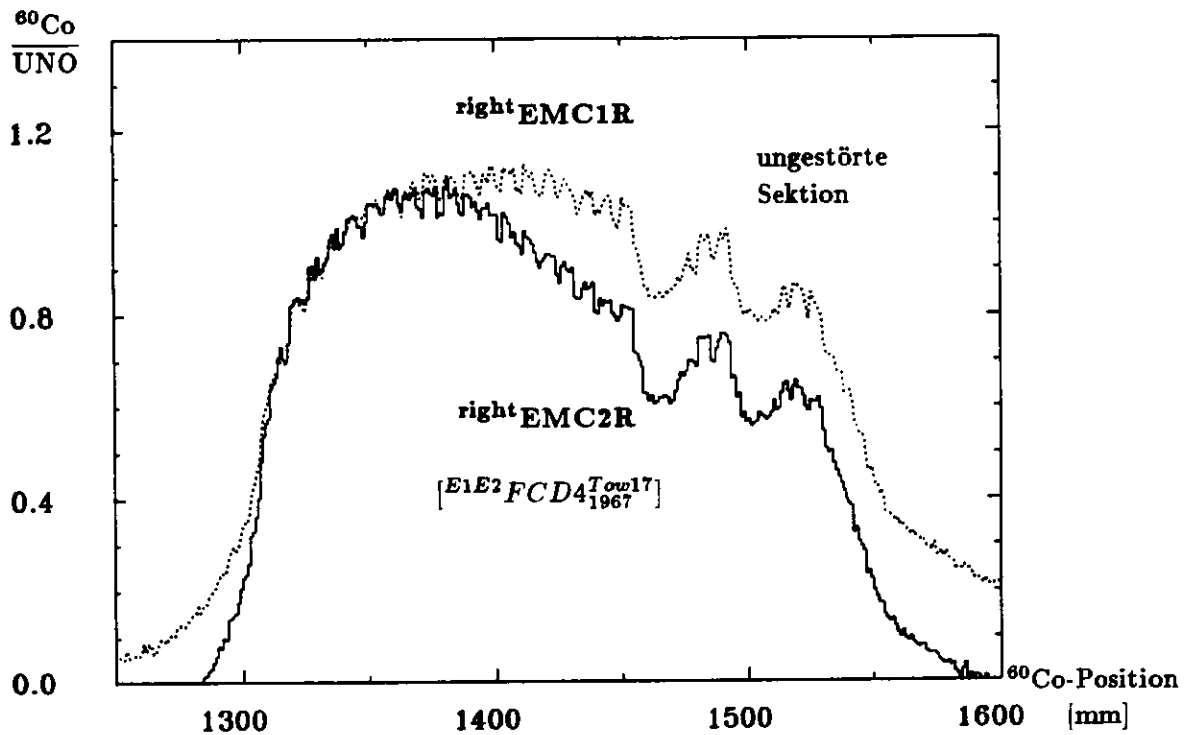


Abbildung 5.11: Haftender Rückwandreflektor, der eine starke Reduktion der Lichtausbeute zur Folge hat. Zum Vergleich wurde eine ungestörte Antwortfunktion mitdargestellt.

5.4 Inhomogenitäten ungeklärter Ursache

Die Messungen an den FCAL- und RCAL-Modulen ergaben auch eine Vielzahl schwer oder gar nicht interpretierbarer Antwortfunktionen. Oft erschien der Grad der Inhomogenität und der Quervergleich der vier Antwortfunktionen auf eine mechanische Ursache hinzudeuten, die bei der näheren Untersuchung der betreffenden Sektion aber keine Bestätigung fand. Die Abbildung 5.12 zeigt ein Beispiel solcher Inhomogenitäten. Eine Überprüfung der Wellenlängenschieberkassette ergab keinen weiteren Aufschluß über die Störungsursache. Aufgrund der gleichbleibenden Auflösung der Signale, ist gesichert, daß der Abstand Eichpräparat/Szintillatoren stets gleich blieb, so daß ein methodischer Fehler dieser Art diese Photomultiplierantwort nicht verursacht haben kann.

Ein weiteres Beispiel zeigt die Abbildung 5.13. Hier bildeten sich zwei voneinander deutlich abgrenzbare Plateaus aus, die sich durch die vier Antwortfunktionen nicht deuten lassen.

Betrachtet man die mittlere Signalthöhe der Photomultiplierantwort über die mittleren Szintillatoren, erhält man durch die UNO-Kalibration stets denselben Wert.

Wird in den ersten 20 Szintillatoren ein größeres Signal, z.B. durch dickere Szintillatoren erzeugt, erhielte man die gleiche Photomultiplierantwort wie für den Fall, daß die letzten 60 Szintillatoren dünner als der Durchschnitt sind. Es läßt sich also nicht entscheiden, ob in der Abbildung 5.13 das Plateau 1 eine Überhöhung und das Plateau 2 ein dem Durchschnitt entsprechendes Signal ist, oder aber das Plateau 1 dem Normalfall entspricht und das Plateau 2 durch dünnere Szintillatoren erzeugt wurde. Da die Dickevariation der Szintillatoren zunächst sehr plausibel diese Photomultiplierantwort erklärt, soll dieser Punkt etwas näher beleuchtet werden.

Monte-Carlo-Simulationen haben ergeben, daß die Menge an deponierter Energie bei dünnen Lagen linear mit dem Dickenzuwachs ansteigt. Um einen 20 prozentigen Anstieg im Signal, das entspricht der größten gefundenen Abweichung, eines einzelnen Szintillators über eine Dickenzunahme zu erklären, müßte der betreffende Szintillator ebenfalls 20 % dicker sein. Sind hiervon 20 Szintillatoren betroffen, müßte der gesamte Turm um ungefähr 10 mm höher werden als geplant wurde. Zuwächse dieser Größenordnung wären bei der sektionsweisen Sortierung der Szintillatoren, die zum Heraussuchen von zu dünnen oder zu dicken Exemplaren durchgeführt wurde, aufgefallen.

Von Inhomogenitäten dieser Art, und solchen, die zu keiner der beschriebenen Fehlerquellen gehören, mit einer Abweichung von der Uniformität von mehr als 7%, waren im FCAL ca. 20% der HAC1-Sektionen und 25% der HAC2-Sektionen betroffen, im RCAL waren es in etwa 50% der HAC1- und 10% der EMC/HACØ -Sektionen.

Eine Reihe unterschiedlicher Untersuchungen führte zu keinem schlüssigem Ergebnis. In vielen Fällen wird es sich um die Überlagerung mehrerer Effekte handeln. Zur detaillierten Untersuchung dieser Frage werden an einem Blei/Szintillator-Kalorimeter gezielte Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse möglicherweise einige der unverständlichen Inhomogenitäten erklären werden.

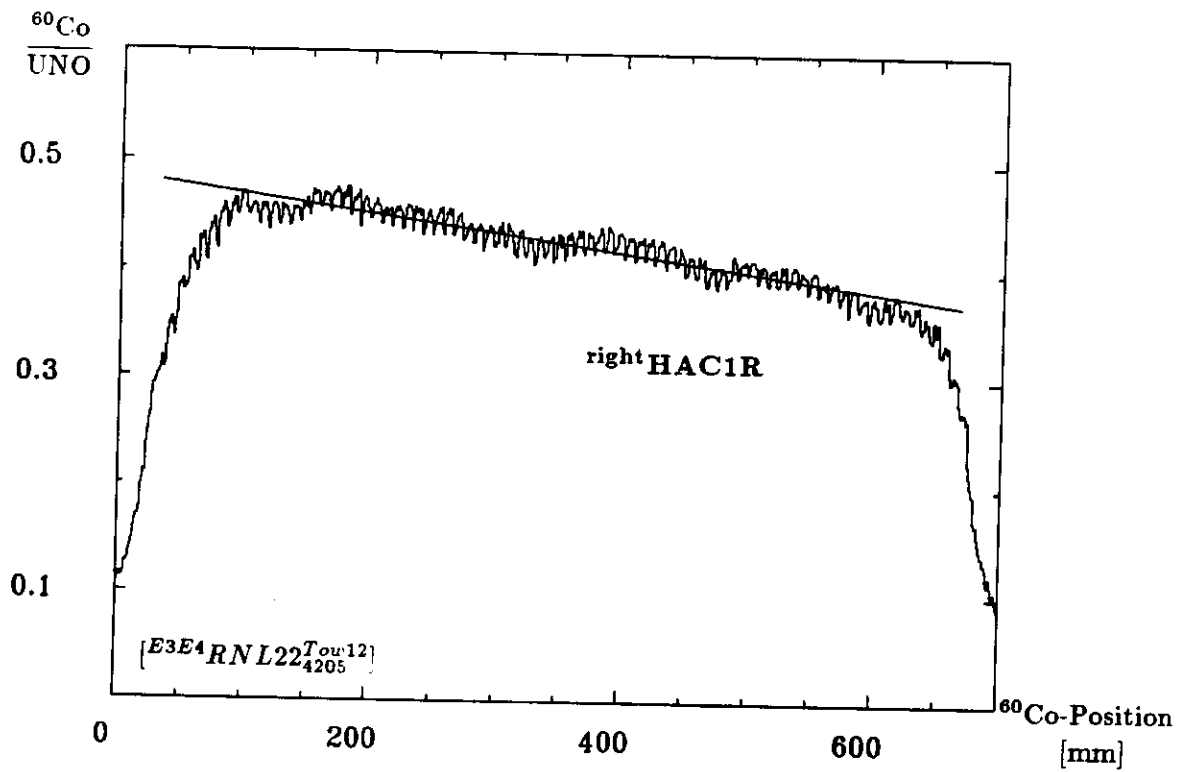


Abbildung 5.12: Beispiel einer Inhomogenität unbekannter Ursache.

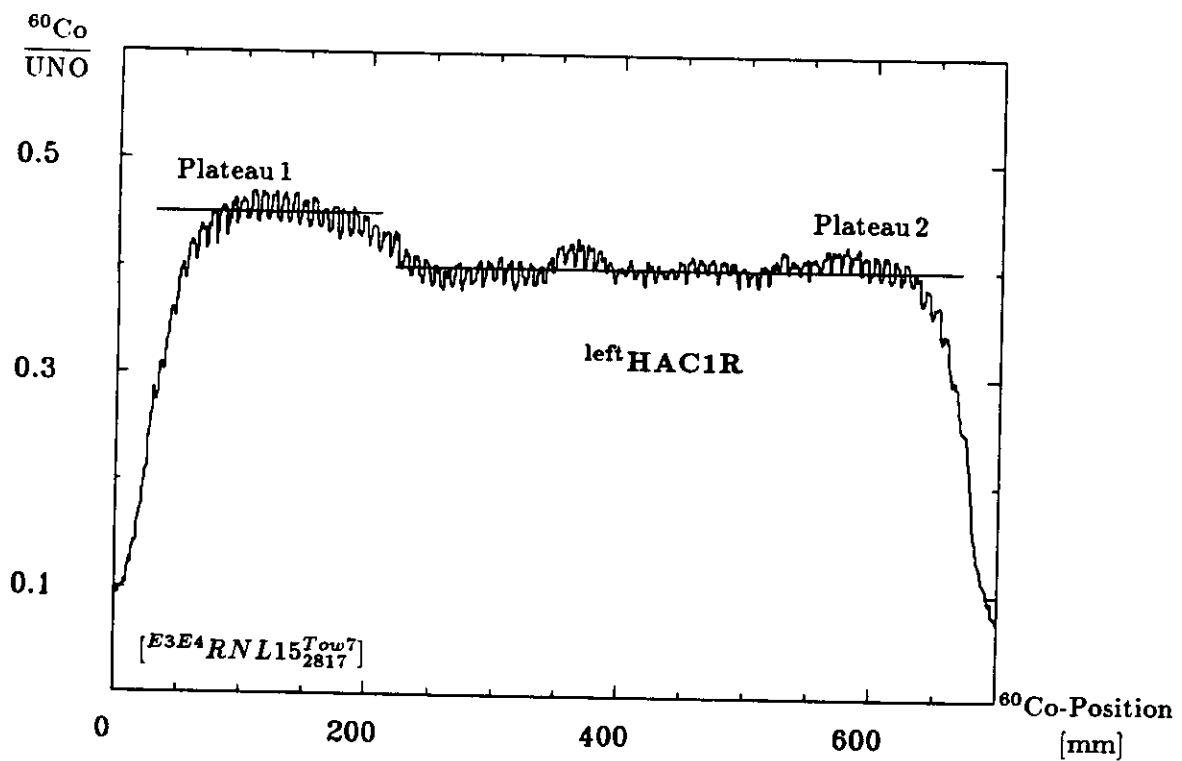


Abbildung 5.13: Beispiel einer Inhomogenität unbekannter Ursache.

Kapitel 6

Abschwächlänge der Wellenlängenschieber

Bei den Untersuchungen von Strahlenschäden an den Materialien der Szintillatoren und der Wellenlängenschieber zeigte sich, daß sich beide Materialien bezüglich der Regenerierung eines entstandenen Strahlenschadens unterschiedlich verhalten [NEU 91, DAN 92]. Darum ist es wünschenswert, bei der Untersuchung von Strahlen- und Alterungsschäden, die Szintillatoren und Wellenlängenschieber getrennt zu untersuchen.

Wie auch bei den Szintillatoren wird bei den Wellenlängenschiebern die Änderung der Abschwächlänge zur Bestimmung eines Schadens herangezogen. Dabei wird für die Wellenlängenschieber ausgenutzt, daß die Comptonelektronen der γ -Quanten des ^{60}Co -Präparates im Wellenlängenschieber Čerenkovlicht erzeugen. Es weist folgende Eigenschaften auf:

- ▷ Die größte Intensität liegt im blau-violetten Spektralbereich.
- ▷ Die Abklingzeit ist mit 10^{-11} s kürzer als die der Lumineszenz.
- ▷ Es ist stark linear polarisiert und wird vorwiegend in Bewegungsrichtung der geladenen Teilchen abgestrahlt.
- ▷ Die Intensität ist proportional zur vom Elektron zurückgelegten Wegstrecke.

Bei einem Brechungsindex von $n \approx 1.5$ für PMMA ist eine Geschwindigkeit von $\frac{2}{3} c$ Voraussetzung, um Čerenkovlicht zu erzeugen. Die Comptonelektronen des ^{60}Co -Präparates haben eine maximale Geschwindigkeit von $0.95 c$ und erfüllen somit die Voraussetzung. Als maximalen Winkel für die Abstrahlung erhält man $\theta = 45^\circ$ [ZRE 70]. Die Comptonelektronen weisen ähnlich wie das von ihnen erzeugte Čerenkovlicht die Eigenschaft auf, daß sie sich hauptsächlich in Bewegungsrichtung der primären Teilchen ausbreiten. Inwieweit Strahlenschäden mit der ^{60}Co -Methode nachweisbar sein werden, soll in diesem Kapitel beschrieben werden.

6.1 Bestimmung der Abschwächlängen λ_W an ausgebauten Wellenlängenschiebern

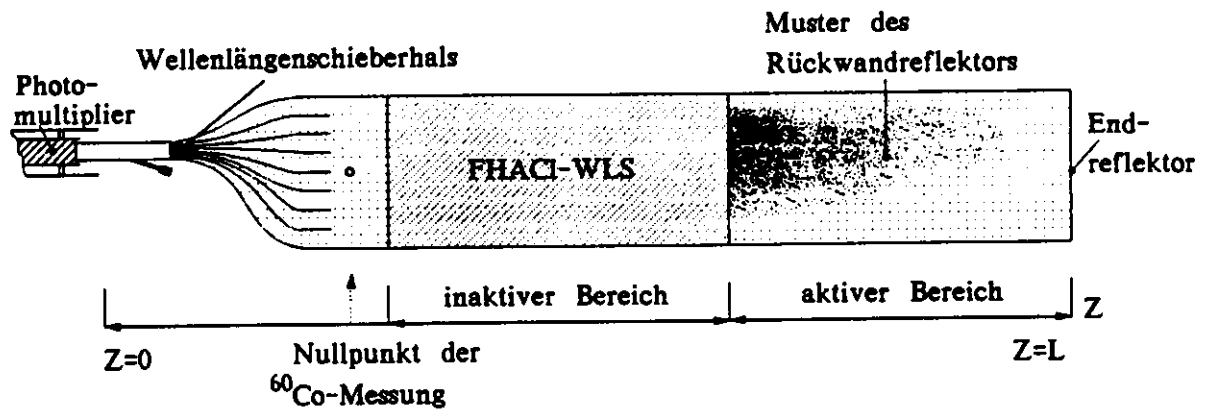


Abbildung 6.1: Geometrie eines FHAC1-Wellenlängenschiebers mit Darstellung des Rückwandreflektors im aktiven Bereich und des Tyvek-Papiers beziehungsweise der Aluminiumfolie im inaktiven Bereich.

Die Abbildung 6.1 zeigt die Geometrie eines FHAC1-Wellenlängenschiebers. Obwohl er homogen aufgebaut ist, läßt er sich in zwei Bereiche einteilen: In den inaktiven Bereich, wo der Wellenlängenschieber rundherum mit schwarzer Tedlarfolie und am Wellenlängenschieberhals mit Aluminiumpapier umwickelt ist und in den aktiven Bereich, wo sich die Reflektoren¹ befinden und das Szintillatorlicht ausgelesen wird. Blaues Licht, aus den Szintillatoren kommend, wird in dem Wellenlängenschieber absorbiert und als grünes Licht reemittiert und schließlich von einem Photomultiplier ausgelesen. Auf diese Weise ist eine platzsparende Auslese des Szintillatorlichts einer gesamten Sektion möglich. Ein Teil des Lichts durchquert den 2 mm dicken Wellenlängenschieber und verläßt ihn auf seiner Rückseite. Der Rückwandreflektor spiegelt das Licht zurück, so daß erneut die Möglichkeit der Absorption im Wellenlängenschieber besteht. Durch ein aufgedrucktes schwarzes Muster auf dem Rückwandreflektor läßt sich die Menge des zurückreflektierten Lichts beeinflussen. Um den zunächst einmal für alle Wellenlängenschieber gleichen Rückwandreflektor auf den einzelnen Wellenlängenschieber einzustellen, wurde jeder Wellenlängenschieber auf einem eigens entwickelten Meßtisch auf sein Ansprechverhalten als Funktion des Ortes untersucht. Dabei ließen sich Abweichungen von einer homogenen Antwortfunktion z.B. durch Lichtabschwächung auf unterschiedlich langen Wegen zum Photomultiplier, aber auch durch Dickschwankungen oder unterschiedliche mechanische Fertigung, durch eine Korrektur an dem Rückwandreflektor ausbessern.

Diese Messungen wurden für einige Wellenlängenschieber wiederholt, bei denen durch die ^{60}Co -Messungen eine Inhomogenität gefunden wurde, die auf eine Störung des Reflektors schließen ließ. Dabei zeigte sich, daß die mit der ^{60}Co -Methode gefundenen Inhomogenitäten bestätigt wurden.

Mit dem gleichen Aufbau konnte statt mit Szintillatorlicht direkt eine Anregung mit einem ^{60}Co -Präparat entlang der Z-Achse erfolgen. Auf diese Weise ließen sich genaue Messungen zur Abschwächlänge λ_W an ausgebauten Wellenlängenschiebern erstellen. Ferner konnte der Einfluß des Reflektormaterials auf das Čerenkovlicht bestimmt werden, wie die Abbildung 6.2 und die Abbildung 6.3 zeigen.

¹Insgesamt ist ein Wellenlängenschieber mit einem Rückwand-, zwei Seiten- und einem Endreflektor ausgestattet.

Während die erste Messung an einem unveränderten Wellenlängenschieber erfolgte, wurde bei der zweiten Messung das gesamte Reflektormaterial gegen schwarze Tedlarfolie ausgetauscht. Es fand also keine Beeinflussung durch das Muster eines Rückwandreflektors statt. Aus den dargestellten Messungen läßt sich der Schluß ziehen, daß der Einfluß des Rückwandreflektors auf das Čerenkovlicht für diese Meßmethode etwa 6% ausmacht. Außerdem zeigen die Ergebnisse der beiden Abschwächlängen von 1845 mm ($\pm 1.4\%$) und 1391 mm ($\pm 1.2\%$), beide für FEMC-Wellenlängenschieber, daß die Abschwächlängen für baugleiche Wellenlängenschieber unter verschiedenen Bedingungen, die durch die Montage der Reflektoren und Anbringung der Kassette entstehen, nicht direkt vergleichbar sind. So ist das zentrale Ergebnis dieser Messungen, daß Unterschiede der Abschwächlänge von mehreren hundert Millimetern nicht auf die Meßmethode, sondern auf die Individualität der Wellenlängenschieber zurückzuführen sind, die durch Dickschwankungen, unterschiedlich starke Dotierungen, unterschiedliche Reflektoren und unterschiedliche Anbringung in der Wellenlängenschieberkassette gegeben sind.

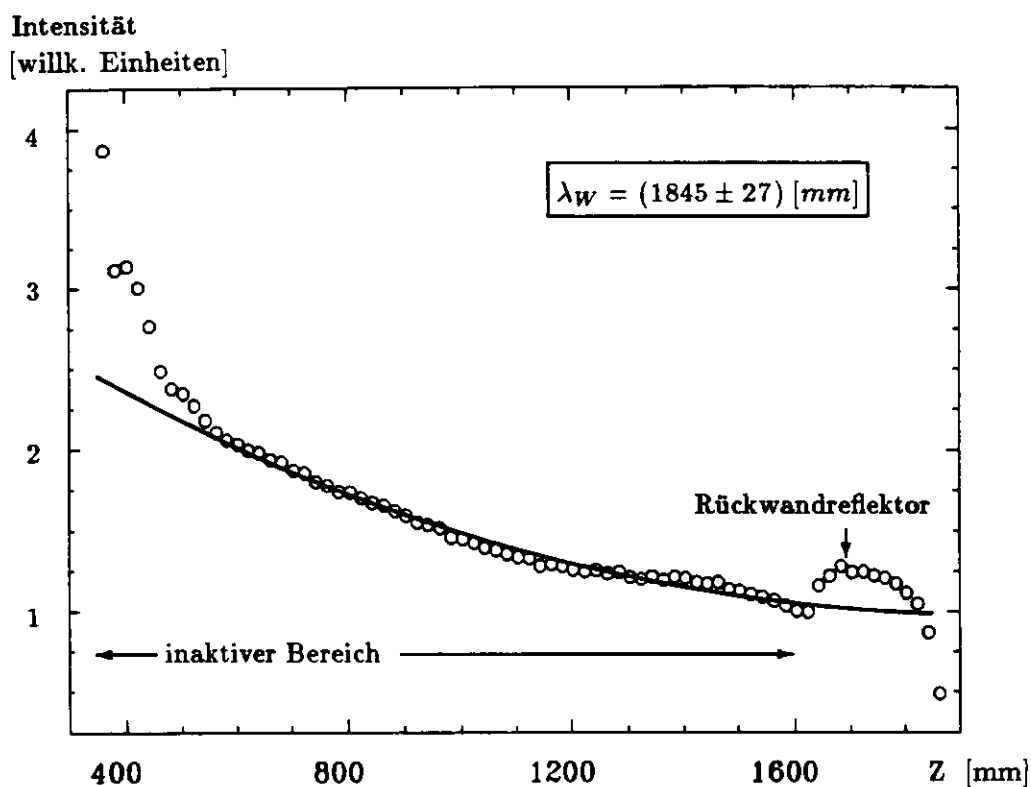


Abbildung 6.2: Bestimmung der Abschwächlänge λ_W für einen FEMC-Wellenlängenschieber mit Hilfe von Čerenkovlicht. Der Anpassungsbereich für die Gleichung (6.1) ist: 550 bis 1600 mm. Die Signalüberhöhung ab $Z = 1600$ von 6% ist die Ursache der Reflexion des Čerenkovlichts an dem Rückwandreflektor des aktives Bereichs des Wellenlängenschiebers.

Um die Auslekante des Wellenlängenschiebers auf die Photokathode des Photomultipliers zu überführen, wurde der Wellenlängenschieber im vorderen Bereich mehrfach eingeschlitzt und in eine kubische Form zusammengefaßt (Abbildung 6.1). Ob diese spezielle mechanische Form der Grund für die Überhöhung im Anfangsbereich der Abbildungen 6.2 und 6.3 ist, konnte bei Messungen mit entsprechenden Bleiabschirmungen ausgeschlossen werden. Dieser Punkt wird etwas später noch einmal aufgegriffen.

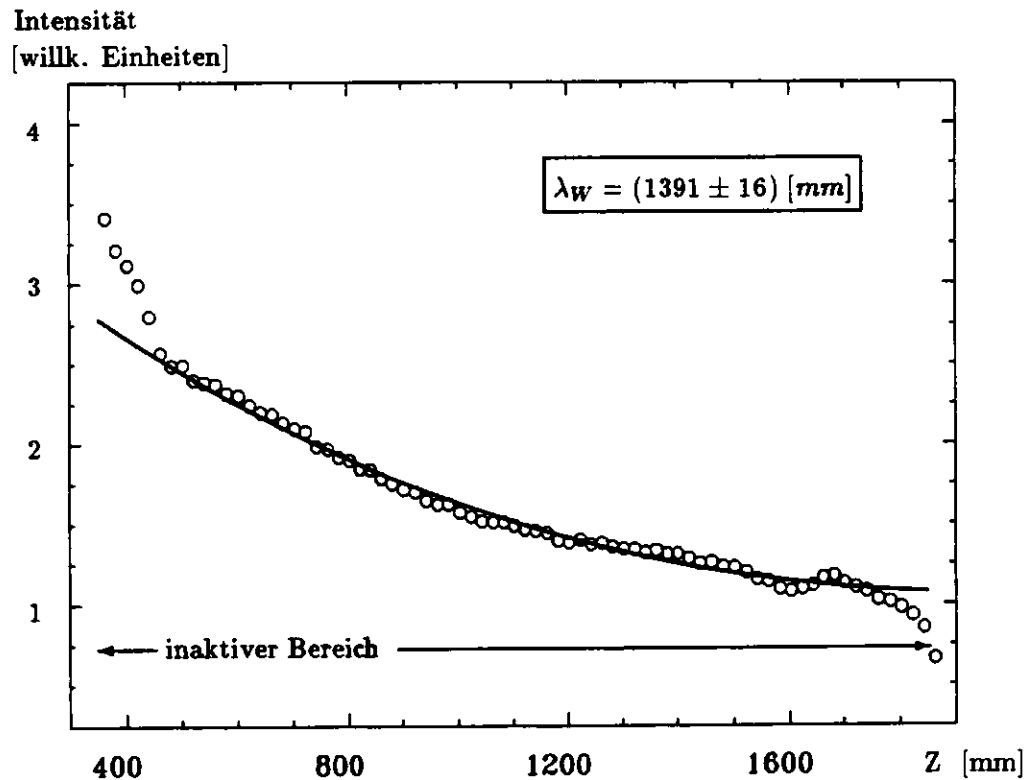


Abbildung 6.3: Bestimmung der Abschwächlänge λ_W für einen FEMC-Wellenlängenschiebers. Der Anpassungsbereich für die Gleichung (6.1) ist: 550 bis 1800 mm. Der Rückwandreflektor wurde durch eine schwarze Tedlar-Folie ersetzt, mit der die gesamte Oberfläche des aktiven Bereichs umwickelt wurde. Dadurch ist der gesamte Wellenlängenschieber mit dem gleichen Reflektormaterial umgeben.

6.2 Bestimmung der Abschwächlänge λ_W an Wellenlängenschiebern im Kalorimeter

Bevor auf die Abschwächlängen der Serienmessung eingegangen wird, soll ein zum vorherigen Absatz ähnliches Verfahren beschrieben werden, bei dem die Ausleseelektronik der ^{60}Co -Messungen so verändert wurde, daß das Signal des Čerenkovlichts ausreichend verstärkt wurde.

6.2.1 Spezielle Messungen zur Bestimmung der Abschwächlänge λ_W

Um genauere Kenntnisse über das Čerenkov-Signal zu erhalten, wurden während der Serienmessungen einige spezielle Untersuchungen durchgeführt. Dazu wurden einige Türme des Kalorimeters geöffnet, um die Auslesekanäle der Szintillatoren mit einer schwarzen Tedlar-Folie zu verdecken. Auf diese Weise erhielt man ein Signal wie in Abbildung 6.4 und Abbildung 6.5, das über die gesamte Länge des Wellenlängenschiebers fast ausschließlich durch Čerenkovlicht erzeugt wurde. Befindet sich das ^{60}Co -Präparat bei etwa $Z = 700$, fällt das Signal auf einen gleichbleibenden Wert ab, der durch die vom Uran emittierten Teilchen² erzeugt wird.

Mit Hilfe dieser Messungen ist es ebenfalls möglich, die Abschwächlänge λ_W aus einer Funktionsanpassung zu bestimmen. Die das Photomultipliersignal beschreibende Funktion lautet näherungsweise [RIE 87]:

$$I = I_0 \left(e^{-\frac{Z}{\lambda_W}} + R e^{-\frac{(2L-Z)}{\lambda_W}} \right), \quad (6.1)$$

mit

- Z = Position des ^{60}Co -Präparats,
- λ_W = Abschwächlänge des Wellenlängenschiebers,
- R = Reflexionskoeffizient am Endreflektor (er beträgt für Aluminium 92% [NEU 91]),
- I_0 = Anfangsintensität,
- L = Länge des Wellenlängenschiebers.

Der erste Term der Gleichung gibt den Anteil des Lichts wieder, der direkt zum Photomultiplier hin emittiert wurde und die Strecke Z zurückzulegen hat. Der zweite Term steht für den Anteil des Lichts, welches am Endreflektor des Wellenlängenschiebers reflektiert wird und somit ebenfalls den Photomultiplier erreichen kann.

Die Abbildung 6.1 auf Seite 77 verdeutlicht die Geometrie und das benutzte Koordinatensystem. Dabei ist zu beachten, daß die Ortsposition Z der Gleichung 6.1 nicht mit der Ortsposition in den Meßkurven übereinstimmt. Die Nullpunkte der beiden Koordinatensysteme sind gegeneinander verschoben.

Die Gleichung 6.1 berücksichtigt nicht, daß die Abschwächlänge von der jeweiligen Wellenlänge abhängt, und daß der tatsächliche Lichtweg durch viele Reflexionen an den Kanten im allgemeinen länger ist als der direkte Weg zum Photomultiplier. Die Überhöhung in dem Bereich von etwa 50 bis 150 mm ist vermutlich auf zwei Ursachen zurückzuführen: In diesem Bereich ist der Wellenlängenschieber mit Aluminiumfolie umwickelt, die kein lichtabsorbierendes schwarzes Muster wie der übrige Bereich mit dem Rückwandreflektor, hat.

²Die Energien der β -Teilchen (bis zu 2.3 MeV) und der von den γ -Quanten (0.03 bis 1.83 MeV) erzeugten Comptonneutronen des Urans liegen über dem Schwellenwert zur Erzeugung von Čerenkovlicht.

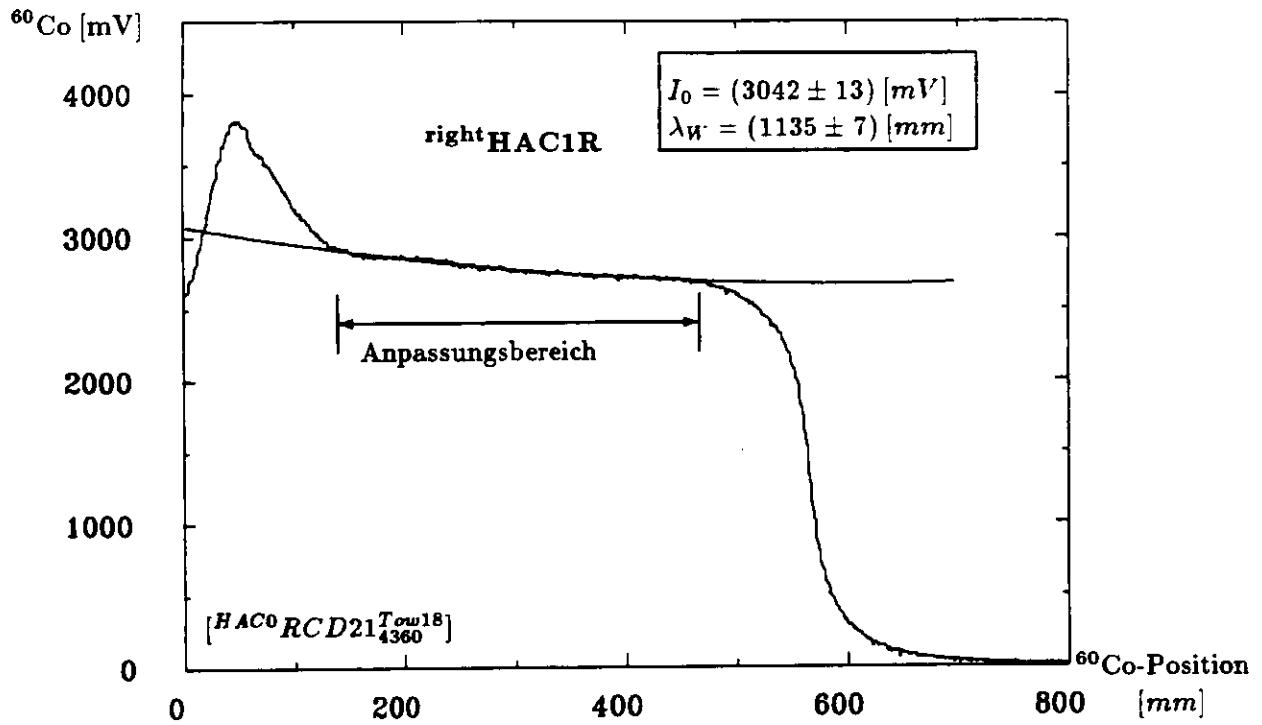


Abbildung 6.4: Anpassung der Gleichung 6.1 an eine RHAC1-Sektion (Anpassungsbereich 145-465 mm).

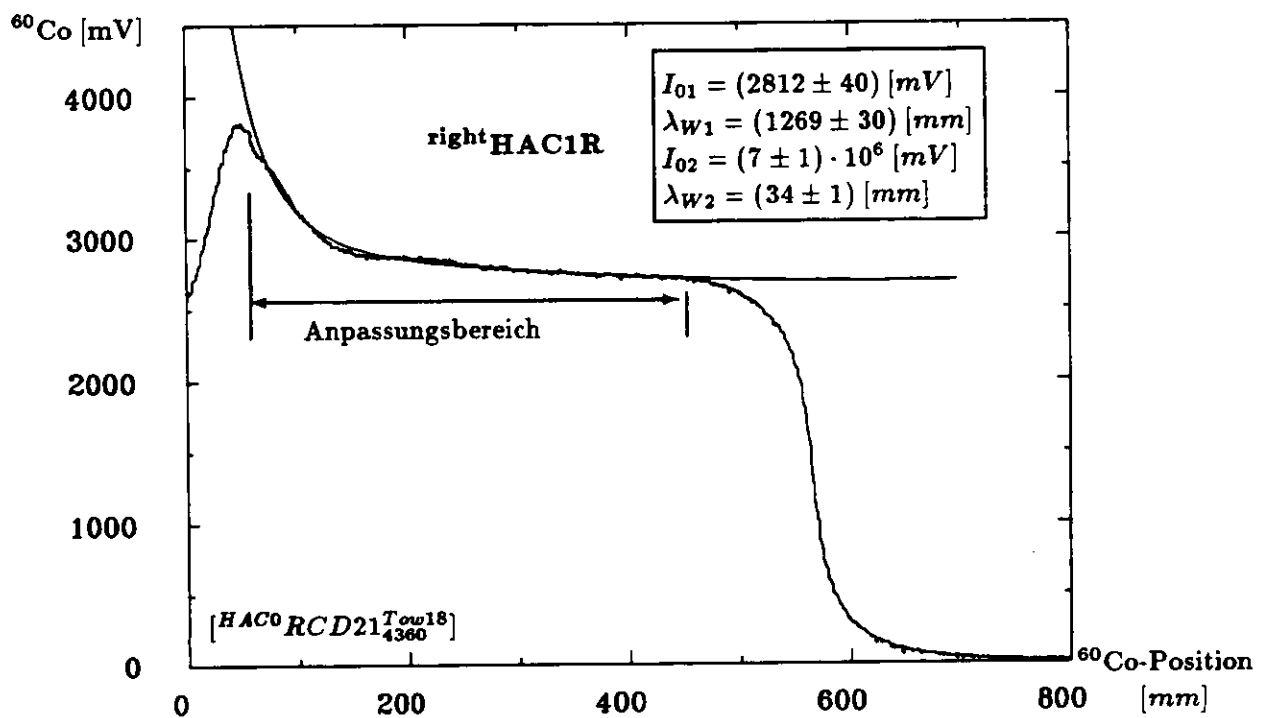


Abbildung 6.5: Anpassung der Gleichung 6.2 an eine RHAC1-Sektion (Anpassungsbereich 70-465 mm).

Die Messungen beginnen gerade hier, so daß an dieser Stelle ein größerer Anteil an Licht wieder zurückreflektiert wird als in dem Bereich des Rückwandreflektors.

Eine weitere Erklärung ist das Vorhandensein von kurzwelligem Licht mit einer kleinen Abschwächlänge, welches für kleine Werte von Z nicht mehr absorbiert wird und dadurch zum Signal beitragen kann. Dieser Ansatz wurde in der Gleichung 6.2 berücksichtigt.

$$I = I_{01} \left(e^{-\frac{Z}{\lambda_{W1}}} + R e^{-\frac{(2L-Z)}{\lambda_{W1}}} \right) + I_{02} \left(e^{-\frac{Z}{\lambda_{W2}}} + R e^{-\frac{(2L-Z)}{\lambda_{W2}}} \right), \quad (6.2)$$

mit

I_{01}	=	Anfangsintensität für langwellige Strahlung,
I_{02}	=	Anfangsintensität für kurzwellige Strahlung,
λ_{W1}	=	Abschwächlänge der langwelligen Strahlung,
λ_{W2}	=	Abschwächlänge der kurzwelligen Strahlung,
Z	=	Position des ^{60}Co -Präparates,
R	=	Reflexionskoeffizient am Endreflektor,
L	=	Länge des Wellenlängenschiebers.

Die Abbildung 6.4 und Abbildung 6.5 zeigen das Ergebnis der Anpassung beider Funktionen an die gleichen Datenpunkte. Während die Gleichung 6.1 die Abschwächlänge gut beschreibt, unterliegt bei der zweiten Anpassung dieser Wert einer größeren Ungenauigkeit. Die Ursache dafür liegt in dem Versuch, den steilen Anstieg der Daten nachzuvollziehen, zudem weitere Effekte, die in der Anpassung nicht berücksichtigt werden, beitragen, wie weiter oben beschrieben wurde. Beide Anpassungen liefern in etwa denselben Wert für die Abschwächlänge des langwelligeren Lichts. Sowohl die Messungen am Wellenlängenschiebertisch als auch die speziellen Messungen an den Modulen haben gezeigt, daß das im Bereich des Wellenlängenschieberhalses erzeugte Signal großen Schwankungen unterliegt. Dies scheint vor allen eine Ursache des Aluminiumpapiers und der Materialüberführung des Wellenlängenschiebers auf den Photomultiplier zu sein.

6.2.2 Abschwächlängenbestimmung aus Serienmessungen

Nur der inaktive Bereich der Wellenlängenschieber der elektromagnetischen und der ersten hadronischen Sektion des Vorwärtskalorimeters (FEMC bzw. FHAC1) ist ausreichend lang genug, um bei den Serienmessungen das Čerenkov-Signal zur Bestimmung der Abschwächlänge benutzen zu können. Eine Funktionsanpassung für FHAC2 und RHAC1 ist nicht möglich. Die Abbildung 6.6 zeigt den Signalverlauf einer FEMC-Sektion, bei der eine Funktionsanpassung durchgeführt wurde.

Sie zeigt ebenfalls die Schwierigkeit bei der Bestimmung der Abschwächlänge λ_W aus den Serienmessungen: Das Signal des Čerenkovlichts ist im Vergleich zum UNO- und ^{60}Co -Signal sehr klein. Der relative Fehler aus der Anpassung ist dadurch selten kleiner als 4%.

Eine weitere Schwierigkeit ist dadurch gegeben, daß bei den Serienmessungen die Module häufig nicht horizontal ausgerichtet waren, mit der Konsequenz, daß die Flügel für die Führung der Transportröhre nicht parallel zu den Türmen verliefen. Für die FEMC-Sektion hatte dies zur Folge, daß das Eichpräparat nicht exakt zwischen zwei FEMC-Wellenlängenschiebern bewegt wurde. Dadurch wurden während der Messung beide Wellenlängenschieber mit einer schwankenden Anzahl an γ -Quanten angeregt. In besonders gravierenden Fällen lassen sich dadurch Abschwächlängen bis zu 10 Metern oder nur wenigen Millimetern messen, je nachdem, wie die Positionierung verlief. Diese Fehlerquelle ist für alle anderen Wellenlängenschiebertypen nicht von Bedeutung, da bei ihnen die Anregung immer einige Zentimeter von der Wellenlängenschieberkante entfernt stattfand.

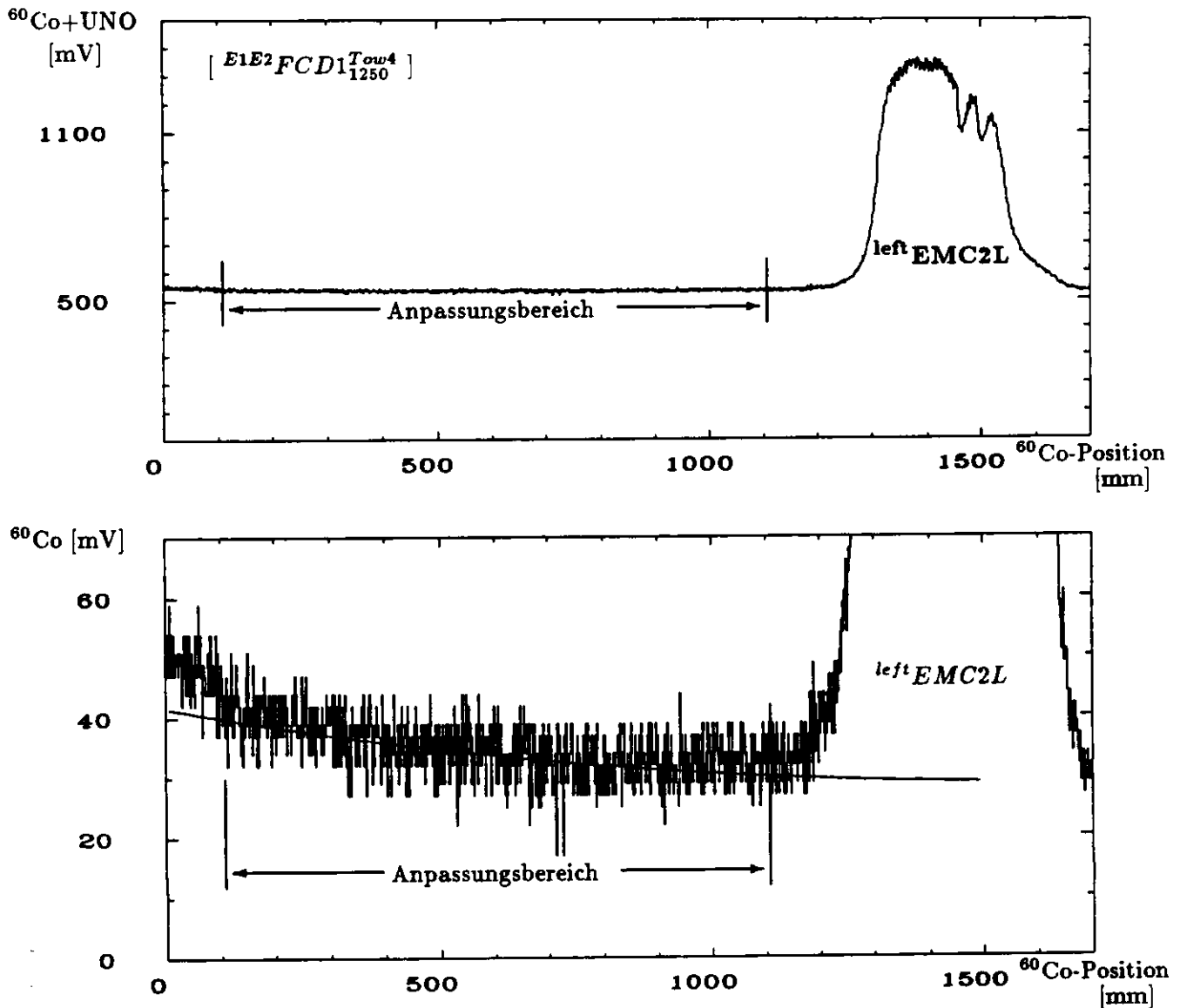


Abbildung 6.6: Anpassungsbereich einer FEMC-Sektion der Serienmessung. Das obere Bild zeigt das Signal $^{60}\text{Co} + \text{UNO}$. In der unteren wurde nach der Subtraktion des UNO-Wertes die Anpassung mit Gleichung 6.1 vorgenommen ($I_0 = (44 \pm 1)$ [mV], $\lambda = (1786 \pm 68)$ [mm]).

Die verlässlichsten Aussagen erhält man demnach bei der Innenabtastung, für die die fest in der Wellenlängenschieberkassette installierten Transportröhren benutzt wurden.

Nur für die Messungen der Innenabtastung existieren hinlänglich zahlreiche Wiederholungsläufe, um Aussagen über die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse machen zu können. Die Abbildung 6.7 zeigt eine Häufigkeitsverteilung des Quotienten aus den Abschwächlängen zweier Messungen einer FEMC-Sektion (λ_1/λ_2) für 203 Wiederholungsmessungen. Die Standardabweichung beträgt in etwa 11% und stellt den unteren Wert des systematischen Fehlers dar. Ein Strahlenschaden würde sich durch eine

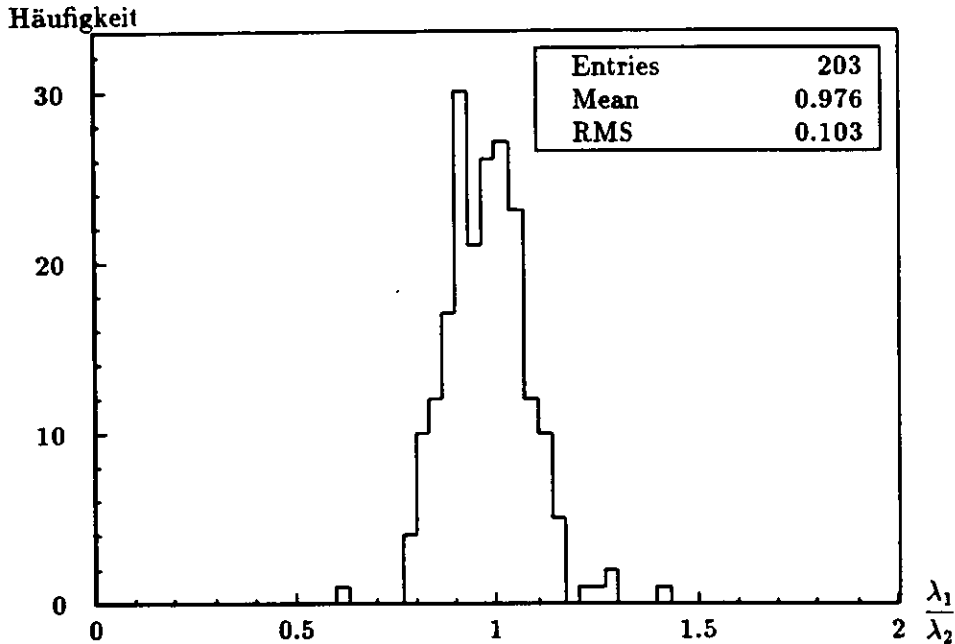


Abbildung 6.7: Reproduzierbarkeit der Abschwächlängen der FEMC-1-Wellenlängenschieber bei der Innenabtastung

Zahl größer als eins bemerkbar machen, da sich die Abschwächlänge λ_2 verkleinern würde. Für einen zeitlichen Abstand von zwei Monaten, in dem diese Wiederholungsläufe entstanden sind, läßt sich also kein Strahlenschaden ausmachen.

Betrachtet man die Verteilung aller Abschwächlängen, die mit der Innenabtastung gewonnen wurden, erhält man eine mittlere Abschwächlänge von $\lambda_w = 1911$ mm mit einer Standardabweichung von 13% (Abbildung 6.8), die sich einerseits aus dem Meßfehler und andererseits aus den in den vorherigen Absätzen beschriebenen individuellen Unterschieden der Wellenlängenschieber zusammensetzt. Die entsprechende Verteilung der Außenabtastung (siehe Abbildung 6.9) hat wegen der teilweise mangelhaften Transportröhrenpositionierung eine erheblich größere Breite (31%). Die Standardabweichung der mit dem Außenabtaster gemessenen Abschwächlänge der FHACØ-Wellenlängenschieber ist mit 15% erwartungsgemäß wesentlich geringer, da der Einfluß der Positionierung des ^{60}Co -Präparats eine kleinere Rolle spielt. Da die Abschwächlänge für jeden Wellenlängenschiebertyp wegen seiner Geometrie, des Grades der Dotierung und seiner Länge unterschiedlich ist, können nur die Abschwächlängen gleichen Wellenlängenschiebertyps miteinander verglichen werden. Die Tabelle 6.1 gibt eine Übersicht der mittleren Abschwächlängen der verschiedenen Wellenlängenschiebertypen wieder.

Es gibt Hinweise, daß die Abschwächlänge λ_w von der Länge und der Breite des Wellenlängenschiebers abhängt. Als Tendenz läßt sich angeben: Je größer die Länge und je breiter der Wellenlängenschieber ist, desto größer ist die Abschwächlänge.

Die unterschiedlichen Werte für die FEMC- und FHACØ-Wellenlängenschieber lassen sich dann durch die unterschiedliche Breite der beiden Typen deuten. Da das Licht nicht auf direktem Wege zum Photomultiplier gelangt, sondern mehrfach an den Seitenflächen reflektiert wird, kommt es zu Lichtverlusten.

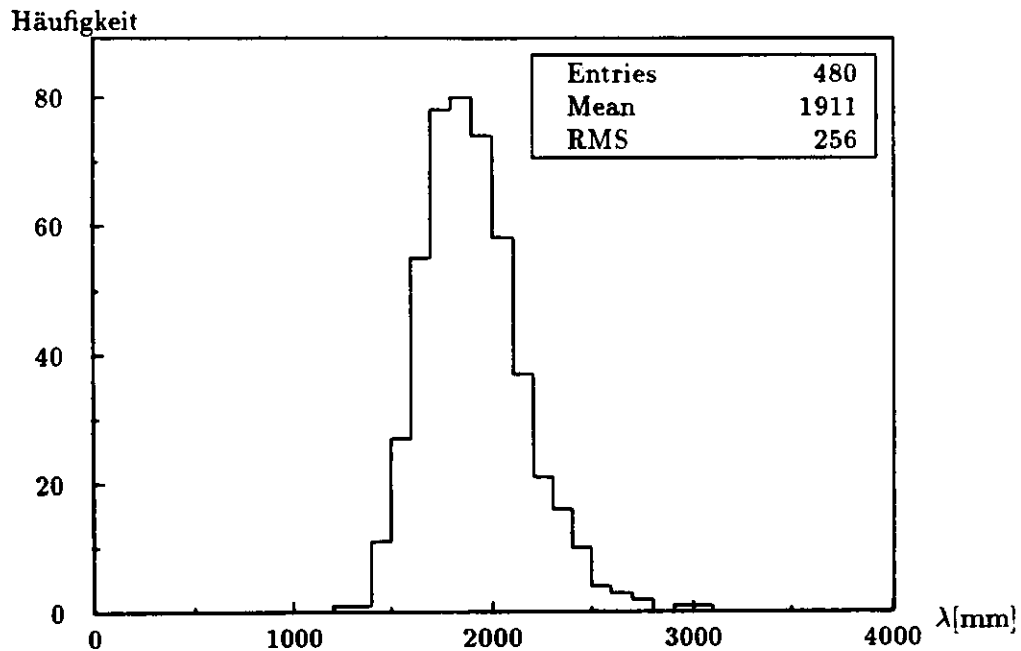


Abbildung 6.8: Verteilung der Abschwächlängen für die FEMC-1-Wellenlängenschieber für die Innenabtastung.

Sie sind um so größer, je häufiger das Licht reflektiert wird, also je schmaler der Wellenlängenschieber ist. Dies erklärt den geringeren gemessenen Wert für die Abschwächlänge λ_W des um 150 mm schmaleren FEMC-Wellenlängenschiebers.

Strahlen- und Alterungsschäden werden sich an den Wellenlängenschiebern mit Hilfe der Abschwächlänge für die Innenabtastung nur dann feststellen lassen, wenn sie zu einer Änderung in der Abschwächlänge von mehr als 11% führen. Die meisten mit der Methode der Außenabtastung ermittelten Abschwächlängen werden nur Rückschlüsse auf sehr große Strahlenschäden in den Wellenlängenschiebern zulassen, da ihre Abschwächlängen zu große Unsicherheiten beinhalten.

Wellenlängen- schiebertyp ^a	Gesamt- länge [mm]	Außenabtastung			Innenabtastung		
		λ [mm]	σ [mm]	N	λ [mm]	σ [mm]	N
FEMC-1	1896.0	1953	608.1	961	1911	256.1	480
FEMC-2	1736.0	1848	639.2	114			
FHACØ -1	1916.0	2246	339.4	173			
FHACØ -2	1756.0	2260	294.0	93			
FHACØ -3	1566.0	2443	346.7	81			
FHAC1-1	1685.5	2349	581.6	800	2471	617.6	205
FHAC1-2	1525.5	1900	480.9	173			
FHAC1-3	1365.5	1493	1085	44			
REMC	1214.0	1451	293.4	481			
RHACØ -1	1214.0	1718	405.6	188			
RHACØ -2	1039.0	1622	527.8	65			

^aDie Wellenlängenschieber-Typen sind in Anhang A aufgeführt.

Tabelle 6.1: Mittlere Abschwächlängen der verschiedenen Wellenlängenschiebertypen. *N* ist die Anzahl der Messungen an im allgemeinen unterschiedlichen Wellenlängenschiebern. Nur bei den FHAC1-Wellenlängenschiebern wurde die Abschwächlänge an zwei unterschiedlichen Positionen des Wellenlängenschiebers bestimmt und berücksichtigt.

Es wurden alle FCAL-Module außer FNL19 und die RCAL-Module RNL14, RNL16-19, RNL21-22, RCD14 und RCD16-22 berücksichtigt.

Die relativ große Standardabweichung für die Abschwächlänge bei den FHAC1-1 Wellenlängenschiebern ist auf den kurzen Anpassungsbereich der Innenabtastung zurückzuführen.

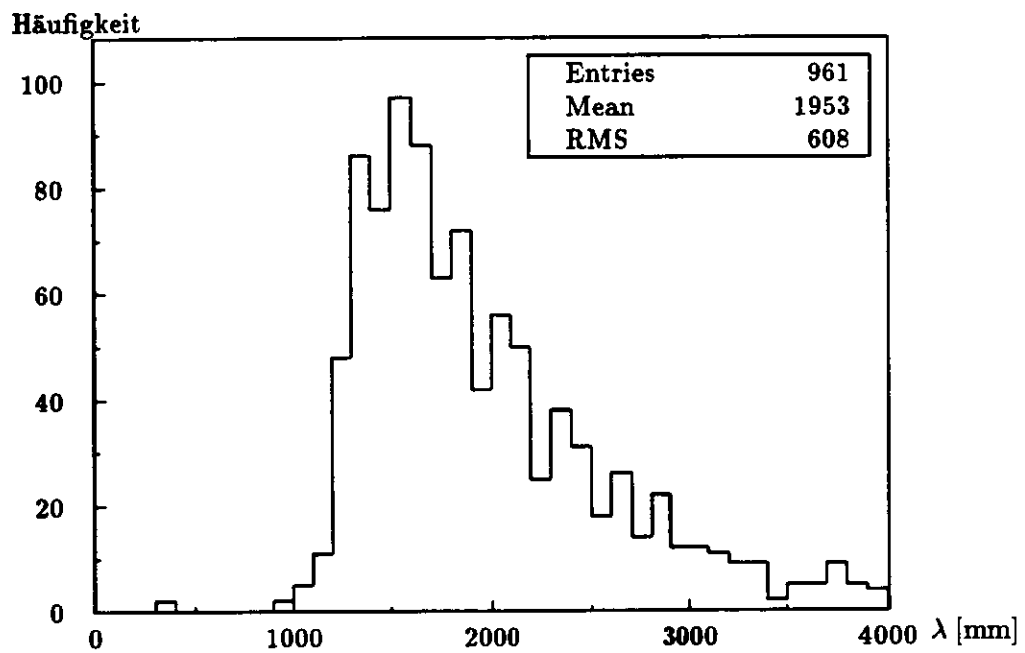


Abbildung 6.9: Verteilung der Abschwächlänge für FEMC-1-Wellenlängenschieber für die Außenabtastung.

Kapitel 7

Abschwächlänge der Szintillatoren

Um die Abschwächlänge λ_{Sz} der Szintillatoren zu bestimmen, wurde ein Ansatz benutzt [BEH 88], der es ermöglicht, einen Parameter zu bestimmen, der die Lichtabschwächung in den Szintillatoren beschreibt. Außerdem liefert dieser Ansatz zusätzlich zwei Größen, die mit dem Antwortverhalten der optischen Komponenten (Wellenlängenschieber und Szintillatoren) auf das ^{60}Co -Präparat zusammenhängen.

In diesem Kapitel soll zunächst dieser Ansatz beschrieben und anschließend seine Aussagefähigkeit gezeigt werden. Abschließend werden dann die Ergebnisse der Abschwächlängen der einzelnen Szintillatoren gezeigt.

Die γ -Quanten des ^{60}Co -Präparats deponieren ihre Energie hauptsächlich im Randbereich der Szintillatoren (Abbildung 3.5, Seite 36). Die mittlere Eindringtiefe ist mit etwa 12 mm klein gegenüber der Gesamtlänge des Szintillators von bis zu 191 mm. Der resultierende Weglängenunterschied δ für das Szintillationslicht zwischen der dem ^{60}Co -Präparat zugewandten und der gegenüberliegenden Auslesekannte ist daher groß genug, um den Quotienten aus den Signalen des linken und rechten Photomultipliers als Parameter für die Qualität des Lichttransportes im Szintillator heranzuziehen. Er gibt den Intensitätsverlust für das Licht nach Durchquerung der Strecke δ im Szintillator an und ist somit ein Maß für die Abschwächlänge λ_{Sz} der Szintillatoren.

Die drei im oben genannten Ansatz verwendeten Parameter sind:

- ▷ Energiedeposition und Effizienz der Konvertierung zu Licht im Szintillator:
- S - (S_L bzw. S_R),
- ▷ Transmission des Fluoreszenzlichts im Szintillator: - T - ,
- ▷ Antwortfunktion des Wellenlängenschiebers: - W - (W_L oder W_R).

Etwas genauer ausgedrückt, sind S und S-T die Lichtintensitäten, die bei Anregung durch das Eichpräparat auf der Anregungsseite bzw. auf der entgegengesetzten Seite austreten.

Der Index L steht auch hier wieder für die linke und R entsprechend für die rechte Modulseite. Es ist sowohl die Energiedeposition und die Konvertierung zu Szintillatorlicht als auch die Transmission zu den Auslesekannten für einen realen Szintillator nicht vollkommen homogen. Aus diesem Grund findet eine Unterscheidung der Szintillatorantwort in S_L und S_R statt, die die erstgenannten Schwankungen berücksichtigt. Um auch die unterschiedlichen Transmissionen vom Entstehungsort des Lichts zu den

beiden Auslesekannten einzubeziehen, müßte ebenfalls eine Unterscheidung in T_L und T_R erfolgen. Die Verschiedenheit der Transmissionen tritt beispielsweise bei keilförmigen Szintillatoren auf [MAR 91]. Ein ungünstiges Herstellungsverfahren kann eine Keilform der Szintillatoren verursachen.

Die Gegebenheit, daß nur vier unabhängige Datensätze pro Sektion zur Verfügung stehen, macht jedoch eine Vereinfachung notwendig, so daß dieser Ansatz nicht weiter ausgeführt wird. Die Vereinfachung, die gleiche Transmission für links und rechts anzunehmen, wirkt sich wie eine quadratische Mittelung der Werte für T_L und T_R aus, und reduziert z.B. den Einfluß von geometrischen Effekten auf die Ergebnisse von T.

Bei den Messungen mit dem Außenabtaster wurde jede Sektion von der linken und rechten Modulseite¹ abgetastet, so daß immer wenigstens vier Photomultiplierantworten I_{JK} für die Analyse zur Verfügung stehen. I bezeichnet im folgenden stets die normierten Signale $^{60}\text{Co}/\text{UNO}$ (vergleiche dazu Kapitel 3.3, Seite 41). Der erste Index „J“ steht dabei für die Seite der Anregung, also wo sich das ^{60}Co -Präparat während der Datenauslese befand (links oder rechts). Der zweite Index „K“ steht für die Ausleseseite, also für den ausgelesenen Photomultiplier, der ebenfalls kurz mit L und R für den Photomultiplier der linken und der rechten Seite bezeichnet wird. Aus den vier Photomultiplierantworten und dem oben erwähnten Ansatz erhält man dann:

$$I_{RR} = S_R \cdot W_R, \quad (7.1)$$

$$I_{RL} = S_R \cdot W_L \cdot T, \quad (7.2)$$

$$I_{LR} = S_L \cdot W_R \cdot T, \quad (7.3)$$

$$I_{LL} = S_L \cdot W_L. \quad (7.4)$$

Für die Transmission ergibt sich dann:

$$T = \sqrt{\frac{I_{RL} \cdot I_{LR}}{I_{LL} \cdot I_{RR}}}. \quad (7.5)$$

Die Größen W und S können einzeln nicht bestimmt werden, sondern nur die Verhältnisse (W_L/W_R) und (S_L/S_R):

$$\frac{W_L}{W_R} = \sqrt{\frac{I_{RL} \cdot I_{LL}}{I_{RR} \cdot I_{LR}}}, \quad (7.6)$$

$$\frac{S_L}{S_R} = \sqrt{\frac{I_{LR} \cdot I_{LL}}{I_{RR} \cdot I_{RL}}}. \quad (7.7)$$

Zur Bestimmung der T-Werte von einzelnen Szintillatoren wurden zwei ^{60}Co -Läufe herangezogen, die auf verschiedenen Modulseiten erfolgten und dieselbe Position der Transportröhre hatten. Um von Unsicherheiten in der Ortposition und der Feinstruktur der Signale unabhängig zu sein, wurde bei der Auswertung um jede Maximumsposition ein Mittelwert über acht Millimeter berechnet ($I_{JK} \rightarrow \bar{I}_{JK}$). In dem Randbereich der HAC-Sektionen und bei den EMC-Sektionen auch im Bereich um die HES-Schächte kommt es zu einer Erhöhung der berechneten Werte für die Transmission. Dieser Sachverhalt ist mit einer größeren Eindringtiefe als die der durchschnittlichen \bar{d} für die Szintillatoren in der Mitte

¹Bei der Innenabtastung gelang es häufig wegen der in Abschnitt 2.1 auf Seite 13 beschriebenen Probleme nicht, einen Turm von beiden Seiten abzutasten.

der Sektion zu erklären.

Wie sich die Eindringtiefe für unterschiedliche Ortspositionen verhält, ist für eine REMC-Sektion in Abbildung 7.1 für die Innenabtastung dargestellt. Die Daten stammen aus der Monte-Carlo-Simulation, die auf Seite 58 beschrieben wurde. Die mittlere Eindringtiefe \bar{d} beträgt für die mittleren Szintillatoren $\bar{d}=11.6$ mm und wächst auf bis zu 14.5 mm für die Randszintillatoren und 17.2 mm für die Szintillatoren direkt am HES-Schacht an. Die hohen Werte bei $180 < Z < 195$ mm entstehen durch die Lücke des HES-Schachtes und haben für die Analyse keine weitere Bedeutung.

Aus diesem Grund wurden für die Berechnung der mittleren T-Werte der einzelnen Szintillatoren nur die folgenden Szintillatoren berücksichtigt:

- HAC-Sektionen: die Szintillatoren an den Positionen 5 bis 75,
- EMC-Sektionen des FCALs: die Szintillatoren an den Positionen 11 bis 23,
- EMC-Sektionen des RCALs: die Szintillatoren an den Positionen 8 bis 23.

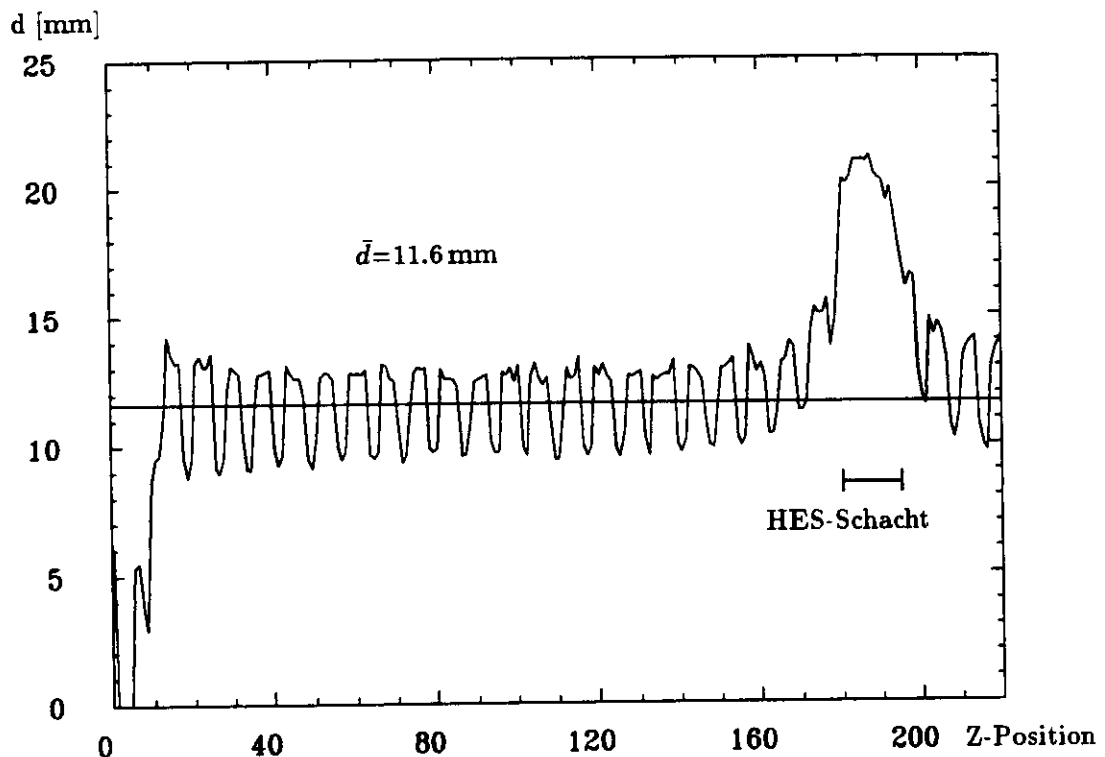


Abbildung 7.1: Durchschnittliche Eindringtiefe d als Funktion der Ortsposition des ^{60}Co -Präparates.

7.1 Diskussion der optischen Parameter

In der Abbildung 7.2 und 7.3 sind die Werte für die in Beziehung (7.5) bis (7.7) definierten Verhältnisse (S_L/S_R) und (W_L/W_R) und die T-Werte für eine FHAC1- und eine FEMC1-Sektion dargestellt. Zur Verdeutlichung sind die über acht Millimeter gemittelten Photomultiplierantworten mit dargestellt (oberes Bild). Allgemein läßt sich sagen, daß die Verteilung der Transmissionswerte T sehr viel homogener ist als die der Quotienten (S_L/S_R) und (W_L/W_R).

Obwohl die Photomultiplierantwort der HAC1-Sektion (Abbildung 7.5) ein zum Durchschnitt vergleichsweise inhomogenes Verhalten zeigt, hat dies auf die T-Werte kaum Einfluß, der Mittelwert für eine Sektion der T-Werte beträgt $\bar{T} = 0.678 (\pm 0.6\%)$. Betrachtet man die beiden Mittelwerte für die Verhältnisse, die $\langle S_L/S_R \rangle = 0.969 (\pm 2.4\%)$ und $\langle W_L/W_R \rangle = 1.013 (\pm 1.2\%)$ betragen, scheint die Ursache der Inhomogenität mehr bei den Szintillatoren zu liegen. Da aber nur die Verhältnisse bestimmbar sind, läßt sich nicht sagen, worin die Störung besteht. Es läßt sich nur generell feststellen, ob das Ansprechverhalten der optischen Komponenten für beide Seiten gleich (Quotient = eins) oder verschieden ist (Quotient \neq eins), wobei sich nicht entscheiden läßt, inwieweit eine Überhöhung des Ansprechverhaltens auf der einen Seite oder aber eine Verringerung auf der anderen Seite die Abweichung der Verhältnisse von eins verursacht.

Zur Prüfung des Ansatzes wurde eine Messung durchgeführt, bei der der Rückwandreflektor durch ein sich abwechselndes schwarz/weiß Muster aus Tedlar- und Tyvepapier ersetzt wurde. Das Resultat ist in Abbildung 7.4 dargestellt. Nur die Werte für das Verhältnis von (W_L/W_R) zeigen die gleiche Inhomogenität wie die im oberen Bild dargestellten Photomultiplierantwort \bar{I}_{LR} . Zum besseren Vergleich wurde das ungestörte Signal (\bar{I}_{RL}) mit dargestellt. Außerdem kann aus dieser Messung der Einfluß des Rückwandreflektors grob abgeschätzt werden. Er erhöht die Lichtausbeute um etwa 25%.

Die Abbildung 7.5 zeigt die Situation eines Stapelfehlers, bei der die Szintillatoren an der Position 23 bis 40 bzw. 53 bis 68 eine Verschiebung nach links von vermutlich mehr als einen Millimeter aufweisen. Dadurch ist der Abstand des Präparates von den Szintillatoren auf der linken und rechten Modulseite für diese Bereiche verschieden groß, was sich in einer unterschiedlichen Energiedeposition in den Szintillatoren ausdrückt. Von dieser Störung sollte demnach nur das (S_L/S_R) -Verhältnis betroffen sein, was die Abbildung 7.5 auch bestätigt. Das systematische Abweichen der Verhältnisse von eins bei einigen der Werte liegt möglicherweise an einer unterschiedlichen Transportröhrenposition auf den beiden Modulseiten während der Abtastung. Dies hat für die hier angestellten Betrachtungen keinen Einfluß.

Während die T-Werte in eindeutiger Weise mit der Abschwächung der Lichtintensität verknüpft sind, lassen sich durch die (S_L/S_R) - und (W_L/W_R) -Verhältnisse nur eingeschränkte Aussagen machen. Inwieweit sich der Parameter T zur Analyse von Strahlenschäden eignet, wird in Kapitel 8 gezeigt.

Aus den hier gezeigten Abbildungen und den Reihenuntersuchungen läßt sich entnehmen, daß die T-Werte kleineren Schwankungen unterliegen als die übrigen beiden Parameter. Allgemein läßt sich feststellen, daß die Standardabweichungen der Mittelwerte für T bis zu einer Größenordnung kleiner sind als die für (S_L/S_R) und (W_L/W_R) . Die Ursache für dieses Verhalten ist darin zu finden, daß alle mechanischen Eigenschaften des Kalorimeters in den Verhältnissen (S_L/S_R) und (W_L/W_R) enthalten sind, während die Transmission eher von der Beschaffenheit des Szintillatormaterials abhängt, welches offensichtlich in sehr guter Qualität hergestellt wurde.

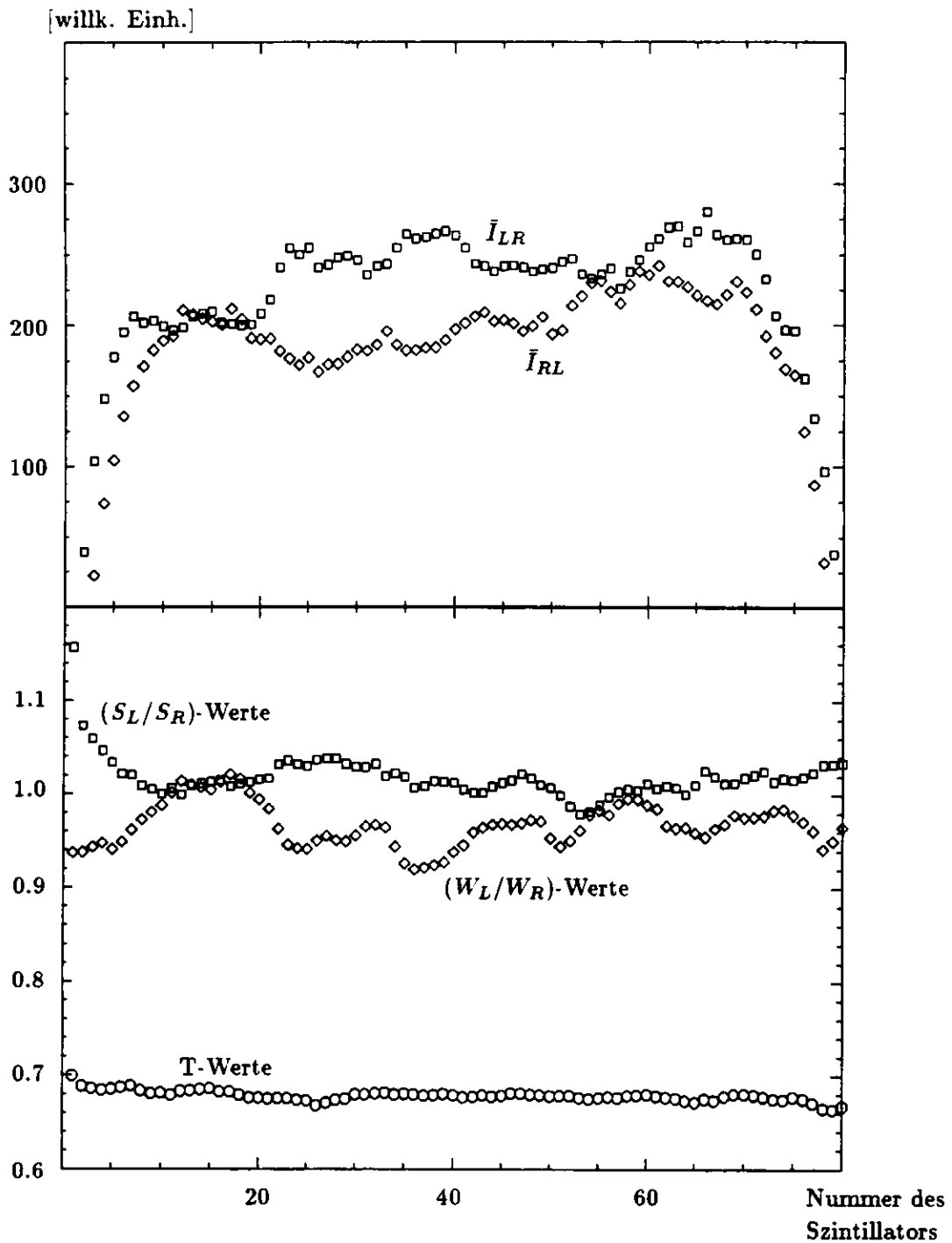


Abbildung 7.2: T -, (S_L/S_R) - und (W_L/W_R) -Werte für alle 80 FHCA1-Szintillatoren. Das obere Bild zeigt die über acht Millimeter gemittelten Daten des linken und rechten Photomultipliers für zwei unterschiedliche Bestrahlungsseiten. Trotz der insgesamt inhomogenen Photomultiplierantworten ist die Standardabweichung für T -Werte bei einem mittleren \bar{T} von 0.678 kleiner als 0.8% für alle 80 Szintillatoren. Betrachtet man nur die mittleren 70, ergibt sich eine Standardabweichung von 0.5%.

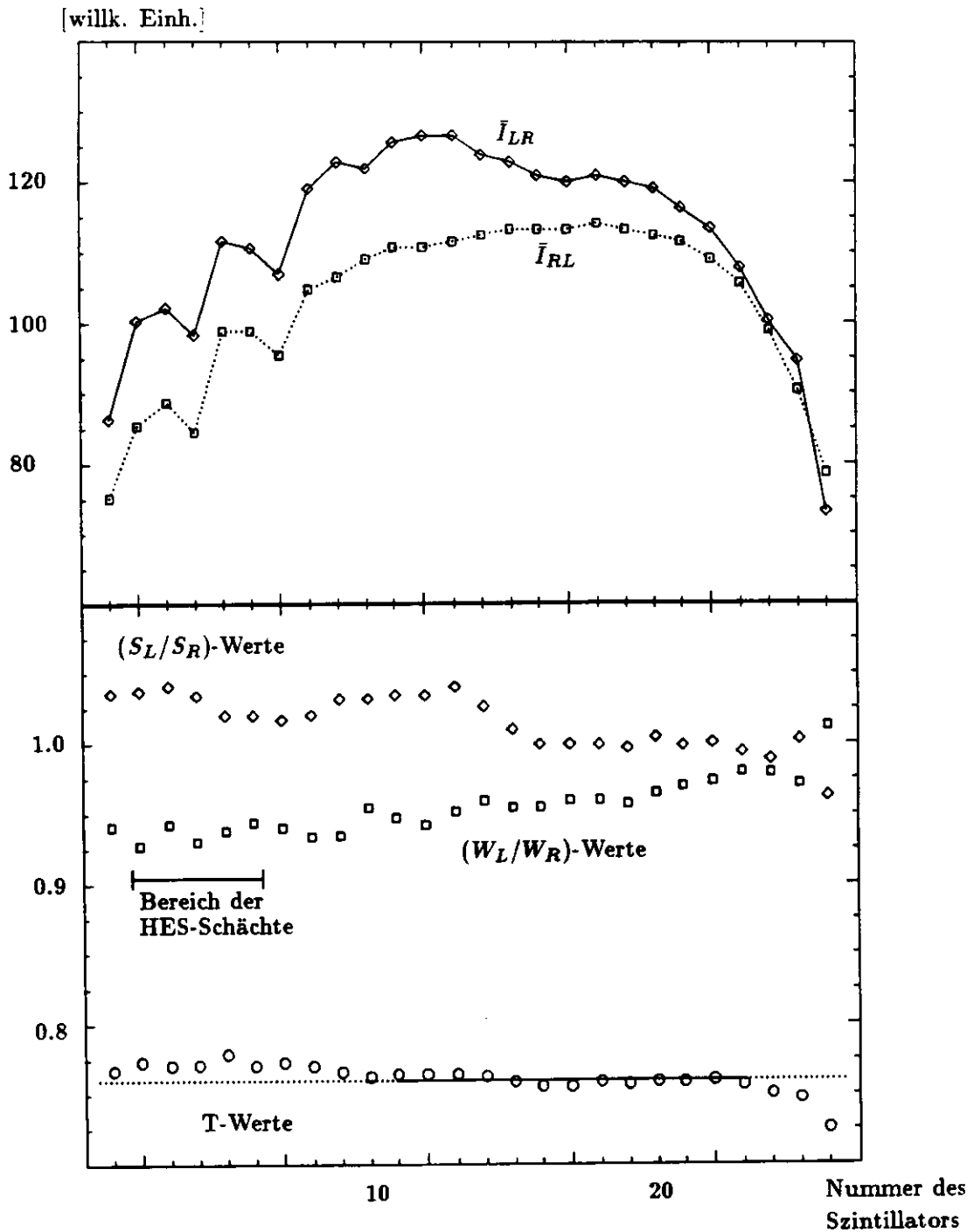


Abbildung 7.3: T -, (S_L/S_R) - und (W_L/W_R) -Werte für alle 26 FEMC-Szintillatoren. Das obere Bild zeigt die über acht Millimeter gemittelten Daten des linken und rechten Photomultipliers für zwei unterschiedliche Bestrahlungsseiten. Die etwa vierprozentigen Abweichungen für T im vorderen Bereich des unteren Bildes entstehen durch die unterschiedlichen mittleren Eindringtiefen \bar{d} der γ -Quanten in der Nähe des Rands der Sektion und der HES-Schächte. Die durchgezogene Linie bei den T -Werten zeigt den Bereich, der für die Mittelwertbildung herangezogen wurde und $T=0.690\pm 0.7\%$ ergibt. Die Mittelung über alle Szintillatoren ergibt $\bar{T}=0.692\pm 2.4\%$.

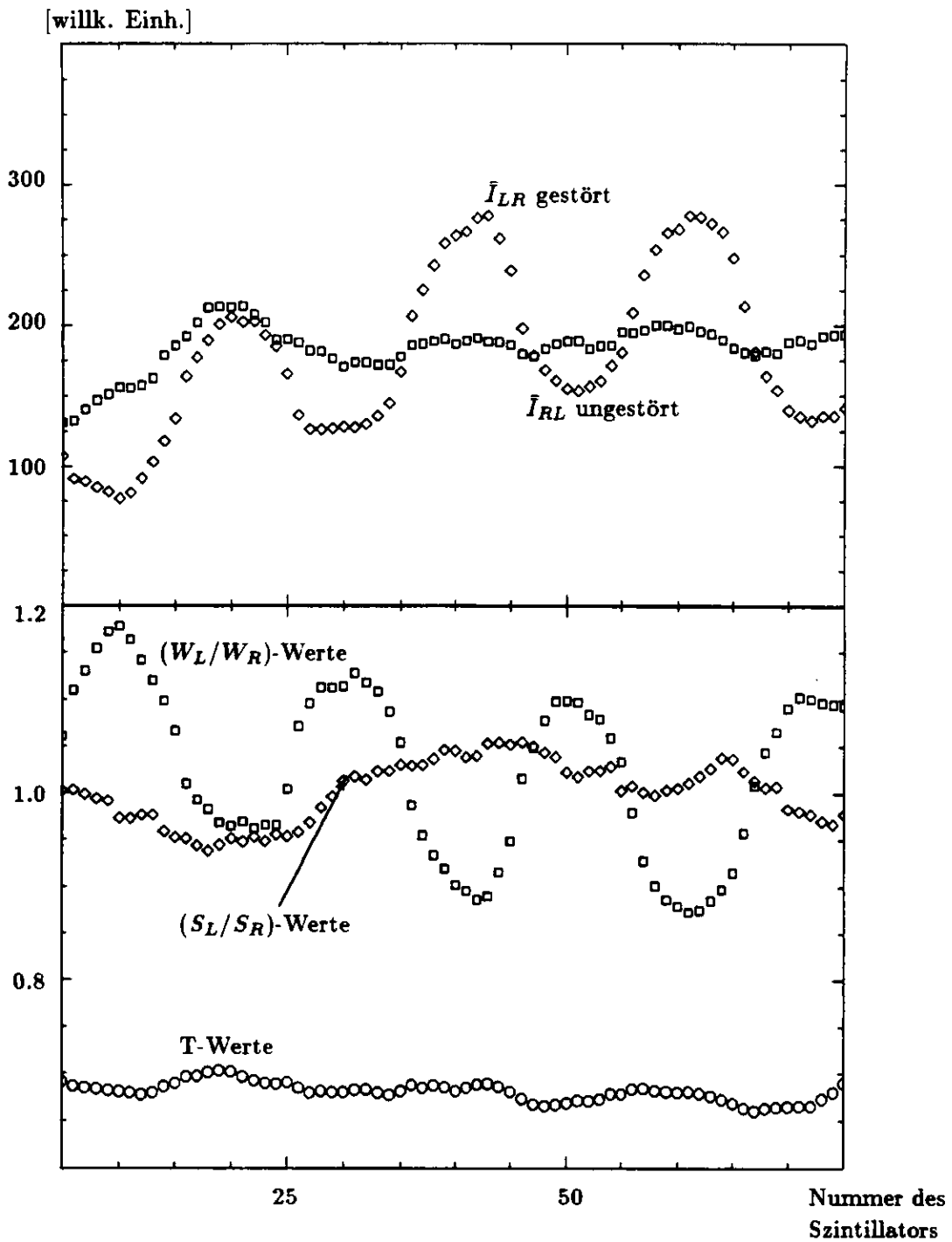


Abbildung 7.4: T -, (S_L/S_R) - und (W_L/W_R) -Werte für 75 Szintillatorpositionen einer FHAC1-Sektion. Das obere Bild zeigt die über acht Millimeter gemittelten Daten des linken und rechten Photomultipliers für zwei unterschiedliche Bestrahlungsseiten. Bei dieser Sektion wurde der Rückwandreflektor durch ein schwarz/weiß Muster ersetzt. Erwartungsgemäß wirkt sich dies praktisch nur im Verhältnis (W_L/W_R) aus.

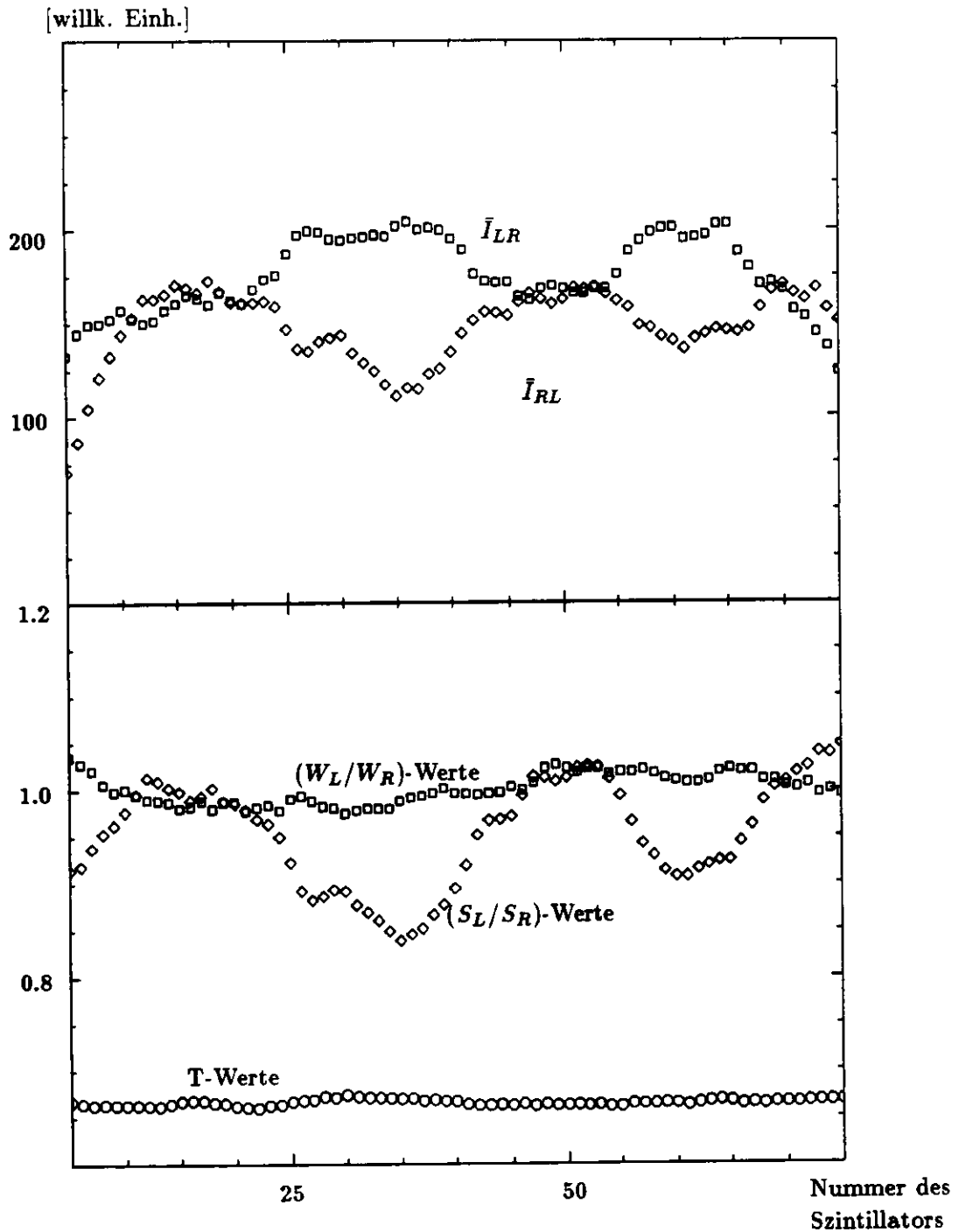


Abbildung 7.5: T -, (S_L/S_R) - und (W_L/W_R) -Werte für 75 Szintillatorpositionen einer FHAC1-Sektion. Das obere Bild zeigt die über acht Millimeter gemittelten Daten des linken und rechten Photomultipliers für zwei unterschiedliche Bestrahlungsseiten. Bei dieser Sektion liegt ein Stapelfehler vor, der sich allein in den Verhältnis von (S_L/S_R) niederschlägt.

7.2 Bestimmung der Abschwächlänge λ_{Sz}

Im folgenden wird vereinfachend angenommen, daß die Abschwächung der Lichtintensität T einem einfachen exponentiellen Gesetz folgt. Danach ist der Zusammenhang von T und λ_{Sz} folgendermaßen:

$$T = e^{-\frac{\delta}{\lambda_{Sz}}} , \quad \delta = D - 2d , \quad (7.8)$$

mit

- δ = Weglängenunterschied zur linken und rechten Auslesekannte,
- λ_{Sz} = effektive Abschwächlänge der Szintillatoren für das Fluoreszenzlicht,
- D = Länge des Szintillators,
- d = mittlere Eindringtiefe der γ -Quanten in den Szintillator.

Die Abschwächlänge λ_{Sz} kann nach Beziehung (7.8) aus den experimentell ermittelten Transmissionswerten T berechnet werden. Die mittlere Eindringtiefe \bar{d} wird mit Hilfe von Monte-Carlo-Rechnungen (siehe Kapitel 4) bestimmt.

Zu einer genaueren Beschreibung der Abschwächlänge sind noch folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- ▷ Die Abschwächlänge der Szintillatoren ist von der Wellenlänge des Lichts abhängig, was dazu führt, daß mit zunehmender zurückgelegter Strecke im Szintillator das Frequenzspektrum zu niedrigeren Frequenzen hin verschoben wird.
- ▷ Der Lichtweg im Szintillator ist länger als der hier angenommene, da ein Großteil des Lichts die Auslesekannte durch Totalreflexion erreicht. Dies führt allgemein zu einer zu klein berechneten Abschwächlänge, der effektiven Abschwächlänge. Bei den schmaleren EMC-Szintillatoren kommt es durch häufigeres Reflektieren zu größeren Lichtverlusten und somit zu einer weiteren Verkleinerung der Abschwächlänge.
- ▷ Randeffekte, wie die nicht mehr stattfindende Selbstabsorption im Randbereich, führen zu einer Vergrößerung der Lichtausbeute auf der dem ^{60}Co -Präparat zugewandten Ausleseseite, was zu einer Verkleinerung der T -Werte führt.
- ▷ Der mittlere Lichtweg wird zusätzlich durch eine an den Auslesekannten stattfindende Reflexion verlängert. Der Reflexionskoeffizient beträgt nach [MAR 91] etwa 29%.
- ▷ Die Photomultiplierantworten \bar{I}_{RR} und \bar{I}_{LL} haben ein höheres Signal als \bar{I}_{RL} und \bar{I}_{LR} , da auf dieser Seite zusätzlich Čerenkovlicht erzeugt wird (vergleiche Kapitel 2). Dies führt zu einer merklichen Verkleinerung der Werte für λ_{Sz} .
Für die EMC-Sektionen läßt sich wegen des langen inaktiven Vorlaufs des Wellenlängenschiebers der Anteil des Čerenkovlichts als Funktion der Szintillatorposition bestimmen und von \bar{I}_{RR} bzw. \bar{I}_{LL} subtrahieren. Der Wert für λ_{Sz} vergrößert sich dabei um bis zu 10%.
Für die Serienauswertung wurde auf eine Korrektur für das Čerenkovlicht verzichtet, da sie zum einen nicht für alle Sektionen durchführbar ist (FHAC2, RHAC1) und zum anderen eine zusätzliche Fehlerquelle darstellt. Ein Vergleich mit späteren Messungen wird davon nicht beeinflusst.

Alle hier erwähnten Effekte wirken sich auf das gemessenen λ_{Sz} (nach dem Ansatz von Seite 96) gegenüber der realen Abschwächlänge verkleinernd aus.

Ähnlich wie für die Abschwächlänge λ_W der Wellenlängenschieber lassen sich auch hier nur Werte vergleichen, die für gleiche Szintillatortypen erhalten wurden, da die Abschwächlänge zusätzlich von der Breite eines Szintillators abhängt. Auch die Positionierung der Transportröhren, was den Ort der Anregung zwischen den Abstandhaltern der Szintillatoren bestimmt, hat einen Einfluß auf die ermittelte Abschwächlänge.

Desweiteren hängt die mittlere Eindringtiefe \bar{d} der γ -Quanten vom Abstand des ^{60}Co -Präparates von den Szintillatoren ab, da sich die Winkelverteilung der einfallenden Teilchen mit der Entfernung ändert. Dieser Abstand ist durch die Art der Abtastung und des Szintillatortyps bestimmt. Sie wird mit zunehmendem Abstand größer, wenn alle anderen Voraussetzungen dieselben sind. Da diese Größe in die Berechnung der Abschwächlänge eingeht, muß insbesondere beim Vergleich der Ergebnisse der Innen- mit der Außenabtastung die unterschiedliche Eindringtiefe bekannt sein. Deshalb wurde für jeden Szintillatortyp und jede Abtastmethode die mittlere Eindringtiefe aus Monte-Carlo-Simulationen bestimmt und zur Berechnung der Abschwächlänge herangezogen.

Außerdem wird bei kleinerem \bar{d} ein größerer Prozentsatz an Licht im kritischen Randbereich erzeugt. Dieser Einfluß kann bis zu 3% betragen. So weist z.B. die Abschwächlänge der FHAC2-Szintillatoren zwischen Innen- und Außenabtastung die kleinste Abweichung auf. Die ermittelten Abschwächlängen betragen für alle ausgewerteten HAC2-Sektionen:

$$\lambda_{S_z}(\text{innen}) = 408 \text{ mm } (\pm 2.5\%) \quad \text{und} \quad \lambda_{S_z}(\text{außen}) = 410 \text{ mm } (\pm 2.0\%) .$$

7.3 Ergebnisse der Abschwächlänge λ_{S_z}

Steht für jede Turmseite wenigstens ein ^{60}Co -Lauf zur Verfügung, kann für diesen Turm die Berechnung der einzelnen Werte der zuvor beschriebenen Parameter und deren Mittelwerte vorgenommen werden. Die Abbildung 7.6 zeigt die Verteilung der T-Werte aller Szintillatoren des Vorwärts- und Rückwärtskalorimeters und die daraus nach Beziehung (7.8) berechneten Abschwächlängen. Die beiden Maxima in der Verteilung der T-Werte sind darauf zurückzuführen, daß unterschiedliche Szintillatortypen ins Diagramm eingehen, was bei der Berechnung der Abschwächlänge durch die unterschiedliche Eindringtiefe \bar{d} berücksichtigt wurde.

Berücksichtigt man keine der hier beschriebenen Effekte, erhält man eine Abschwächlänge von etwa $\lambda_{S_z} = 414 \text{ mm } (\pm 5.7\%)$. Wird der Einfluß des Čerenkovlichts berücksichtigt, ergibt sich $\lambda_{S_z} \approx 455 \text{ mm}$.

Ein weiteres Beispiel hierzu zeigt die Abbildung 7.7, in der die Verteilungen für alle HAC1-Szintillatoren dargestellt sind. In der Tabelle 7.1 sind die Ergebnisse der T-Werte und der daraus berechneten Abschwächlängen dargestellt.

Die Szintillatoren wurden entsprechend ihrer Typenbezeichnung eingeteilt:

EMC1	entspricht den FEMC2- und FEMC3-Szintillatoren,
EMC2/3	entspricht den FEMC1- und FEMC4-Szintillatoren,
EMC4/5	entspricht den REMC1- und REMC2-Szintillatoren.

Aus den sehr kleinen Streuungen der Transmissionswerte T (siehe Tabelle 7.1) erkennt man die außerordentliche Genauigkeit, mit der die Szintillatoren gefertigt wurden. Die Ergebnisse zeigen aber auch die hohe Präzision des Meßverfahrens mit dem ^{60}Co -Präparat.

Die ermittelte Abschwächlänge für den EMC1-Typ zeigt trotz seiner relativ großen Standardabweichung einen systematischen Unterschied zu den übrigen EMC-Sektionen.

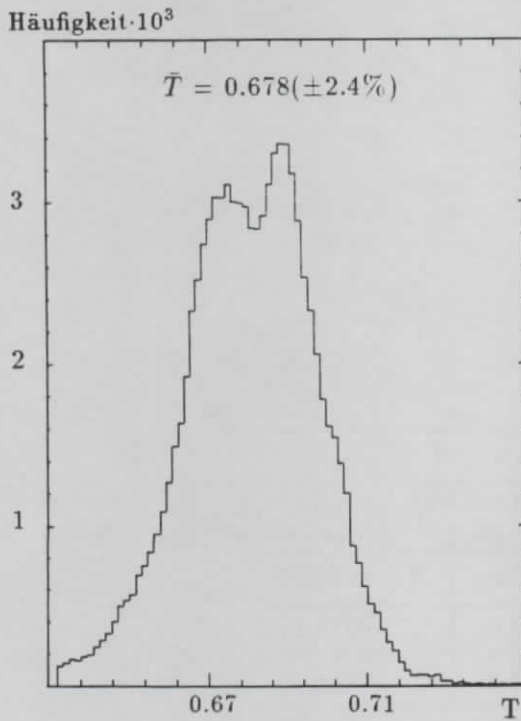


Bild 7.6a: T-Werte

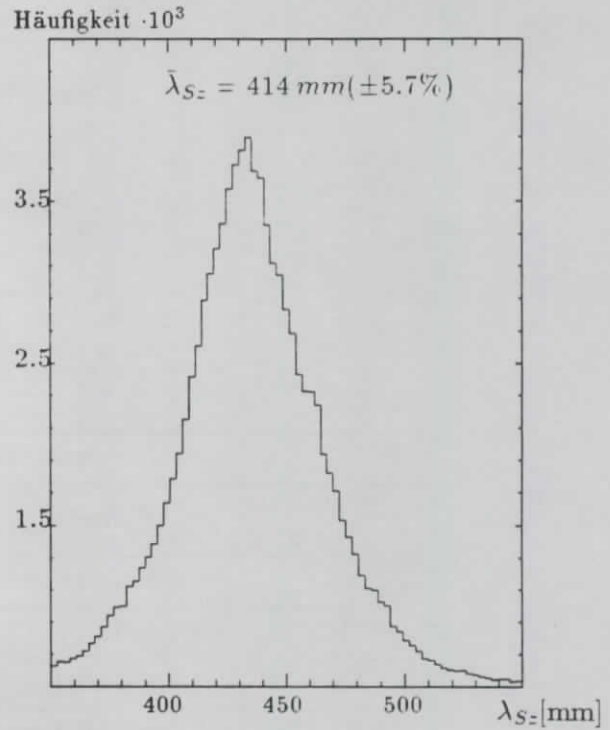


Bild 7.6b: Abschwächlänge λ_{S_z}

Abbildung 7.6: Verteilung der T-Werte und der Abschwächlänge λ_{S_z} für alle Szintillatoren des Vorwärts- und Rückwärtskalorimeters.

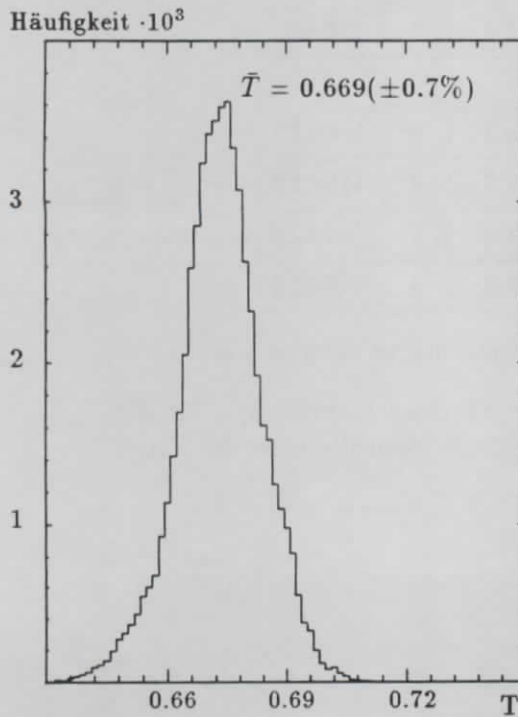


Bild 7.7a: T-Werte

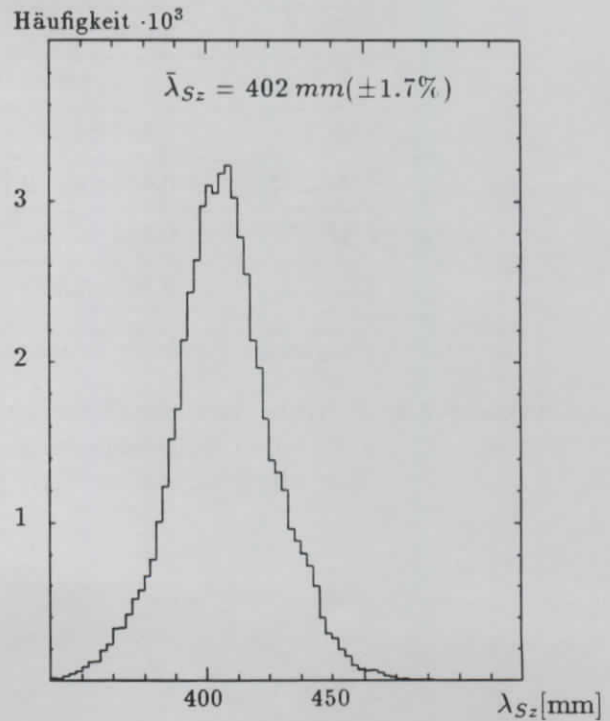


Bild 7.7b: Abschwächlänge λ_{S_z}

Abbildung 7.7: Verteilung der T-Werte und der Abschwächlänge λ_{S_z} für alle FHAC1-Szintillatoren der Außenabstastung.

Außenabtastung					
Szintillator- typ	\bar{T} -Werte	D [mm]	\bar{d} [mm]	N ^a	λ_{S_z} [mm]
EMC1	0.695±0.014	191	13.0	0	454±27
EMC2/3	0.679±0.010	191	13.0	2	427±17
EMC4/5	0.678±0.014	191	13.0	2	425±24
FHACØ	0.675±0.018	191	14.1	4	415±30
RHACØ	0.674±0.012	191	14.1	4	413±29
FHAC1	0.669±0.005	186	12.2	4	402±7
RHAC1	0.673±0.018	186	12.2	4	408±29
FHAC2	0.684±0.005	181	12.6	4	410±8
Innenabtastung					
EMC1	0.684±0.017	191	12.2	0	438±30
EMC2/3	0.669±0.012	191	12.2	2	415±19
FHAC1	0.663±0.009	186	11.6	4	396±13
FHAC2	0.681±0.007	181	12.3	4	408±10

^aN gibt die Anzahl der Aussparung für die Abstandshalter im Szintillator an.

Tabelle 7.1: \bar{T} -Werte aller Szintillatortypen und ihre Abschwächlängen λ_{S_z} für die Innen- und Außenabtastung. D ist die Breite der Szintillatoren. Es wurde über alle berechneten Werte gemittelt.

Er ist auf die Abstandshalter (vgl. Spalte N) zurückzuführen, die die Fläche der Auslekante der Szintillatoren des Typs EMC2/3 und EMC4/5 verkleinern, nicht aber die von Typ EMC1. Die Flächenverkleinerung wirkt sich auf die Lichtausbeute auf der dem ^{60}Co -Präparat zugewandten Seite kaum aus, da die Lichterzeugung sehr lokal an der Position des Präparats stattfindet, die nicht mit der Position des Abstandshalter zusammenfällt. Auf der gegenüberliegenden Seite wird aber stets die gesamte Auslekante ausgeleuchtet, so daß hier eine Flächenverkleinerung eine Verkleinerung der Signale \bar{I}_{RL} und \bar{I}_{LR} bewirkt.

Daß alle für die Innenabtastung ermittelten Abschwächlängen systematisch kleiner sind als die aus der Außenabtastung ermittelten, ist vermutlich eine Folge des zuvor beschriebenen Randeffekts. Mit abnehmendem Abstand des Präparates zu den Szintillatoren verkleinert sich die Abschwächlänge, wie es der Vergleich der Innen- mit der Außenabtastung darlegt. Exemplarisch für alle anderen Sektionen zeigt dies die Abbildung 7.8a mit den Häufigkeitsverteilungen der T-Werte aller HAC1-Szintillatoren, die mit beiden Abtastern vermessen wurden. Setzt man nun voraus, daß innerhalb der sechs Monate, in der diese Messungen durchgeführt wurden, keine Veränderung der optischen Eigenschaften der Szintillatoren eingetreten sind, so ist die Differenz der T-Werte, die in Abbildung 7.8b dargestellt wurde, nur eine Folge des Randeffekts und der ebenfalls damit zusammenhängenden Eindringtiefe und läßt sich durch die unterschiedlichen Abtastmethoden erklären.

Somit ist es günstiger ein Vergleichen der Ergebnisse der Innen- und Außenabtastung über diese Differenzen vorzunehmen.

Im Kapitel 8 wird dieser Zusammenhang noch einmal aufgegriffen.

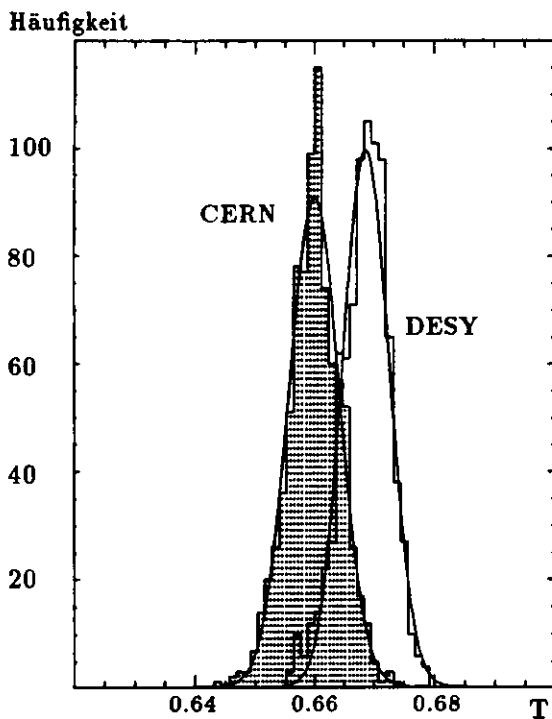


Abbildung 7.8a: T-Werte

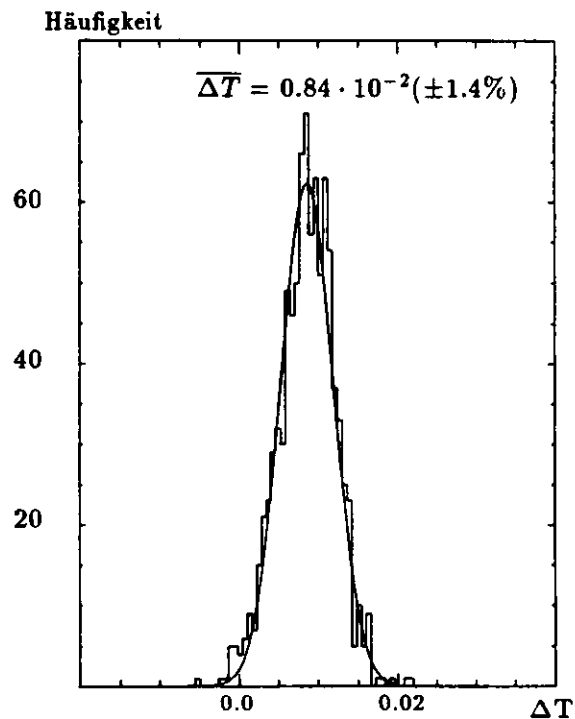


Abbildung 7.8b: Differenz ΔT der T-Werte

Abbildung 7.8: Verteilung der T-Werte für die Innenabtastung der CERN- und für die Außenabtastung der DESY-Messungen aller doppelt vermessenen HAC1-Szintillatoren. Die Mittelwerte für die T-Werte der Innen- und der Außenabtastung betragen $\bar{T}_{innen} = 0.659 (\pm 0.7\%)$, und $\bar{T}_{außen} = 0.669 (\pm 0.7\%)$.

Die Abschwächlänge der EMC-Szintillatoren wurde auch bei der Kalibration einiger Module mit Elektronenteststrahlen am CERN [CR1 90] bestimmt, indem Elektronen zentral und 60 mm in Richtung der Auslekante eingeschossen wurden. Bei diesen Messungen haben Rand- und Čerenkov-Effekte, wie sie hier beschrieben wurden, nur einen geringen Einfluß. Die ermittelte Abschwächlänge der Szintillatoren wurde auf $\lambda_{S_2} \approx 700 \text{ mm} (\pm 6\%)$ bestimmt. Dabei ist zu bedenken, daß bei den CERN-Messungen wie auch bei den ^{60}Co -Messungen keine absoluten, sondern effektive Abschwächlängen bestimmt wurden. Die Ergebnisse sind dadurch auch von der Methode abhängig und ein unmittelbarer Vergleich ist nicht möglich. Auch die CERN-Messungen zeigen, daß die Werte für den Szintillatortyp EMC1 größer sind als für den EMC2/3-Typ.

Kapitel 8

Nachweis von Strahlenschäden

Durch den HERA-Betrieb wird für die Szintillatoren und Wellenlängenschieber des ZEUS-Detektors eine Dosisleistung von etwa 300 Gy/a erwartet. Der Wert setzt sich aus den folgenden Beiträgen zusammen:

- ▷ Synchrotron Strahlung in der Nähe der Kollimatoren trägt je nach Abstand mit 10 Gy/a bis 100 Gy/a bei,
- ▷ niederenergetische Kernteilchen mit mehr als 20 MeV Energie mit 5 Gy/a, was sich durch den Einsatz von Abschirmungen um einen Faktor 3 reduzieren läßt,
- ▷ Neutronen mit 1 Gy/a,
- ▷ und Hadronen, die auf Absorbermaterial treffen, in 30 cm Entfernung mit 100 Gy/a.
- ▷ Die natürliche Aktivität des Urans liefert einen Beitrag von etwa 0.3 Gy/a.
- ▷ Hochenergetische Hadronen und Myonen aus Kollisionen zwischen Protonen und dem Restgas im Strahlrohr sind bei einer zu erwartenden Dosisleistung von 0.1 Gy/a vernachlässigbar.

Die hier gemachten Angaben beziehen sich auf stabile Arbeitsbedingungen, was tatsächlich gerade in der Anfangsphase des Betriebes nicht gewährleistet sein wird, so daß ein Sicherheitsfaktor von etwa 100 Gy/a mitberücksichtigt wurde.

In vielen Untersuchungen wurde gezeigt, daß Polymere und Fluoreszenzfarbstoffe der Szintillatoren und der Wellenlängenschieber unter dem Einfluß hochenergetischer Strahlung chemisch reagieren können, meist mit der Folge der Verschlechterung der Fluoreszenz- und Transmissionseigenschaften. Eine Zerstörung der Farbstoffmoleküle führt direkt zu einer Minderung der primären Lichtausbeute pro MeV deponierter Energie. Veränderung des polymeren Trägermaterials vergrößern die interne Absorption des Fluoreszenzlichts, was ebenfalls zur Verminderung der Lichtausbeute führt. Insgesamt kann es dadurch zu einer Abhängigkeit der Lichtausbeute vom Anregungsort kommen, was die Linearität des Zusammenhangs von deponierter Energie und nachgewiesenem Signal aufheben kann. Deshalb ist es von Interesse, die Größe eines Schadens und seine Ortsposition im Kalorimeter zu kennen.

In diesem Kapitel soll gezeigt werden, daß sich mit der ^{60}Co -Methode Alterungs- und Strahlenschäden nachweisen lassen.

Dabei werden die Szintillatoren und die Wellenlängenschieber aus zwei Gründen getrennt betrachtet:

- ▷ Der Wellenlängenschieber wird durch das Licht von bis zu 80 Szintillatoren auf einer Länge von maximal 640 mm anregt. Zwecks eines homogenen, also vom Ort unabhängigen Nachweises, ist jeder Wellenlängenschieber mit einem kompensierenden Rückwandreflektor ausgestattet. Bei einer Änderung der Transmissionseigenschaften des Wellenlängenschiebers ist sein Ansprechverhalten nicht mehr vom Anregungsort unabhängig, wodurch die Beiträge der verschiedenen Szintillatoren mit unterschiedlichem Gewicht eingehen. Für die Szintillatoren ist dieser Effekt vernachlässigbar, da seine maximale Länge nur 191 mm beträgt, und die Auslese von zwei Seiten erfolgt.
- ▷ Das Basismaterial des Szintillators (Polystyrol) und das des Wellenlängenschiebers (PMMA) unterscheidet sich zum einem in der Größe eines permanenten Strahlenschadens (Endschaden) und zum anderem in dem Regenerationsverhalten (Ausheilung) von strahleninduzierten Absorptionszentren (Anfangsschaden).

Bei den Strahlenschäden für Wellenlängenschieber und Szintillator wird zwischen dem momentanen und dem permanenten Schaden unterschieden, um den Prozeß der Regeneration, der bei diesen Materialien unter dem Einfluß von Sauerstoff einsetzt, besser beschreiben zu können. Während bei der Polystyrol-Matrix des Szintillators der Strahlenschaden unter dem Einfluß von Sauerstoff innerhalb weniger Tage auf einen festen Endschaden zurückgeht, dauert der Prozeß der Regeneration bei PMMA erheblich länger an und führt bei gleicher absorbierten Dosis zu einem größeren Endschaden. Zur Beschreibung eines Strahlenschadens wird die Größe $\Delta\mu$ eingeführt, die die Differenz der Absorptionskoeffizienten vor und nach der Bestrahlung ist und für PMMA bei nicht zu großen Dosen linear mit der absorbierten Dosis ansteigt.

8.1 Strahlen- und Alterungsschäden an den Wellenlängenschiebern

Bevor die Möglichkeiten aufgeführt werden, mit der ^{60}Co -Methode Schäden an Wellenlängenschiebern nachzuweisen, soll die Inhomogenität als Funktion der Strahlendosis abgeschätzt werden [WIC 92]. Wie in Kapitel 6 wird ein Wellenlängenschieber mit einem End- und Rückwandreflektor betrachtet. Allerdings wird dazu ein Koordinatensystem eingeführt, das seinen Nullpunkt an der Position des Endreflektors hat (entgegengesetzt zu dem in Kapitel 6). Der Wellenlängenschieber mit der Gesamtlänge L ist mit einem Rückwandreflektor der Länge W ausgestattet. Der Intensitätsverlauf I_M ergibt sich dann zu:

$$I_M(Z) = [1 + f(Z)] \cdot \frac{1}{1+r} \cdot I(Z=0) \cdot [e^{\mu \cdot Z} + r \cdot e^{-\mu \cdot Z}] ,$$

mit

I_M	=	Intensitätsverlauf mit Rückwandreflektor,
Z	=	Ortskoordinate,
μ	=	Absorptionskoeffizient,
r	=	Reflexionskoeffizient am Al-Endreflektor (92%),
$f(Z)$	=	Lichtgewinn durch den Rückwandreflektor.

Bei einem kompensierten Wellenlängenschieber ist der Intensitätsverlauf in dem Bereich $0 < Z < W$ konstant. Für einen Wellenlängenschieber mit Strahlenschäden folgt:

$$I'_M(Z) = [1 + f(Z)] \cdot \frac{1}{1+r} \cdot I'(Z=0) \cdot [e^{\mu' \cdot Z} + r \cdot e^{-\mu' \cdot Z}] , \quad (8.1)$$

$$I'(Z=0) = q \cdot e^{-\Delta\mu \cdot L} . \quad (8.2)$$

mit

$I'(Z=0)$	=	Strahleninduzierte Minderung der primären Lichtausbeute,
I'_M	=	Intensitätsverlauf nach Bestrahlung,
μ'	=	$\mu + \Delta\mu$,
$\Delta\mu$	=	durch Bestrahlung induzierte Absorption = konst. Dosis = $c \cdot D$,
q	=	Korrektur zur Berücksichtigung der durch Bestrahlung verminderten primären Fluoreszenzlichtausbeute. Bei den hier betrachteten Strahlendosen ist $q=1$.

Nimmt man einen über die Länge des Wellenlängenschiebers homogenen Strahlenschaden an, ergibt sich die durch Bestrahlung induzierte Inhomogenität ξ in dem aktiven Bereich ($0 < Z < W$):

$$\xi = \left| \frac{I'_M(Z=W)}{I'_M(Z=0)} - 1 \right| . \quad (8.3)$$

Aus Gleichung (8.1) - (8.3) und $\Delta\mu = c \cdot D$ folgt:

$$\xi(D) = \left| \frac{e^{(\mu+c \cdot D) \cdot W} + r \cdot e^{-(\mu+c \cdot D) \cdot W}}{e^{\mu \cdot W} + r \cdot e^{-\mu \cdot W}} - 1 \right| . \quad (8.4)$$

Die Abbildung 8.1 zeigt die Darstellung der Gleichung (8.4) für die EMC- und HAC-Wellenlängenschieber. Dabei wurde jeweils der kleinste und der größte aus den ^{60}Co -Messungen ermittelte Wert für die Abschwächlänge eingesetzt. Allerdings muß für $\Delta\mu$ unterschieden werden, ob der permanente Strahlenschaden nach völliger Regeneration ($c_1 = 0.4 \cdot 10^{-6} \text{Gy}^{-1} \text{cm}^{-1}$) oder unmittelbar nach der Bestrahlung mit einem hohen Anfangsschaden ($c_2 = 3.8 \cdot 10^{-6} \text{Gy}^{-1} \text{cm}^{-1}$) betrachtet wird [B1C 91]. Da zur Zeit keine gesicherten Erkenntnisse für die Langzeitbestrahlung bei sehr niedrigen Dosisleistungen vorliegen, wurde der optimistischere Wert (c_1) nach völliger Regeneration benutzt.

Als Inhomogenität wird die Größe ξ (siehe Beziehung (8.3)) bezeichnet, die sich aus der Differenz der maximalen Abweichung von der als gleichförmig entlang des Wellenlängenschiebers verlaufend angenommenen ursprünglichen Photomultiplierantwort ergibt.

Eine vierprozentige Abweichung von dieser Idealantwort tritt bei den EMC-Wellenlängenschiebern bei einer Dosis von 14 bis 20 kGy ein. Bei den HAC-Wellenlängenschiebern ist diese Abweichung schon bei 2.5 bis 4 kGy erreicht, je nachdem wie groß die Abschwächlänge ist. Die Unterschiede der Ergebnisse ergeben sich sowohl durch die unterschiedlichen Längen des aktiven Bereichs als auch durch die unterschiedliche Gesamtlänge des Wellenlängenschiebers.

Bei der im ZEUS-Detektor zu erwartenden Dosisleistung von 300 Gy/a ist mit einer signifikanten Änderung der Homogenität im Antwortverhalten der Wellenlängenschieber unter der Annahme, daß eine Regeneration der Strahlenschäden möglich ist, in den ersten Betriebsjahren nicht zu rechnen.

Gleichung (8.2) gibt die Möglichkeit, die Abnahme der absoluten Lichtausbeute der Wellenlängenschieber abzuschätzen, wodurch die Länge des inaktiven Bereichs miteinbezogen werden kann.

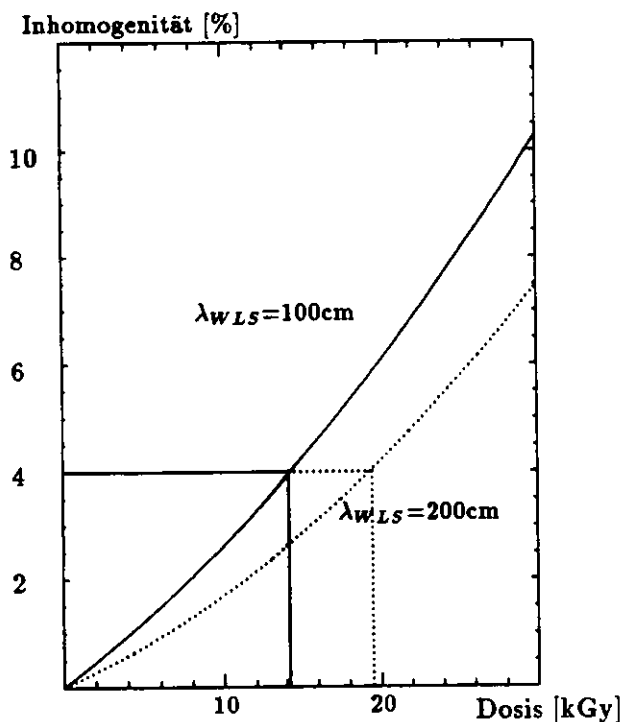


Bild 8.1a: EMC-Wellenlängenschieber

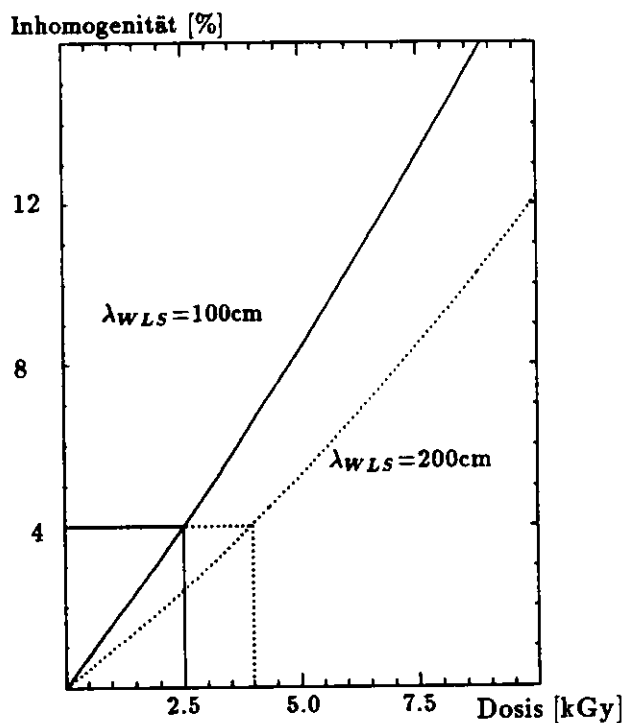


Bild 8.1b: HAC-Wellenlängenschieber

Abbildung 8.1: Änderung des Antwortverhaltens bestrahlter HAC- und EMC-Wellenlängenschieber als Funktion der absorbierten Dosis. Für die Abschwächlängen wurden der kleinste und größte ermittelte Wert der Serienmessung benutzt.

Es zeigt sich, daß die Lichtausbeute für die EMC-Wellenlängenschieber doppelt so schnell abnimmt, wie die der kurzen HAC2-Wellenlängenschieber. Eine Zeitabschätzung erscheint aufgrund der Ungewißheit bzgl. der Benutzung von End- oder Anfangsschaden als zu gewagt. Nähere Informationen kann in der Diplomarbeit von V. Schlottman [SCH 92] nachgelesen werden.

Zur Bestimmung einer Veränderung in dem Antwortverhalten bei den Wellenlängenschiebern mit der ^{60}Co -Methode gibt es zwei unterschiedliche experimentelle Möglichkeiten.

Die eine Methode besteht darin, einen Vergleich der Photomultiplierantworten für jede einzelne Szintillatorposition vorzunehmen. Eine Änderung der optischen Eigenschaft des Wellenlängenschiebers wird sich mit zunehmendem Abstand zum Photomultiplier in einer stetigen Vergrößerung der Differenzen der Photomultiplierantworten zum Zeitpunkt t und zum Zeitpunkt $(t+\Delta t)$ auswirken.

Dabei wird vorausgesetzt, daß eine Änderung im optischen Verhalten der Szintillatoren über einen gesamten Turm konstant ist. Dies ist nur der Fall für Alterungsschäden und Strahlenschäden, die durch die Uranaktivität verursacht wurden, und nicht für Schäden, die auf das Strahlungsfeld der Synchrotronstrahlung oder hochenergetischen Teilchen zurückgehen.

In der Abbildung 8.2 sind die Quotienten der einzelnen Szintillatorpositionen aus je zwei ^{60}Co -Läufen mit einem Zeitunterschied von sechs Monaten (obere Kurve) und von einem Tag (untere Kurve) dargestellt. Durch eine Änderung in der Abschwächlänge λ_W des Wellenlängenschiebers wird Licht eines Szintillators nahe dem Photomultiplier nicht so sehr beeinflusst sein, wie das Licht des ersten Szintillators, das 640 mm mehr Weglänge zurückzulegen hat. In der in Abbildung 8.2 gewählten Darstellungsform würde sich eine Verschlechterung der Transmission durch eine negative Steigung ausdrücken.

Die Auswertung des Moduls FCD2 ergab jedoch keinen Hinweis auf eine Veränderung der Wellenlängenschiebereigenschaften. Auch die Betrachtung des Moduls FNL4 ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Vergleich der Außenabtastung (Oktober 90) mit der Innenabtastung (September 90) am DESY und der Innenabtastung (April 90) am CERN.

Eine Abschätzung der Größenordnung des zu erwartenden Effektes mit Hilfe der Gleichung (8.1) kann aufgrund der unbekanntenen Größe $f(Z)$, die den Einfluß des Rückwandreflektors beschreibt, nur sehr grob vorgenommen werden.

Bei einer Verkleinerung der Abschwächlänge λ_W um 10% ergibt sich in diesem Modell eine Änderung des Quotientens $Q = \bar{I}(Z,t)/\bar{I}(Z,t+\Delta t)$ über 640 mm - der Länge des längsten aktiven Bereichs - von $\Delta Q = 1 - 4\%$. Die Änderung des Quotienten hängt von der Größe der Abschwächlänge ab. Sie wurde zwischen 100 cm und 200 cm angenommen. Änderungen in den Photomultiplierantworten, die zu einem ΔQ von mehr als einem Prozent führen, werden sich mit der ^{60}Co -Methode nachweisen lassen.

Falls überhaupt ein Einfluß des Rückwandreflektors auf diese Änderung zu erwarten ist, wird er den zu erwartenden Effekt verkleinern.

Die zweite Methode besteht darin, die berechneten Abschwächlängen aus den Serienmessungen mit denen einer Wiederholungsmessung zu vergleichen (siehe dazu Kapitel 6).

Dabei ist zu bedenken, daß die genauesten Daten hierzu mit der Methode der Innenabtastung erzielt werden konnten. Eine Änderung der Abschwächlänge von mehr als 11% wird sich bei Wiederholungsmessungen mit der Innenabtastung nachweisen lassen. Werden die Wiederholungsmessungen mit der Methode der Innenabtastung durchgeführt, lassen sich auch die Quotienten (W_L/W_R) und (S_L/S_R) zur Analyse der Ergebnisse mit heranziehen.

Im Anhang D befindet sich ein Lageplan der in den ZEUS-Detektor eingebauten Module mit der in dieser Arbeit benutzten Namensgebung. Aus dieser Aufstellung ist auch entnehmbar, welcher Modul mit der Innen- bzw. mit der Außenabtastung vermessen wurde.

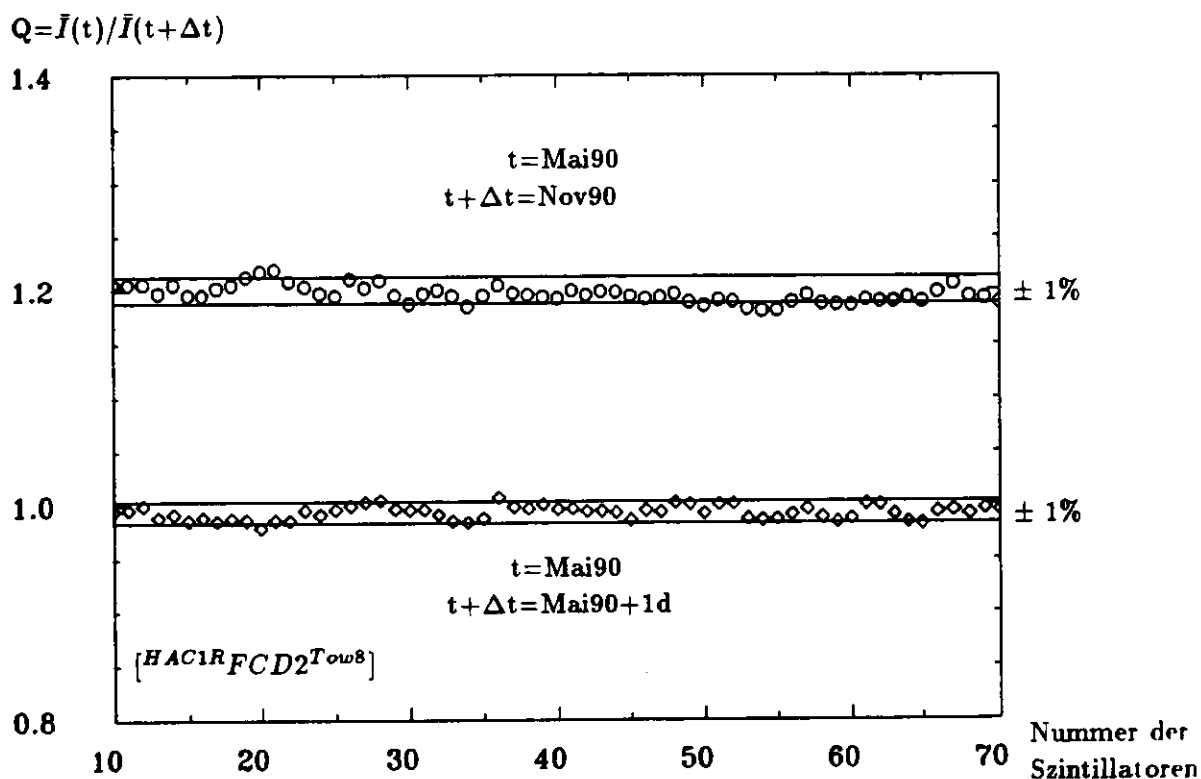


Abbildung 8.2: Quotienten aus jeweils zwei ^{60}Co -Läufen mit einem zeitlichen Abstand von 6 Monaten (obere Kurve) und von einem Tag (untere Kurve). Wegen der Benutzung von Präparaten unterschiedlicher Aktivität liegen die Werte des Quotienten der oberen Kurve bei 1.2.

Der Modul FCD2 ist somit der einzige Modul, der mit der Innenabtastung vermessen wurde und sich direkt am Strahlrohr befindet, so daß am Turm12 von FCD2 am frühesten eine Veränderung der optischen Eigenschaften nachweisbar sein wird.

Diesen Abschnitt abschließend soll diskutiert werden, ab welcher absorbierten Dosis D ein Strahlenschaden eintritt, der zu einer meßbaren Änderung der Abschwächlänge λ_W führt. Dazu wird der folgende Ansatz betrachtet:

$$\Delta\mu = \frac{1}{\lambda_{W,c}} - \frac{1}{\lambda_W}, \quad (8.5)$$

mit

$$\begin{aligned} \lambda_{W,c} &= \text{Abschwächlänge nach Bestrahlung,} \\ \lambda_W &= \text{Abschwächlänge zum Zeitpunkt der Durchführung der Serienmessungen,} \\ \Delta\mu &= c \cdot D. \end{aligned}$$

Dabei wurde abweichend von den Werten von B. Bicken, die für die eingangs durchgeführten Abschätzungen benutzt wurden, für den konstanten Anteil der durch Bestrahlung induzierten Absorptionzentren der Wert $c = (0.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-7} \text{Gy}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ benutzt [BUS 92].

Dann ergibt sich für die EMC-Wellenlängenschieber folgende Abschätzung:

1. Fall (FEMC): Die Abschwächlänge wird mit $\lambda_W \approx 1900 \text{mm}$, die Reproduzierbarkeit σ / λ_W mit ($\approx \pm 11\%$) (für die Innenabtastung) angenommen. Damit beträgt die Nachweisgrenze etwa ($\approx 22\%$), womit $(\lambda_{W,c})_{\text{grenz}} = 0.8 \cdot \lambda_W$ ist. Ein Schaden ist dann nachweisbar, falls die absorbierte Dosis größer als die ermittelte Dosis (D_{grenz}) ist:

$$D_{\text{grenz}} = (\Delta\mu)_{\text{grenz}} \approx 2500 \text{Gy.}$$

2. Fall (REMC): Die Abschwächlänge wird mit $\lambda_W \approx 1450 \text{mm}$, die Reproduzierbarkeit mit ($\approx \pm 15\%$) (Außenabtastung) und damit die Nachweisgrenze mit ($\approx 30\%$) angenommen. Die Grenzdosis ergibt sich für REMC dann zu: $D_{\text{grenz}} \approx 5000 \text{Gy}$.

Um tatsächlich Strahlenschäden nachweisen zu können, wird es notwendig sein, frühzeitig Wiederholungsmessungen an den eingebauten Modulen durchzuführen, um den dafür wichtigen Nachweis zu führen, daß die Ergebnisse der Serienmessungen als Referenzwerte einsetzbar sind.

8.2 Strahlen- und Alterungsschäden an den Szintillatoren

Für den Nachweis von Alterungs- und Strahlenschäden an Szintillatoren kann mit der ^{60}Co -Methode nur der Parameter T aus dem Ansatz auf Seite 88 herangezogen werden. T ist nur vollständig bestimmt, wenn wenigstens ein ^{60}Co -Lauf auf jeweils einer Modulseite vorhanden ist.

Mit dem Außenabtaster für die installierten Module ist diese Voraussetzung nicht erfüllt. Als möglicher Parameter läßt sich nur $T \cdot (W_L/W_R)$ gewinnen. Die Auswertung der Serienmessungen hat jedoch gezeigt, daß der Parameter (W_L/W_R) größeren Schwankungen unterliegt als der Parameter T (bis zu einem Faktor 5). Die T -Werte einzelner Sektionen konnten für die Innenabtastung mit einer Genauigkeit von ungefähr einem halben Prozent ermittelt werden. Diese Genauigkeit ist nötig, um nach einigen Jahren Betriebszeit eine Veränderung der optischen Eigenschaften der Szintillatoren festzustellen.

Bei der Außenabtastung für die bereits eingebauten Module wird die Bestrahlung mit dem Eichpräparat nur von einer Seite aus (rechts) möglich sein. Als bestimmbare Größe steht dann der folgende Ausdruck zur Verfügung:

$$Q = \frac{I_{RL}}{I_{RR}} = \frac{W_L}{W_R} \cdot T. \quad (8.6)$$

Der Vergleich von zwei Messungen am gleichen Wellenlängenschieber zu den Zeiten t_1 und t_2 (mit $t_2 > t_1$) ergibt dann:

$$\frac{Q_1(t_1)}{Q_2(t_2)} = \frac{(I_{RL}/I_{RR})_1}{(I_{RL}/I_{RR})_2} \begin{cases} = 1 & : \text{keinen Schaden} \\ > 1 & : \text{Strahlenschaden} \end{cases}$$

falls sich das Antwortverhalten der Wellenlängenschieber W_L und W_R in der Zwischenzeit nicht geändert hat. Andernfalls ist es nötig W_L und W_R , wie im Abschnitt zuvor beschrieben, zu bestimmen. Die Unsicherheit bei diesem Verfahren ist durch die Reproduzierbarkeit der Einzelmessungen ($I=^{60}\text{Co}/\text{UNO}$) gegeben und beträgt, wie bereits erwähnt, zwischen ein und zwei Prozent. was bedeutet, daß solche Messungen erste Hinweise auf mögliche Strahlenschäden geben können.

Für die Verwendung der Ergebnisse der Serienmessungen wird es darauf ankommen, inwieweit sich die Ergebnisse der beiden Abtastmethoden aufeinander beziehen lassen. Die Abbildung 7.8 a zeigt die Verteilung der T-Werte für die Innen- und Außenabtastung. Soll eine Änderung der T-Werte gemessen werden, ist es notwendig, den offensichtlich durch den auf Seite 96 beschriebenen Randeffekt und der Eindringtiefe bestimmten Unterschied abzuschätzen.

Ein einfacher Ansatz dazu ist:

$$T^{\text{außen}} = T^{\text{innen}} \cdot (1 + \epsilon) = T^{\text{innen}} + \Delta T$$

mit

$$\epsilon = \text{unterschiedliche Auswirkung des Randeffekts für Innen- und Außenabtastung.}$$

Dieser Ansatz folgt aus der Tatsache, daß eine Änderung der Lichtausbeute im Randbereich des Szintillators nur auf der Seite stattfindet, auf der sich das Präparat befindet ($I_{KL}^{\text{außen}} \rightarrow I_{KL}^{\text{innen}} \cdot [1 + \epsilon]$).

Schäden, die durch Alterung oder aber durch die für alle Szintillatoren gleichmäßige Strahlenexposition durch das Uran entstanden sind, werden sich in den T-Werten durch eine über den gesamten Bereich konstante Minderung zeigen. Schäden, erzeugt durch Synchrotronstrahlung oder durch die hochenergetischen Primärteilchen, werden sich nur in kleineren Gruppen von Szintillatoren bemerkbar machen. Die Serienmessungen sind fast vollständig mit dem Außenabtaster vorgenommen worden, während zukünftige Messungen zu den Untersuchungen der T-Werte mit dem Innenabtaster durchgeführt werden müssen. Zum Vergleich der erhaltenen Ergebnisse ist eine Angleichung der T-Werte somit unerlässlich. Dies ist möglich, da die Analyse der bisherigen Daten für die Innen- und Außenabtastung auch nach unterschiedlich langen Zeitdifferenzen innerhalb der Fehler gleiche T-Werte erbrachte. Es ist somit nicht von einem bereits entstandenen Strahlenschaden auszugehen, was auch aufgrund der bisherigen Erkenntnisse über Strahlenschäden nicht zu erwarten gewesen wäre.

Die Tabelle 8.1 enthält die Mittelwerte der Verteilungen für die Differenzbildung von T(außen)-T(innen) und die ϵ -Werte. Die Fehlerangabe bezieht sich auf den Mittelwert und wurde durch σ/\sqrt{n} ermittelt. Es wurden stets nur diejenigen Türme betrachtet, die mit der gleichen Transportröhrenposition vermessen wurden.

ΔT - und ϵ -Werte der FCAL-Szintillatoren				
	EMC1	EMC2/3	FHAC1	FHAC2
ΔT	0.0033 ± 0.0137	0.0031 ± 0.0125	0.0084 ± 0.0036	0.0059 ± 0.0037
ϵ	1.0055 ± 0.0193	1.0019 ± 0.0196	1.0129 ± 0.0045	1.0088 ± 0.0045

Tabelle 8.1: Die ΔT - und die ϵ -Werte für die Außen- und Innenabtastung beim FCAL. Die großen Fehler bei den EMC-Szintillatoren ist auf die geringe Anzahl von Vergleichswerten zurückzuführen.

Wegen der unterschiedlichen Transportröhrenpositionen bei FCAL und RCAL wird eine Übertragung der ΔT - und ϵ -Werte auf das RCAL nicht ohne weiteres möglich sein. Hierfür muß ferner auch noch die unterschiedliche mittlere Eindringtiefe \bar{d} mitberücksichtigt werden. Der Randeffekt ist aber eine Funktion der Eindringtiefe, so daß ihre rechnerische Berücksichtigung nicht zweckmäßig erscheint. Für die FCAL-Daten war dies möglich, weil mit der Innen- und der Außenabtastung gleiche Türme an gleichen Transportröhrenpositionen vermessen wurden und daher auf den Einsatz der berechneten mittleren \bar{d} -Werte verzichtet werden konnte. Die RCAL-Module wurden ausschließlich mit dem Außenabtaster vermessen.

Mit Hilfe der geplanten ^{60}Co -Messungen an einem Blei/Szintillator-Kalorimeter muß zunächst einmal die Tauglichkeit des Ansatzes unter Beweis gestellt werden, um dann im weiteren den Zusammenhang für die Innen- mit der Außenabtastung des RCAL-Kalorimeters zu zeigen.

Untersuchungen zur Strahlenbeständigkeit der Szintillatoren ergaben, daß sich der Anfangsschaden bei einer Dosis von 2 kGy innerhalb von 4-10 Tagen unter Einfluß von Sauerstoff auf einen festen Endschaden einstellt, der zu einer Änderung in der Abschwächlänge λ_{Sz} von 5-10% führt. Überträgt man diese Änderung auf die T-Werte der ^{60}Co -Messungen, so ist bei dieser Strahlendosis von 2 kGy eine Änderung von etwa 2-4% zu erwarten. Diese Änderung stellt für die ^{60}Co -Methode die untere Nachweisgrenze dar. Bei einer zu erwartenden Dosisleistung von 300 Gy/a ist ebenfalls für die Szintillatoren in den nächsten Jahren unter „normalen“ Bedingungen keine signifikante Änderung der optischen Eigenschaften zu erwarten.

Kapitel 9

Die longitudinale Homogenität der Kalorimetersektionen

^{60}Co -Messungen eignen sich insbesondere für die Untersuchungen der longitudinalen Homogenität der Kalorimetersektionen, da das Antwortverhalten eines jeden einzelnen Szintillators bestimmt werden kann. Alle anderen im Kalorimeter eingesetzten Kalibrationsmethoden mitteln stets über die gesamte Sektion. Lokale Unterschiede im Ansprechverhalten, die zu Fehlern in der Kalibrationskonstanten führen können, weil die Verteilung der Energiedeposition auf die Szintillatoren von der Energie selbst abhängt, werden dabei nicht berücksichtigt.

Im folgenden soll ein Verfahren gezeigt werden, das eine rechnerische Behandlung von Inhomogenitäten ermöglicht [ROS 86, GIA 89]. Die durch Materialunterschiede hervorgerufenen Fluktuationen werden nicht berücksichtigt.

Für elektromagnetische Schauer kann die longitudinale Verteilung der Schauerenergie auf die Szintillator/Uran-Lagen auf folgende Weise parametrisiert werden [PAR 90]:

$$f(E_0, Z) = \frac{b^{a+1}}{\Gamma(a+1)} Z^a e^{-bZ}, \quad \int_0^{\infty} f(E_0, Z) dZ = 1, \quad (9.1)$$

mit

$$\begin{aligned} E_0 &= \text{Energie des Primärteilchens,} \\ Z &= \text{Ortsposition entlang der Schauerachse.} \end{aligned}$$

Mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen konnte in [ROS 86] gezeigt werden, daß die Parameter a und b eine logarithmische Abhängigkeit von der Energie besitzen:

$$a = a_1 + a_2 \cdot \ln E_0[\text{GeV}] \quad \text{und} \quad b = b_1 + b_2 \cdot \ln E_0[\text{GeV}].$$

Die Abbildung 9.1 zeigt das Schauerprofil für Elektronen verschiedener primärer Teilchenenergie (1 GeV, 15 GeV und 50 GeV). Dabei sind $a_1=1.15$, $a_2=0.54$, $b_1=0.395/X_0[\text{cm}]$ und $b_2=0.022/X_0[\text{cm}]$. Die Strahlungslänge X_0 beträgt für EMC-Sektionen $X_0=0.74 \text{ cm}$. Dem Verlauf des Schauerprofils ist zu entnehmen, daß bei 1 GeV primärer Teilchenenergie das Maximum bei der dritten Szintillator/Uran-Lage liegt. Für 15 GeV liegt es bereits bei der sechsten Lage.

Allgemein läßt sich feststellen, daß mit zunehmender Teilchenenergie das Maximum tiefer im Kalorimeter liegt und sich die mittlere Breite des Schauerprofils vergrößert. Durch die Verbreiterung des Schauerprofils kommt es zu einer Verkleinerung des Einflusses von longitudinalen Inhomogenitäten.

$L(Z)$ sei die normierte Funktion, die die nachgewiesene Lichtausbeute einer an der longitudinalen Position Z deponierten Energie beschreibt.

$$\int_0^{\infty} L(Z) dz = 1 \quad (9.2)$$

Dann ist die gemessene Antwort A des Kalorimeters:

$$k \cdot A = E_0 \int_0^{Z^*} f(E_0, Z) \cdot L(Z) dZ, \quad (9.3)$$

mit

k = Kalibrationskonstante.

Dabei wird vorausgesetzt, daß die longitudinale Ausdehnung des Kalorimeters groß genug ist, um die gesamte Schauerenergie aufnehmen zu können. Ist $L(Z)$ für jede Ortsposition Z konstant, erhält man eine proportionale Kalorimeterantwort A zu der Teilchenenergie E_0 . Andernfalls ist die Antwort des Kalorimeters für verschiedene Energien mit verschiedenen Faktoren gewichtet. Mit Hilfe der Gleichung 9.3 läßt sich somit der Einfluß von Inhomogenitäten abschätzen.

Als einfaches Beispiel für eine Inhomogenität wird eine Geradenfunktion der folgenden Form gewählt:

$$L(Z) = 1.0 - \frac{1}{2} \cdot \Delta + \Delta \cdot \frac{Z}{Z^*}, \quad (9.4)$$

mit

Δ = prozentuale Abweichung der Lichtausbeute am Anfang und Ende der EMC-Sektion,

Z^* = Gesamtlänge der EMC-Sektion (19.3 cm).

Die Größe Δ beschreibt die Abweichung der Lichtausbeute zwischen dem vorderen und dem hinteren Bereich der Sektion. Ein positives Δ bedeutet, daß die vorderen Szintillatoren ein schwächeres Signal als die hinteren liefern.

Ist A_c die Kalorimeterantwort für die Kalibrationsenergie E_c und A die Antwort für die Energie E_0 , dann beschreibt die Größe $Q=100 \cdot (A-A_c)/A_c$ die prozentuale Änderung der Kalibrationskonstanten. Die Abbildung 9.2 zeigt Q als Funktion der Energie und des Parameters Δ für eine Kalibrationsenergie von 15 GeV. Dabei wurde angenommen, daß die Kalibration bei einem inhomogenen Antwortverhalten durchgeführt wurde. Wird die Kalibration bei einem homogenen longitudinalen Ansprechverhalten durchgeführt, erhöht sich Q noch um wenige Prozent, je nach Größe des Wertes Δ .

Inhomogenitäten in dem longitudinalen Ansprechverhalten des Kalorimeters von 10% führen zu einer Abweichung von maximal 1% in der Kalorimeterantwort. Um eine Genauigkeit der Energiemessung von $\pm 1\%$ im Energiebereich von 1-100 GeV zu erhalten, ist eine maximale Inhomogenität von $\Delta=10\%$ erlaubt. Wird berücksichtigt, daß in die Abschätzung keine weiteren Effekte eingegangen sind, ist die

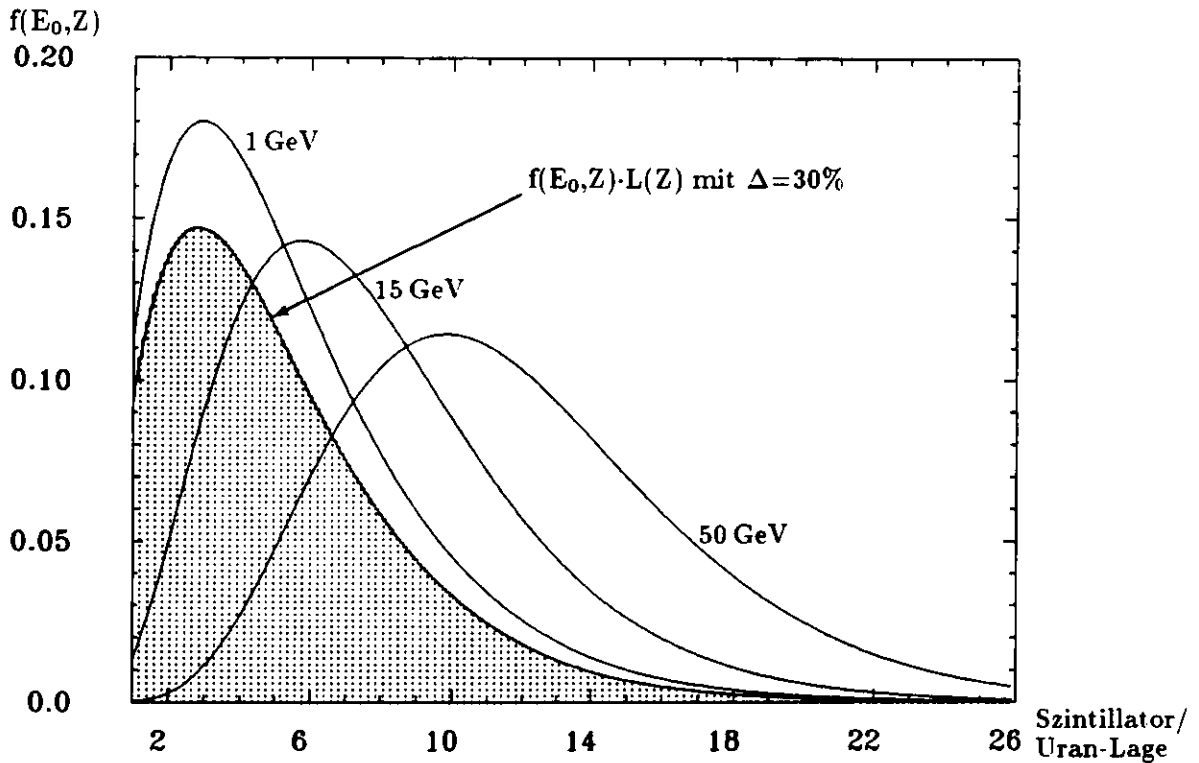


Abbildung 9.1: Longitudinales Schauerprofil für Elektronen mit unterschiedlicher primärer Teilchenenergie (Strahlungslänge $X_0 = 0.74$ cm). Das schraffierte Schauerprofil zeigt die Änderung bei einer Inhomogenität von $\Delta = 30\%$ für eine Teilchenenergie von 1 GeV. Es werden 5.8% weniger Energie nachgewiesen.

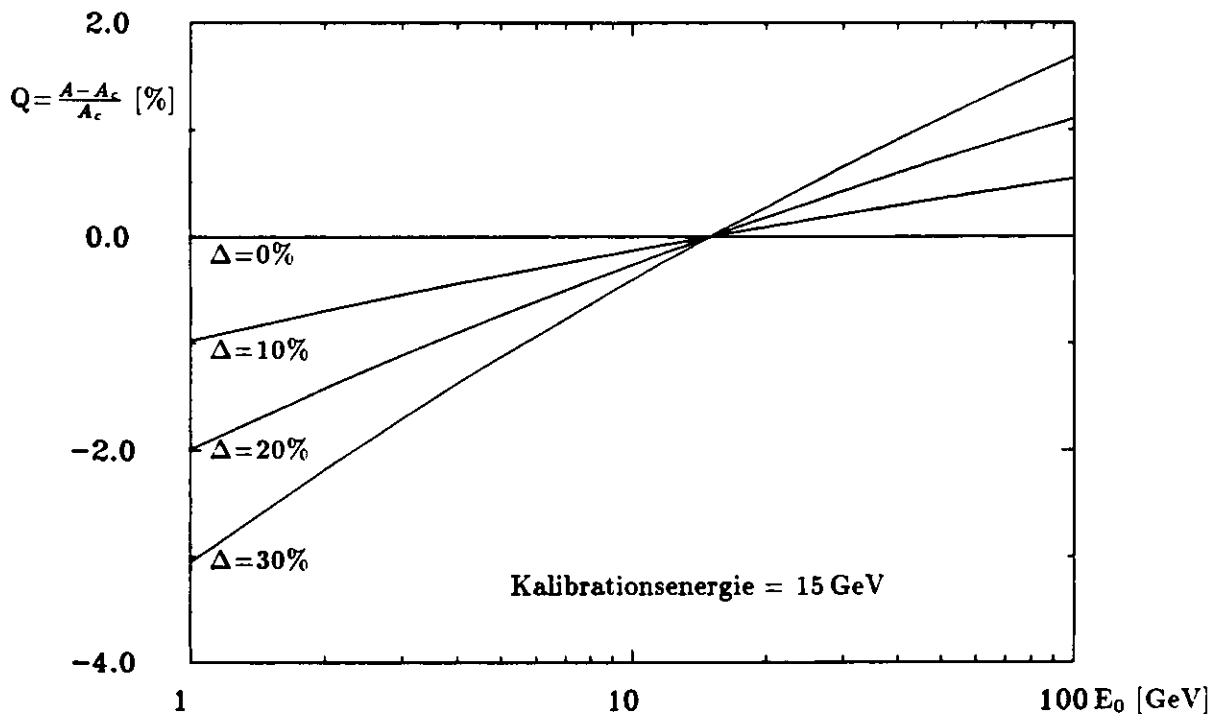


Abbildung 9.2: „Relativer Fehler“ der Kalibrationskonstanten für verschiedene longitudinale Inhomogenitäten ($\Delta = 10\%$, $\Delta = 20\%$ und $\Delta = 30\%$) als Funktion der Energie. Der Anteil an Energie, der noch in die erste hadronische Sektion gelangt, wurde mitberücksichtigt. Das longitudinale Ansprechverhalten wurde in diesem Bereich als homogen angenommen.

sind. ist die maximale Inhomogenität niedriger anzusetzen, so daß sich sagen läßt, daß unterhalb einer Inhomogenität von $\Delta=7\%$ der Einfluß auf die Linearität der Energiemessung kleiner als 1% ist.

Eine Abschätzung für die hadronischen Sektionen läßt sich unter Zuhilfenahme einer Parametrisierung des hadronischen Schauerprofils ebenfalls durchführen. Es zeigt sich dabei, daß das Schauerprofil sehr viel breiter ist als für die elektromagnetischen Sektionen. Die deponierte Energie verteilt sich auf erheblich mehr Szintillatoren, wodurch die Auswirkungen von Inhomogenitäten deutlich kleiner werden.

Auf die Durchführung der Abschätzung wurde verzichtet. Die erzielten Ergebnisse für die EMC-Sektionen lassen sich als obere Abschätzung für die HAC-Sektionen übertragen.

Wegen der Vielfalt in der Gestalt der gefundenen longitudinalen Inhomogenitäten (siehe Kapitel 5) wurde eine Parametrisierung der unterschiedlichen Lichtausbeutefunktion $L(Z)$ zur Abschätzung der Auswirkungen nicht durchgeführt, zumal der Ansatz 9.4 eine der schwerwiegendsten Inhomogenitäten beschreibt.

9.1 Homogenität der hadronischen Sektionen

Inhomogenitäten in den hadronischen Sektionen lassen sich unter Vernachlässigung des Randbereichs relativ einfach bestimmen. Bei einer homogenen Photomultiplierantwort ist jede einzelne Szintillatorantwort in etwa gleich. Bestimmt man eine mittlere Szintillatorantwort einer Sektion, ist die Abweichung der einzelnen Szintillatorantworten vom Mittelwert ein direktes Maß für die Inhomogenität der Sektion. Allerdings muß dabei berücksichtigt werden, daß nicht jede mit der ^{60}Co -Methode gemessene Inhomogenität einen direkten Einfluß auf das Experiment haben wird. Während im Experiment im wesentlichen ein größerer Bereich der Szintillatorfläche angeregt wird, findet die Anregung bei der ^{60}Co -Methode nur im Randbereich der Szintillatoren statt. Zur Energiebestimmung in einer Sektion wird im Experiment die Summation der Photomultiplierantwort beider Ausleseseite betrachtet. Dieses Verfahren mildert beispielsweise den Einfluß von Störungen am Wellenlängenschieber in ihren Auswirkungen ab.

Effekte, die auf die Szintillatoren selbst zurückgehen, betreffen sie die Lichterzeugung oder Lichttransmission, werden hingegen auch im Experiment uneingeschränkt zur Wirkung kommen.

Um für das Experiment eine annähernd vergleichbare Aussage machen zu können, bietet es sich an, ebenfalls die Signale beider Seiten zu addieren. Dazu werden jeweils die Signale¹ für beide Anregungsseiten und beide Ausleseseiten summiert ($\bar{I}_{LL} + \bar{I}_{LR} + \bar{I}_{RR} + \bar{I}_{RL}$). Auf diese Weise sind insbesondere die durch die ^{60}Co -Methode überbetonten Stapelfehler eliminiert. Die Häufigkeitsverteilung liefert eine mittlere Standardabweichung von $\langle \sigma \rangle = 1.4\%$ [GLO 91] für die HAC-Sektionen des FCALs. Die mittlere Standardabweichung $\langle \sigma \rangle = 2.8\%$ für die HAC-Sektionen des RCALs zeugt für eine schlechtere longitudinale Homogenität des RCALs. Dieses Verhalten zeigte sich auch bei der Analyse der T-Werte.

Allerdings muß allgemein die Einschränkung gemacht werden, daß nicht alle Ursachen der Inhomogenitäten geklärt werden konnten und somit nicht klar ist, inwieweit diese einen Einfluß auf das Experiment haben werden. Die Meßmethode selbst scheint aufgrund der guten Reproduzierbarkeit der Signale nicht als Ursache für die Inhomogenitäten in Frage zu kommen. Eine Klärung könnten die geplanten Messungen an dem bereits erwähnten Blei/Szintillator-Kalorimeter liefern.

Mit einigen wenigen Ausnahmen läßt sich für die hadronischen Sektionen resümieren, daß im allgemeinen die mit der ^{60}Co -Methode gemessenen longitudinale Homogenität innerhalb der geforderten

¹Die Definition von I_{JK} wurde bereits auf Seite 89 gezeigt.

Grenzen von 7 % liegen, was auf eine präzise mechanische Fertigung der Module schließen läßt. Nur wenige der Photomultiplierantworten wurden mit starken Steigungen oder großen Stufen (siehe Kapitel 5) gefunden. Selbst bei der größten nachgewiesenen Steigung von $\Delta=10\%$ ist nicht mit einer großen Beeinflussung auf die Energieauflösung zu rechnen. Zu bedenken bleibt, daß gerade für diese Inhomogenitäten bislang keine eindeutige Ursache gefunden werden konnte.

9.2 Homogenität der elektromagnetischen Sektionen

Wegen der im Vergleich zu den HAC-Sektionen kurzen EMC-Sektionen (26 statt 80 Szintillatoren) und wegen der HES-Schächte ist eine Analyse der Homogenitäten der EMC- bzw. HACØ-Sektionen deutlich schwieriger. Es bildet sich kein typisches Plateau wie bei den HAC-Sektionen aus.

Um ein Maß für die longitudinale Homogenität zu erhalten, wurde eine Referenzantwort für die EMC-Sektionen aus insgesamt 646 einzelnen Sektionen des RCALs gebildet. Es handelt sich dabei um eine Mittelung aller Antwortfunktionen. Die Abbildung 9.3 zeigt die ermittelten Referenzantworten der EMC-Sektionen des RCALs für beide Ausleseseiten. Als Maß für die Homogenität wird die Breite der

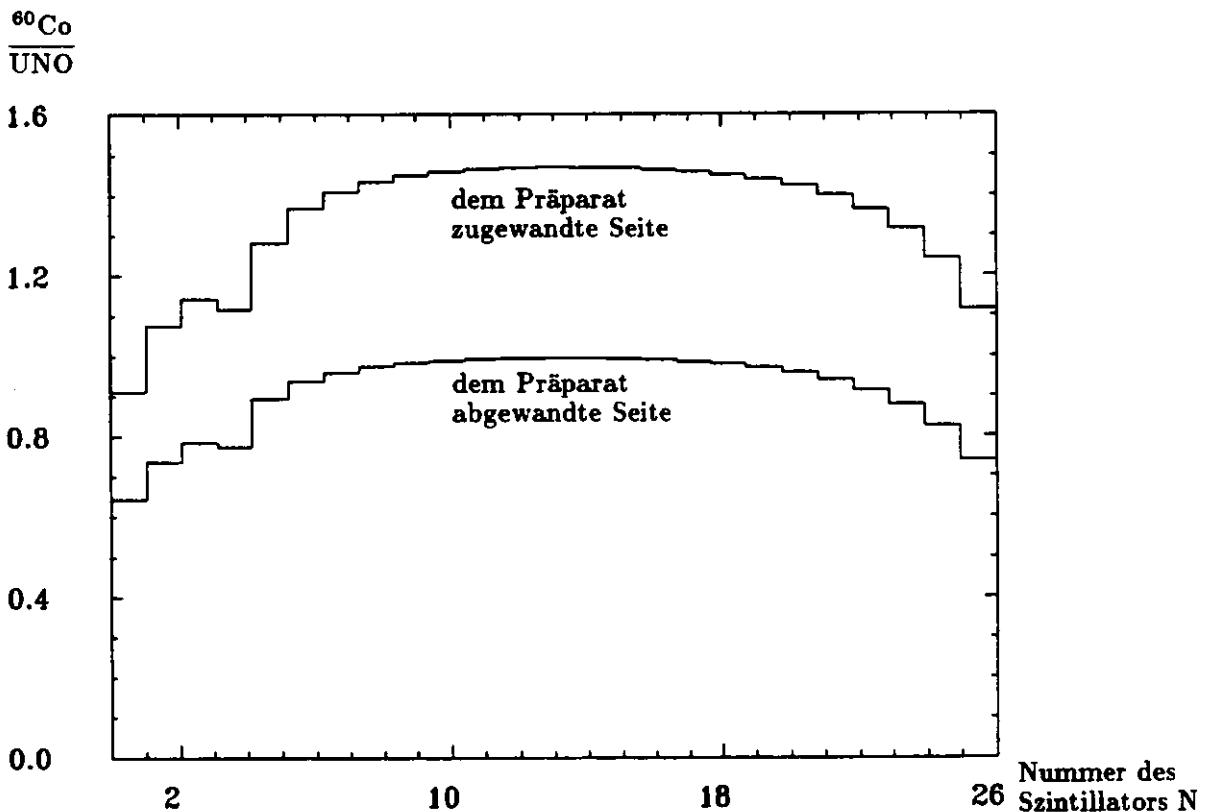


Abbildung 9.3: Referenzantwort der EMC-Sektion des RCALs für beide Ausleseseiten.

Verteilung der Differenzen $D_{JK}(N)$ benutzt. $D_{JK}(N)$ ist dabei als die Differenz des N-ten Szintillators zu dem entsprechenden Szintillator der Referenzantwort zu verstehen. Wobei J für die Anregungsseite und K für den ausgelesenen Photomultiplier steht. Um Schwankungen des Gesamtsignals auszugleichen, wurden die Differenzen $D_{JK}(N)$ wie folgt berechnet [GLO 91]:

$$D_{JK}(N) = \frac{\bar{I}_{JK}^{real} / \sum_{n=2}^{25} \bar{I}_{JK}^{real} - \bar{I}_{JK}^{ref.} / \sum_{n=2}^{25} \bar{I}_{JK}^{ref.}}{\bar{I}_{JK}^{ref.} / \sum_{n=2}^{25} \bar{I}_{JK}^{ref.}}$$

Die Randszintillatoren Nr.1 und Nr.26 wurden bei dieser Berechnung nicht berücksichtigt, da ihre Bestimmung die größte Unsicherheit beinhaltet. Für eine Sektion wurde dann die Größe ($D_{LL} + D_{LR} + D_{RR} + D_{RL}$) für jede Szintillatorposition gebildet und danach ihre „relative“ Abweichung

$$\sigma_{rel} = \frac{\sigma(D_{LL} + D_{LR} + D_{RR} + D_{RL})}{(D_{LL} + D_{LR} + D_{RR} + D_{RL})} \cdot 100$$

berechnet. Die Abbildung 9.4 zeigt die auf diese Weise ermittelte Häufigkeitsverteilung für 208 EMC-Sektionen des RCALs. Die mittlere Standardabweichung der Einzelsignale \bar{I}_{JK} beträgt etwa 3%. Die mittlere Standardabweichung der Gesamtverteilung beträgt $\langle \sigma_{rel} \rangle = 2.1\%$. Die Nebengruppe bei $\langle \sigma_{rel} \rangle \approx 4.5\%$ ist durch den Modul RNL14 gegeben, bei dem über fast alle Türme der dritte Szintillator eine sehr große Abweichung in der Positionierung aufweist (siehe Seite 63).

Auch für diese Sektionen läßt sich zusammenfassen, daß die longitudinale Homogenität den kritischen Wert von $\Delta=7\%$ nur selten überschritten hat. Unter der Voraussetzung, daß nur Inhomogenitäten bekannter Ursache betrachtet werden, konnten keine Steigungen oder ähnliches gefunden werden, die größer als 6% waren. Nur bei den Antwortfunktionen, bei denen die Ursache der Inhomogenität nicht geklärt werden konnte, wurde für einzelne Photomultiplierantworten wenige Male ein Δ von über 10% gefunden.

Eine Analyse für die EMC-Sektionen des FCALs ist wegen der in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Schwierigkeiten nicht durchgeführt worden. Die Analyse für diese Sektionen wird außerdem durch das Vorhandensein eines zweiten HES-Schachtes erschwert.

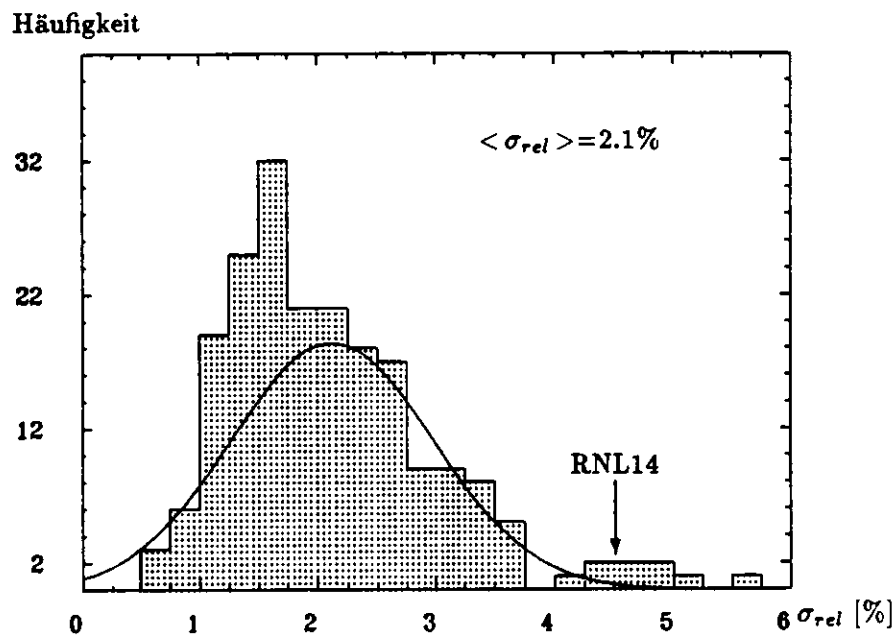


Abbildung 9.4: Häufigkeitsverteilung der Größe $\sigma_{rel} = \frac{\sigma(D_{LL}+D_{LR}+D_{RR}+D_{RL})}{D_{LL}+D_{LR}+D_{RR}+D_{RL}} \cdot 100$ für 208 EMC-Sektionen des RCALs [GLO 91]. σ_{rel} ist ein direktes Maß für die Inhomogenität der EMC-Sektionen. Der ermittelte Wert für $\sigma_{rel} \approx 2.1\%$ zeigt die gute Homogenität der REMC-Sektionen.

Kapitel 10

^{60}Co -Gesamtsignal als Referenzsignal

Das ZEUS-Kalorimeter verfügt durch die natürliche Aktivität des Absorbermaterials (UNO-Signal) über eine homogene und zeitlich stabile Strahlungsquelle, mit der es möglich ist, eine Übertragung der Energieeichung von einem Kalorimeterturm zum gleichartigen anderen vorzunehmen (Absolut-eichung). Bei Stichprobenkalorimetern, die als Absorber ein inaktives Material verwenden, ist diese Möglichkeit nicht gegeben. Inwieweit die Messungen mit einem ^{60}Co -Präparat dazu geeignet sind, ebenfalls ein Referenzsignal zu liefern, soll in diesem Kapitel besprochen werden.

Um mit den durchgeführten ^{60}Co -Messungen ein von Turm zu Turm vergleichbares Signal zu erhalten, wird die Summe aller auf UNO normierten Signalwerte einer Sektion gebildet. Dieser Wert wird im folgenden als Gesamtsignal bezeichnet.

Die durch ein Programm vorgenommene Bestimmung der Länge einer Sektion unterliegt statistischen Schwankungen. Um diesen Einfluß bei der Berechnung des Gesamtsignals möglichst klein zu halten, wird das Gesamtsignal durch die Anzahl der aufsummierten Meßpunkte geteilt.

Wie bereits dargestellt wurde, gehören zu einem vollständigen ^{60}Co -Datensatz vier unabhängige Photomultiplierantworten (\bar{I}_{RR} , \bar{I}_{LL} , \bar{I}_{RL} , \bar{I}_{LR}). Je nach Anwendung ist es erforderlich, unterschiedliche Gesamtsignale aus den vier Datensätzen zu betrachten. Dazu werden drei Typklassen unterschieden:

Typ 1 Es wird die Summe der Meßpunkte für einen Lauf und für einen einzelnen Photomultiplier berechnet (\bar{I}_{RR} , oder \bar{I}_{RL} , oder \bar{I}_{LL} , oder \bar{I}_{LR}).

Typ 2 Es wird die Summe eines Laufes beider ausgelesenen Photomultiplier berechnet ($\bar{I}_{RR} + \bar{I}_{RL}$ oder $\bar{I}_{LL} + \bar{I}_{LR}$), das Präparat befindet sich entweder rechts oder links vom Turm.

Typ 3 Alle vier Datensätze einer Sektion werden aufsummiert ($\bar{I}_{RR} + \bar{I}_{RL} + \bar{I}_{LL} + \bar{I}_{LR}$).

Die meisten der nachfolgenden Betrachtungen wurden für das Gesamtsignal des Typ 2 durchgeführt. Ist unter dem Begriff Gesamtsignal ein anderer Typ als dieser gemeint, wird es explizit angegeben.

10.1 Reproduzierbarkeit des Gesamtsignals

Wichtige Voraussetzung für die zu treffenden Aussagen ist eine gute Reproduzierbarkeit der Gesamtsignale. Als direktes Maß dazu dienen zwei ^{60}Co -Messungen, die an der gleichen Sektion durchgeführt wurden. Der Quotient der Gesamtsignale sollte bei einer idealen Reproduzierbarkeit bei eins liegen. In Abbildung 10.1 ist der Quotient für die Wiederholungsläufe einer FHAC1-Sektion dargestellt. Der Mittelwert liegt 1.7% über eins. Da ein Zeitunterschied von eineinhalb Monaten zwischen den Messungen lag, läßt sich die Überhöhung durch die Abnahme der Aktivität des ^{60}Co -Präparates erklären. Sie beträgt ebenfalls etwa 1.7%. Die Reproduzierbarkeit des Gesamtsignals beträgt für die Innenabta-

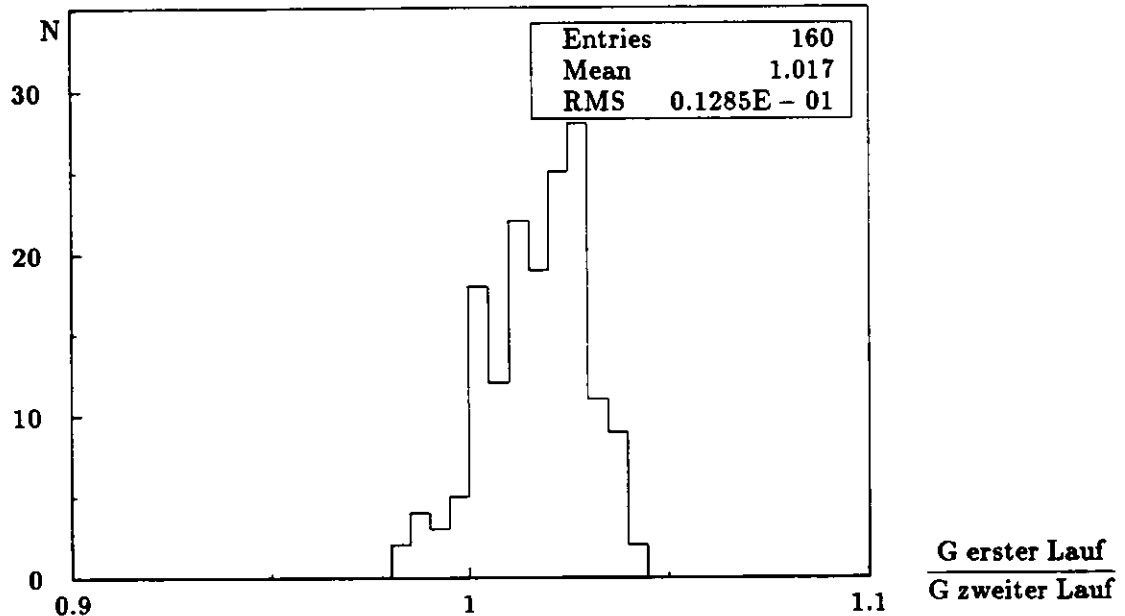


Abbildung 10.1: Reproduzierbarkeit der HAC1-Gesamtsignale (G) für die Innenabta- stung.

stung ungefähr ein Prozent. Für die Außenabta- stung liegen nicht genügend Wiederholungsmessungen vor, um gesicherte Aussagen zur Reproduzierbarkeit machen zu können. Sie wird aber nicht wesentlich schlechter sein als für die Innenabta- stung.

10.2 Nachweis von Inhomogenitäten mit dem ^{60}Co -Gesamtsignal

Zunächst soll gezeigt werden, daß das ^{60}Co -Gesamtsignal die Möglichkeit bietet, Inhomogenitäten einer Sektion nachzuweisen. Dazu ist es notwendig, bei der Auswertung der ^{60}Co -Gesamtsignale eine genaue Betrachtung des Einflusses der UNO-Kalibration vorzunehmen. Bei der UNO-Kalibration werden alle Photomultiplieranspannungen so eingestellt, daß das Signal der Uranaktivität in jeder gleichartigen Sektion gleich groß ist.

Daß dabei eventuelle Inhomogenitäten bei dem ^{60}Co -Gesamtsignal nicht deutlich werden, zeigt das Beispiel der Abbildung 10.2, in der eine HAC1-Sektion mit und ohne Modifizierung des Rückwandreflektors des Wellenlängenschiebers dargestellt ist. Diese Messung wurde bereits in Kapitel 7 vorgestellt. Bei beiden Läufen wurde eine UNO-Kalibration durchgeführt. Der Vergleich des berechneten ^{60}Co -Gesamtsignals beider Photomultiplierantworten liefert eine Abweichung von nur 0.3%, was eindrucksvoll zeigt, daß die UNO-Kalibration auch die ^{60}Co -Signale auf einen gleichen Mittelwert einstellt.

Deswegen ist es z.B. nicht möglich, aus den Ergebnissen der Gesamtsignale zu schließen, ob es sich bei einer stufenförmigen Photomultiplierantwort um eine Überhöhung des über dem Mittelwert der Photomultiplierantwort liegenden Plateaus oder um eine Verminderung des unterhalb des Mittelwertes liegenden Plateaus handelt. Auch verschobene Wellenlängenschieber oder abgeschattete Szintillatoren lassen sich auf diese Weise nicht ermitteln.

Eine Erhöhung bzw. Verminderung des ⁶⁰Co-Signals bei einem Stapelfehler der Szintillator/Uranlagen (vergleiche Abbildung 5.1) ist hauptsächlich auf den unterschiedlichen Abstand des Eichpräparates zu den jeweiligen Auslesekanälen der Szintillatoren zurückzuführen. Die UNO-Kalibration hat hierauf einen nur sehr kleinen Einfluß, so daß die Gesamtsignale (Typ 1) je nach Bestrahlungsseite niedriger oder höher als der Mittelwert sein sollten.

Für alle von außen gemessenen FCAL-Module mit einer Tiefe von $7.1 \lambda_{int}$ liegen die Mittelwerte der Gesamtsignale (Typ 1) der HAC1-Szintillatoren bei:

$$0.659 \pm 0.024 \qquad \text{bzw.} \qquad 0.440 \pm 0.016,$$

je nachdem, ob das Präparat auf der gleichen oder entgegengesetzten Seite des ausgelesenen Photomultipliers bewegt wurde. Die Ursache der relativ großen Standardabweichungen dieser Werte liegt im wesentlichen in der Abnahme der Aktivität des ⁶⁰Co-Präparates (Halbwertszeit 5.2 Jahre). Für eine genaue Bestimmung der Größen muß die endliche Halbwertszeit des Präparates mit in die Analyse einbezogen werden. Die ⁶⁰Co-Gesamtantworten werden dann eine Standardabweichung aufweisen, die nicht wesentlich größer ist, als die der Reproduzierbarkeit, da nur wenige der gefundenen Inhomogenitäten einen Einfluß auf das Gesamtsignal haben.

Die Tabelle 10.1 zeigt exemplarisch die Werte der Gesamtsignale einer Sektion, bei der ein Stapelfehler vorliegt. Für eine Anregung von der rechten Seite liegen die Werte des Gesamtsignals vom Typ 1 für beide Ausleseseiten über dem Mittelwert, für eine Anregung von der linken Seite sind sie kleiner. Daraus läßt sich schließen, daß die Szintillatoren auf der rechten Modulseite weiter über die Kante der Uranplatten herausragen als auf der linken. Dies wurde auch bei dem Vergleich der Einzelantworten gefunden. Bei genauer Kenntnis des Mittelwertes der Gesamtantwort (z.B. durch die Mittelung über

Lauf	Die Anregung erfolgte von der linken Modulseite	
	<i>left</i> HAC1L	<i>left</i> HAC1R
<i>E3E4 FN L3</i> ^{T_{ow}15} ₁₂₀₃	0.650	0.436
<i>E1E2 FN L3</i> ^{T_{ow}15} ₁₂₀₄	0.649	0.432
Lauf	Die Anregung erfolgte von der rechten Seite	
	<i>right</i> HAC1L	<i>right</i> HAC1R
<i>E1E2 FN L3</i> ^{T_{ow}15} ₁₂₀₅	0.452	0.678
<i>E3E4 FN L3</i> ^{T_{ow}15} ₁₂₀₆	0.456	0.688

Tabelle 10.1: Gesamtsignale einer Sektion mit Stapelfehler für die Außenabtastung.

viele Läufe) ist es möglich, Angaben zu der Qualität der Stapelung einer Sektion zu geben. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Möglichkeit, diese Aufgabe von einem Computerprogramm erledigen zu lassen.

Die Abbildung 10.3 zeigt die Verteilung der Gesamtsignale Typ 2 für alle FHAC1-Szintillatoren der $7.1 \lambda_{int}$ langen FCAL-Module. Es bilden sich dabei 5 Gruppen (a-e) aus. Die Verteilungen (a) und (b)

stammen von den HAC1-Szintillatoren der HAC \emptyset -Türme der Innenabtastung. Da bei der Innenabtastung diese Türme von der Kante aus bestrahlt wurden, dort wo sich die Abstandshalter befinden, ist das Gesamtsignal nur halb so groß wie das der Verteilungen (d) und (e) der HAC1-Szintillatoren der EMC-Türme für die Innenabtastung. Die Aufteilung in zwei Gruppen liegt an der Benutzung zweier Präparate unterschiedlicher Aktivität.

Verteilung (c) beinhaltet die Gesamtsignale aller HAC1-Szintillatoren der Außenabtastung. HAC \emptyset -Türme liefern hier das gleiche Signal, wie die EMC-Türme, da die Anregung von der gleichen Position aus erfolgte. Die Verteilung liegt etwas niedriger als die der Innenabtastung, was sich einerseits durch die ^{60}Co -Halbwertszeit und andererseits durch den größeren Abstand des Eichpräparates von den Szintillatoren erklären läßt.

Die Verteilungen (d) und (e) der Innenabtastung zeigen eine bislang unverstandene interne Aufspaltung in zwei Maxima. Befindet sich das Eichpräparat auf der rechten Modulseite, ist das Gesamtsignal größer als für die Anregung von der linken Modulseite. Die Aufspaltung wird ebenfalls für die Außenabtastung gefunden, wenngleich in abgeschwächter Form und mit zwei Ausnahmen. Möglicherweise gibt es eine geringfügige aber systematische Verschiebung der Szintillatorplatten zur rechten Modulseite hin.

Die Breite der einzelnen Verteilungen für die Außen- und Innenabtastung beträgt 3.8 - 4.5% und ist durch die nachlassende Aktivität des Eichpräparates und durch Unterschiede in der Gesamtantwort, bedingt durch verschiedene Einbaufehler, bestimmt. Werden die Verteilungen für die linke und rechte Bestrahlungsseite getrennt betrachtet, verringern sich die Verteilungsbreiten auf 2.2 - 3.9%.

Soll das Gesamtsignal zur Signalangleichung von Kalorimereinheiten benutzt werden, muß das Gesamtsignal des Typ 3 (Addition aller vier Photomultiplierantworten) benutzt werden, so daß Stapelfehler kaum noch ins Gewicht fallen. Die Güte dieser Absoluteichung ist dann durch die Reproduzierbarkeit der Einzelmessungen bestimmt, so daß eine Signalangleichung mit der ^{60}Co -Methode mit einer Genauigkeit in der Größenordnung von einem Prozent möglich sein sollte.

Exemplarisch wurden die Gesamtsignale der FCAL- und RCAL-Türme eines Moduls untersucht. Dabei zeigte sich, daß die Schwankungen der Gesamtsignale des Typ 3 zwischen einem und zwei Prozent liegen, beispielsweise für HAC1-Szintillatoren:

Gesamtsignal Typ 3: FHAC1: 1.2% , RHAC1: 1.6%.

Da die Messungen innerhalb weniger Stunden erfolgten, ist der Einfluß der Abnahme der Aktivität des Präparates vernachlässigbar.

Allerdings haben die ^{60}Co -Messungen als absolute Eichmethode gegenüber dem exzellenten Verfahren mit den UNO-Signalen den Nachteil, daß eine Signalangleichung bei der Größe eines Detektors, wie das ZEUS-Kalorimeter, nicht in wenigen Minuten durchführbar ist. Außerdem bedarf es zur Bewegung vieler Eichpräparate eines aufwendigen technischen Apparates, von dessen Zuverlässigkeit die Qualität der Eichungen nicht unwesentlich abhängen würde.

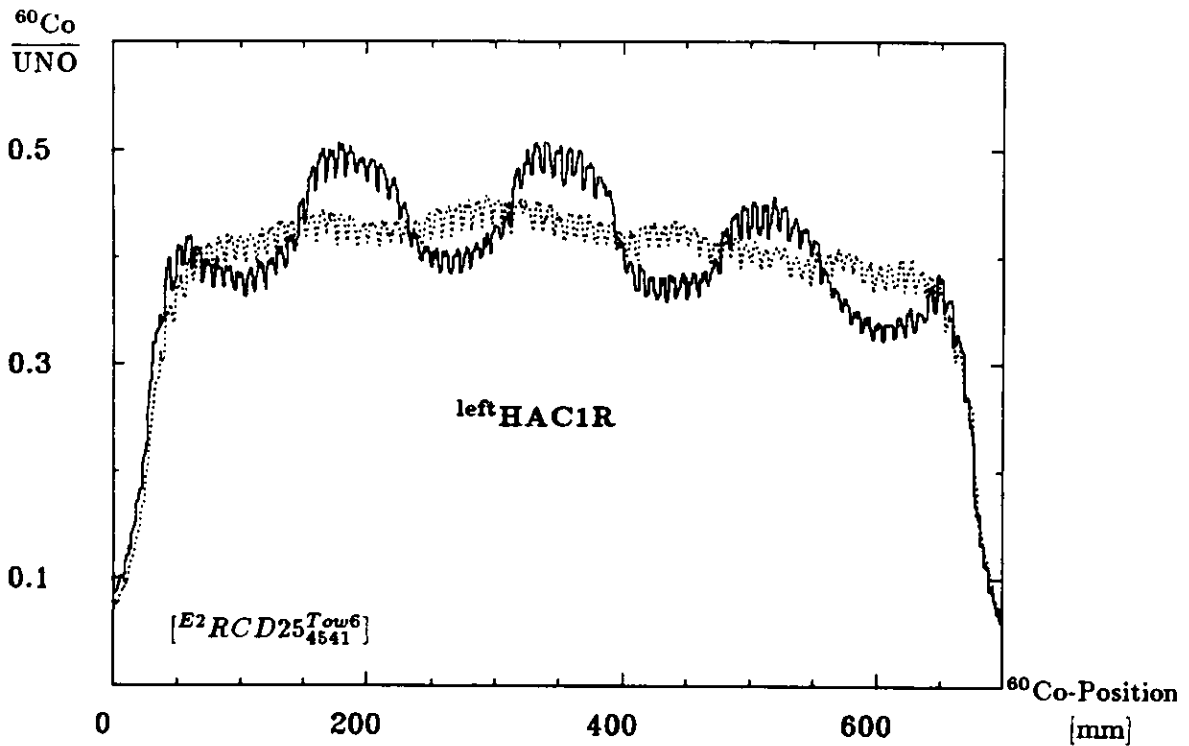


Abbildung 10.2: Antwortfunktion einer RHAC1-Sektion vor (gestrichelte Linie) und nach (durchgezogene Linie) Modifizierung des Rückwandreflektors.

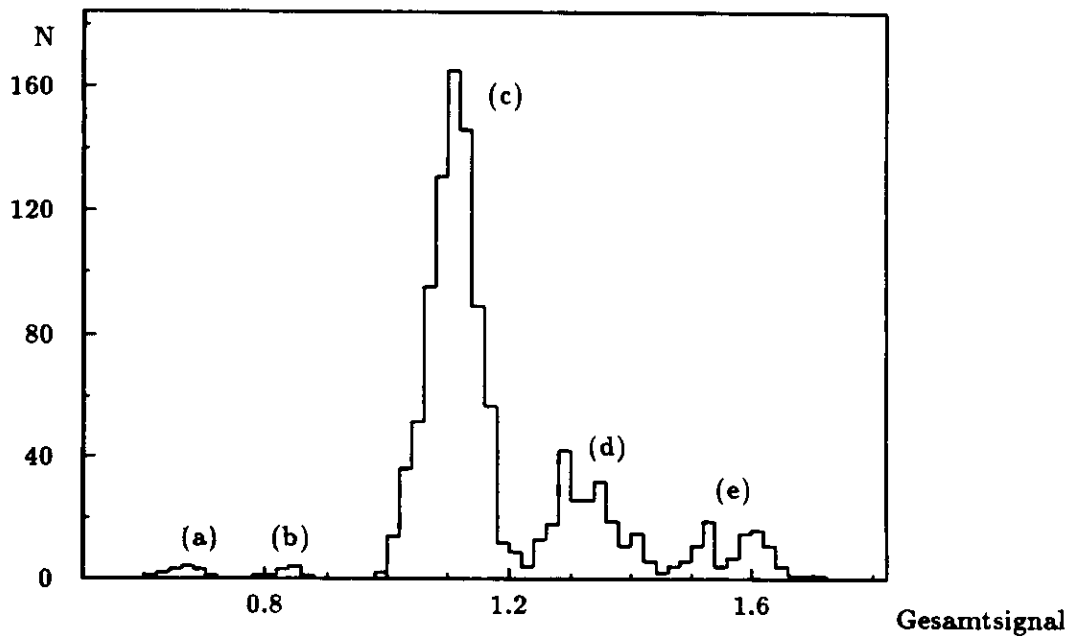


Abbildung 10.3: Verteilung der FHAC1-Gesamtsignale Typ 2 (es wurden alle $7.1 \lambda_{int.}$ tiefen Module berücksichtigt).

Zusammenfassung

Die longitudinale Uniformität im Antwortverhalten des ZEUS-Kalorimeters ist eine wichtige Voraussetzung, wenn man eine sehr gute Linearität bei der Energiemessung und eine Energiekalibration auf dem Niveau von einem Prozent erreichen will. Die Linearität des Antwortverhaltens des Kalorimeters hängt dabei von unterschiedlichen Einflüssen ab.

Unter anderem ist sie durch den mechanischen Aufbau, das heißt durch die Gleichförmigkeit der Dickenverteilung der Szintillator/Uran-Lagen, bestimmt. Die natürliche Alterung und auch der Einfluß radioaktiver Strahlung auf die optischen Komponenten des Kalorimeters können zudem die Homogenität im Antwortverhalten nachträglich verändern.

Die ^{60}Co -Methode ist das einzige bei ZEUS benutzte Verfahren, das es erlaubt, die longitudinale Homogenität zu untersuchen. Dazu wurden alle 48 Module des Vorwärts- und Rückwärtskalorimeters mit einem punktförmigen ^{60}Co -Präparat vermessen. Die wichtigen Vorteile der ^{60}Co -Methode sind:

- ▷ der Nachweis von Einbaufehlern bei Szintillatoren und Wellenlängenschiebern,
- ▷ die Messung der Abschwächlänge von Szintillatoren und Wellenlängenschiebern
- ▷ und die mögliche Absoluteichung des Kalorimeters.

Zunächst dienten diese Messungen dem Nachweis von Aufbau- bzw. Einbaufehlern bei den Kalorimetertürmen. Es zeigte sich, daß es in vielen Fällen möglich war, die Ursache für Unregelmäßigkeiten zu ermitteln. Zahlreiche Fehler konnten vor dem endgültigen Einbau der Module in den ZEUS-Detektor behoben werden. Unregelmäßigkeiten, die nicht beseitigt werden konnten, können gegebenenfalls bei der Analyse der ZEUS-Daten berücksichtigt werden. Einschränkend bleibt festzuhalten, daß für einen nicht zu vernachlässigenden Anteil der Unregelmäßigkeiten keine eindeutige Ursache nachgewiesen werden konnte. Da die Meßmethode selbst aufgrund der guten Reproduzierbarkeit von etwa einem Prozent als Erklärung dafür nicht in Frage kommt, sind Messungen dazu an einem Szintillator/Blei-Kalorimeter geplant.

Insgesamt konnte gezeigt werden, daß die optischen Komponenten mit einer hohen Güte hergestellt wurden. Auch die präzise mechanische Konstruktion der Kalorimetermodule zeigt sich in der guten longitudinalen Homogenität im Antwortverhalten. Es wurden nur sehr wenige Türme mit Inhomogenitäten von mehr als $\Delta=7\%$ gefunden. Dies gilt sowohl für die REMC-Sektionen als auch für alle HAC-Sektionen. Ihr Einfluß auf die Linearität der Energiemessung ist kleiner als ein Prozent. Für FEMC-Sektionen wurde aufgrund verschiedener Schwierigkeiten bei der Abtastung auf die Beurteilung der Homogenität verzichtet.

Mit Hilfe des im Wellenlängenschieber erzeugten Čerenkovlichts ist es möglich, ihre Abschwächlänge λ_W zu bestimmen. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für den Vergleich mit späteren Messungen,

um Aussagen über die Änderung der optischen Eigenschaften der Wellenlängenschieber machen zu können. Ursache von Änderungen kann einerseits natürliche Alterung des Materials sein und andererseits das Strahlungsfeld, welches vom Beschleunigerbetrieb (300 Gy/a) hervorgerufen wird. Verschiedene Schwierigkeiten bei der ^{60}Co -Abtastung, z.B. Unterschiede zwischen Innen- und Außenabtastung, führten dazu, daß die Reproduzierbarkeit der Abschwächlänge λ_W nicht besser als 11 % ist. Daraus ergibt sich eine untere Grenze für die kleinste nachweisbare Änderung der Abschwächlänge λ_W .

Durch die Bestrahlung der Kalorimetertürme von beiden Seiten ist es möglich, die Transmission T des Szintillatorlichts und damit die Abschwächlänge λ_{Sz} des Szintillators zu bestimmen. Die gemessene effektive Abschwächlänge λ_{Sz} liegt bei etwa 400 mm. Die Werte für die Schwankungen der Transmission T für einzelne Sektionen liegt bei etwa 0.5 %, selten über 1 %. Werden diese Werte über einen ganzen Modul gemittelt, erhält man Werte zwischen 1.5 % und 3.0 %. Ihr Einfluß auf die Energieauflösung ist im Vergleich zu dem der Fluktuationen der Photostatistik vernachlässigbar.

Die aus Teststrahlen ermittelte Abschwächlänge λ_{Sz} einer Sektion dient der Ortsbestimmung des Schwerpunktes von hadronischen Schauern. Sie läßt sich mit der aus den ^{60}Co -Messungen ermittelten Abschwächlänge nicht absolut, sondern nur relativ vergleichen. Da bei den Messungen mit den Teststrahlen nur 10 der insgesamt 48 Module vermessen wurden, können sowohl die Ergebnisse der Transmission als auch die der Quotienten (W_L/W_R) und (S_L/S_R) als Grundlage für eventuelle Korrekturen in der Ortsbestimmung der hadronischen Schauer benutzt werden.

Der Nachweis von Strahlenschäden wird für die FEMC- und REMC-Wellenlängenschieber bei einer absorbierten Dosis von 2.5 kGy respektive 5 kGy möglich sein. Ab einer Dosis von 14 bis 20 kGy für EMC- und 2.5 bis 4 kGy für FHAC-Wellenlängenschieber ergibt sich eine vierprozentige Abweichung im Antwortverhalten der Wellenlängenschieber. Die angegebenen Strahlendosen werden sich allerdings erst nach einigen Jahren Betriebszeit einstellen.

Für die Szintillatoren ist die untere Nachweisgrenze der Änderung der Abschwächlänge λ_{Sz} bei absorbierten Dosis von etwa 2 kGy. Dieser Wert kann nur als grobe Abschätzung verstanden werden, da zum Zeitpunkt der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit aus Messungen zu Strahlenschäden an SCSN-38 keine vergleichbaren Daten vorlagen.

Strahlenschäden werden sich auch aus dem Antwortverhalten einer Sektion gewinnen lassen. Einflüsse, die zu einer Änderung vom mehr als 1 % in der ^{60}Co -Antwortfunktion führen, werden meßbar sein.

Weiterhin lassen sich ^{60}Co -Messungen zum Übertragen einer Energiemessung von einer Kalorimeter-einheit zu einer gleichartigen anderen nutzen. Als günstig hat sich erwiesen, alle vier Datensätze, die bei einer Anregung und Auslese von beiden Seiten zur Verfügung stehen, aufzusummieren. Es konnte gezeigt werden, daß die Gesamtsignale mit etwa 1 % bis 2 % reproduzierbar sind. Allerdings muß bei der Verwendung des ^{60}Co -Gesamtsignals die endliche Halbwertszeit des Präparates in die Analyse mit einbezogen werden. Das ^{60}Co -Gesamtsignal ist also zeitlich und auch räumlich längst nicht so stabil wie das Signal, welches durch die natürliche Aktivität des Urans erzeugt wird, so daß diese Anwendung nur bei Kalorimetern mit inaktiven Absorbermaterialien in Frage kommt. Außerdem ist der enorme Zeitaufwand zum Vermessen eines großen Kalorimeters, wie z.B. des ZEUS-Detektors, eine gravierende Einschränkung für diese Anwendung.

Anhang A

Die verschiedenen Wellenlängenschieber-Typen

Die Abschwächlängen der Wellenlängenschieber hängen wesentlich von der Geometrie der Wellenlängenschieber und von der Konzentration des Farbstoffes Y-7 ab. Die Tabelle A.1 gibt eine Übersicht der verschiedenen Typen der unterschiedlichen Wellenlängenschieber des Vorwärts- und Rückwärtskalorimeters. In Tabelle A.2 sind die ermittelten Abschwächlängen λ_W der Spezialmessungen zusammengefasst (vergleiche Kapitel 6).

Wellenlängenschiebertyp	Y-7 - Konzentration [ppm] $\pm 20\%$	Gesamtlänge [mm] $\pm 1mm$	Breite [mm]
FEMC-1	45	1896.0	46.2
FEMC-2	45	1736.0	46.2
FHACØ -1	45	1916.0	196.1
FHACØ -2	45	1756.0	196.1
FHACØ -3	45	1566.0	196.1
FHAC1-1	30	1685.5	196.1
FHAC1-2	30	1525.5	196.1
FHAC1-3	30	1365.5	196.1
FHAC2-1	30	1043.5	196.1
FHAC2-2	30	883.5	196.1
FHAC2-3	30	723.5	196.1
REMC	45	1214.0	95.5
RHACØ -1	45	1214.0	195.0
RHACØ -2	45	1039.0	195.0
RHAC1-1S	30	998.5	195.0
RHAC1-1A	30	998.5	195.0
RHAC1-2A	30	838.5	195.0

Tabelle A.1: Die verschiedenen Wellenlängenschieber-Typen des F- und RCALs [HAR 91].

Wellenlängenschiebertyp	Abschwächlänge λ [mm]	Wellenlängenschieber	Bemerkung	Lauf
FEMC-1	1548±8	EMC4L		E4 CD26 ^{Tow10} ₄₆₂₂
	1894±15	EMC3L		E3 CD26 ^{Tow10} ₄₆₂₃
	1660±9	EMC2L		E2 CD26 ^{Tow10} ₄₆₂₄
	1612±7	EMC1R		E1 CD26 ^{Tow10} ₄₆₃₁
	1532±5	EMC2R		E2 CD26 ^{Tow10} ₄₆₃₂
	1441±6	EMC4R		E4 CD26 ^{Tow10} ₄₆₃₄
	1547±5	EMC2R		E2 CD26 ^{Tow10} ₄₆₃₇
	1356±5	EMC3R		E3 CD26 ^{Tow10} ₄₆₃₈
	1493±7	EMC4R		E4 CD26 ^{Tow10} ₄₆₃₉
	1496±7	EMC4L		E4 CD26 ^{Tow10} ₄₆₄₀
	1959±16	EMC3L		E3 CD26 ^{Tow10} ₄₆₄₁
	1725±10	EMC2L		E2 CD26 ^{Tow10} ₄₆₄₂
	1856±11	EMC1L		E1 CD26 ^{Tow10} ₄₆₄₃
FHAC1-1	1697±13	HAC1L		E4 CD26 ^{Tow10} ₄₆₂₂
	1873±16	HAC1L		E3 CD26 ^{Tow10} ₄₆₂₃
	1814±15	HAC1L		E2 CD26 ^{Tow10} ₄₆₂₄
	1611±7	HAC1L		E1 CD26 ^{Tow10} ₄₆₃₁
	1798±19	HAC1R		E2 CD26 ^{Tow10} ₄₆₃₂
	1773±18	HAC1R		E3 CD26 ^{Tow10} ₄₆₃₃
	1663±16	HAC1R		E4 CD26 ^{Tow10} ₄₆₃₄
	1974±24	HAC1R	rechts weißes Papier als Rückwandrefl.	E2 CD26 ^{Tow10} ₄₆₃₇
	1890±22	HAC1R		E3 CD26 ^{Tow10} ₄₆₃₈
	1683±17	HAC1R		E4 CD26 ^{Tow10} ₄₆₃₉
	1670±13	HAC1L		E4 CD26 ^{Tow10} ₄₆₄₀
	1893±16	HAC1L	links weißes Tyvek als Rückwandrefl.	E3 CD26 ^{Tow10} ₄₆₄₁
	1860±16	HAC1L		E2 CD26 ^{Tow10} ₄₆₄₂
1641±12	HAC1L		E1 CD26 ^{Tow10} ₄₆₄₃	
FHAC1-2	1653±65	HAC1L		E3 NL11 ^{Tow12} ₂₅₅₁
	1461±48	HAC1L		E1 NL11 ^{Tow12} ₂₅₅₂
	1581±63	HAC1L		E4 NL11 ^{Tow12} ₂₅₅₅
	1614±60	HAC1L		E2 NL11 ^{Tow12} ₂₅₅₆
RHACØ -2	1332±52	HACØR		HACØ CD21 ^{Tow18} ₄₃₆₀
RHAC1-1	1298±147	HAC1	Rückw. weiß	HACØ NL18 ^{Tow20} ₃₉₈₁
	1360±180	HAC1		3cm NL18 ^{Tow20} ₃₉₈₄
	999±72	HAC1		7.5cm NL18 ^{Tow20} ₃₉₈₇
FHAC2-1	1188±31	HAC2L		E4 CD26 ^{Tow10} ₄₆₂₂
	1243±33	HAC2L		E3 CD26 ^{Tow10} ₄₆₂₃
	1313±38	HAC2L		E2 CD26 ^{Tow10} ₄₆₂₄
	1309±17	HAC2R		E4 CD26 ^{Tow10} ₄₆₃₉
RHAC1-2	1134±48	HAC1R		HACØ CD21 ^{Tow18} ₄₃₆₀

Tabelle A.2: Abschwächlänge λ_w aus den verschiedenen Spezialmessungen [MEY 91].

Anhang B

Technische Details des Motorenaufbaus und seiner Steuerung

B.1 Konstruktion zur Aufnahme der Lichtschranke

Die Information, ob sich das Eichpräparat innerhalb oder außerhalb einer Transportröhre befindet, wird unter anderem, wie in Kapitel 2.3 beschrieben wurde, durch eine Lichtschranke definiert. Die Konstruktion zur Aufnahme der Lichtschranke ist einer der Durchgänge, wo es bei unpräziser Fertigung zu einer nachhaltigen Beschädigung des Eichpräparats kommen kann, wie es die ersten Serienmessungen zeigten.

Die Abbildung B.1 zeigt eine Skizze der Konstruktion, die sich als zuverlässig erwies. Die besondere Schwierigkeit besteht darin, das Eichpräparat durch einen möglichst engen Durchgang mit einer schmalen Bohrung für das Licht der Schranke zu führen. Dabei muß die Positionierung der Lichtschranke von außen nachstellbar sein, um ein vollständiges Ausleuchten der Bohrung zu gewährleisten.

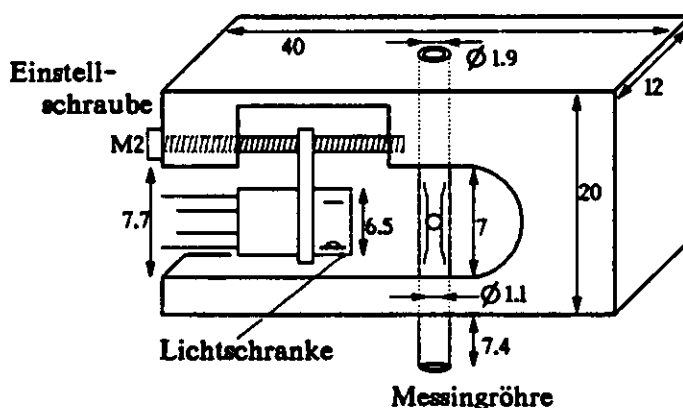


Abbildung B.1: Konstruktion zur Aufnahme der Lichtschranke.

Der Sender und Empfänger der Lichtschranke können mittels einer M2-Schraube auf der ein beweglicher Steg befestigt ist, der mit der Lichtschranke verklebt wurde, über die Bohrung in der Transportröhre bewegt werden. Die anliegende Spannung an der Lichtschranke läßt sich an der Motor-

kontrolleinheit nachmessen. Befindet sich das Eichpräparat in diesem Teil der Transportröhre, soll eine Spannung von mindestens 3 Volt anliegen, anderenfalls sollte sie kleiner als 2 Volt sein. Für den Betrieb wurden Spannungen von 4.9 Volt¹ und 1.0 Volt gewählt. Liegen diese Spannungen nicht an, sollte zunächst einmal die Position der Lichtschranke verändert werden. Hilft dies nicht, müssen die Potentiometer an der Motorkontrolleinheit nachreguliert werden.

B.2 Beschreibung der Motorenkontrolleinheit

Die Motorenkontrolleinheit wurde in Kanada an der Universität McGill [GIL 90] entworfen. Die zentrale Einheit der Schaltung ist ein HCMOS Mikroprozessor von Motorola (F68HC11FN). Er ist in der Programmiersprache FORTE kodiert.

Die Schaltung wurde so aufgebaut, daß eine Hälfte der Platine der Aufnahme der Elektronikbausteine dient, die andere der Signalübermittlung. Getrennt sind die beiden Seiten durch eine Kontaktleiste, die zur elektrischen Verbindung beider Seiten installiert wurde.

Mit Hilfe dieser Schaltung werden die Spannungsversorgungen für die Schrittmotoren angesprochen, die sich in dem gleichen Gehäuse befinden, in dem die Schaltung untergebracht ist. Auch der Transformator zur Bereitstellung der 15 Volt Betriebsspannung befindet sich in diesem Gehäuse. Neben der 220 Volt Spannungsversorgung befindet sich der Kabelanschluß für die Lichtschranken und den Winkeldekodierer, welche regelmäßig vom Mikroprozessor ausgelesen werden. Die Versorgungskabel für die Motoren haben einen eigenen Anschluß, um den Einfluß von Störsignalen, die von der Steuerspannung der Motoren ausgehen, zu vermeiden. Ebenfalls aus diesem Grund sollten die Kabel der Motoren und die Kabel der Lichtschranken bzw. des Winkeldekodierers nicht zusammen verlegt werden.

In der Frontplatte des Gehäuses (siehe Abbildung B.2) befindet sich der Anschluß für den VME OS-9 Rechner, von dem aus die Motorenkontrolleinheit angesprochen wird. Hier sind auch die Schalter für die Stromversorgung der Motoren und des Mikroprozessors zu finden. Zum ständigen Überprüfen der Spannung der Lichtschranke, die die Referenzposition des Eichpräparats bestimmt, befinden sich in der Frontplatte zwei Buchsen. Direkt über den Buchsen befinden sich die Einstellschrauben der Potentiometer für die Lichtschranken. Die Spannung sollte regelmäßig überprüft werden, um ein Herausfahren des Eichpräparats aus den Antriebsrädern zu vermeiden.

Sollte es nötig sein, das Kabel der Motorspannungsversorgung abzunehmen, darf dieses nur bei ausgeschalteten Spannungsversorgungen geschehen, da andernfalls eine Brandgefahr für den Mikroprozessor besteht.

¹Es sollte keine Spannung zu dicht an 5 Volt gewählt werden, da die Kollektorspannung 5 Volt beträgt und dieser Wert ebenfalls bei Kurzschlüssen an der Lichtschranke zu erwarten sein wird.

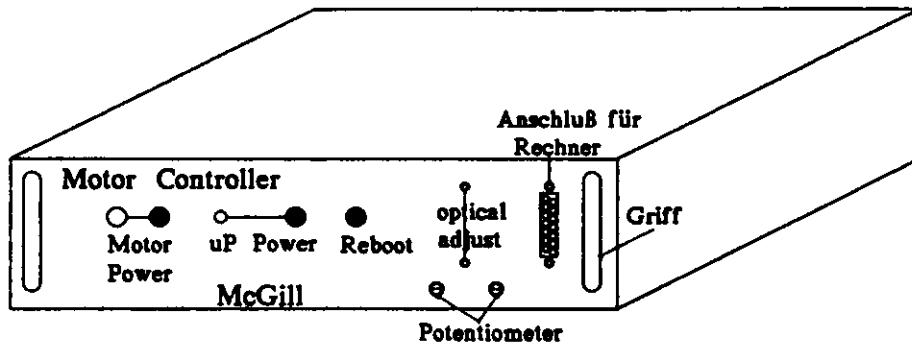


Abbildung B.2: Vorderansicht der Motorenkontrolleinheit.

Anhang C

Testmethode der Transportröhren

Nachdem sich beim FCAL herausgestellt hatte, daß die Transportröhren an den Verbindungsstücken unzuverlässig sind, wurde für das RCAL eine Testmethode entwickelt, die es erlaubte, den Zustand der Transportröhren zu prüfen, ohne den betreffenden Modul zu öffnen. Diese zeitaufwendige Testmethode wurde nur für die Module des RCALs nahe des Strahlrohrs und der beiden halben Module (Kalibrationsnummer 12) des FCALs durchgeführt. Die Abbildung C.1 zeigt eine Übersicht der geprüften Module.

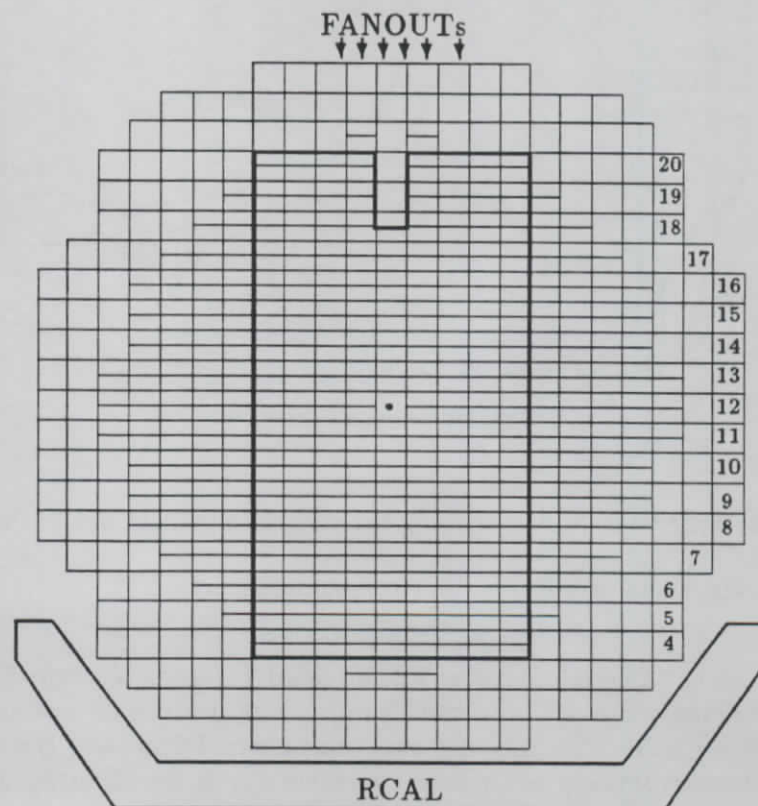


Abbildung C.1: Blick auf das RCAL vom Wechselwirkungspunkt. Die eingerahmte Fläche ist der Bereich, in der alle Verbindungsstellen der Transportröhren geprüft wurden.

Wie in Kapitel 2 für die Innenabtastung beschrieben wurde, bestehen die Transportröhren aus wenigstens drei Teilstücken, aus dem etwa 2 Meter langen Messingrohr in der Wellenlängenschieberkassette, aus dem Kurvenstück und aus dem Messingrohr, welches von der Aluminiumaufnahme am T-Träger bis zum Kurvenstück verläuft. In Abbildung C.2 sind die einzelnen Teilstücke schematisch dargestellt. Ziel der Messungen war es, die Verklebungen an den Stellen *Verbindung 1* und *Verbindung 2* auf ihre

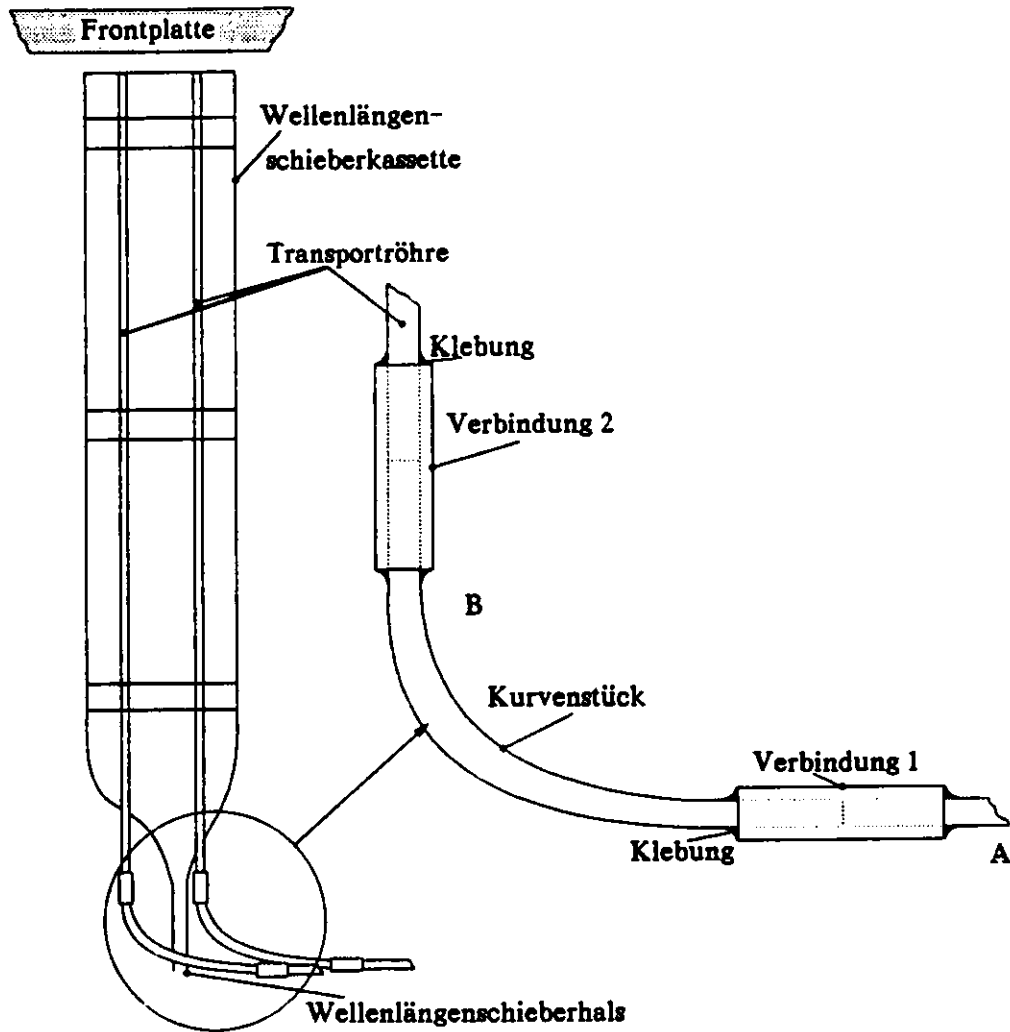


Abbildung C.2: Schematische Darstellung der drei Einzelstücke der Transportröhre.

Beständigkeit zu prüfen. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

- (1) Ein Draht mit einem Querschnitt von 1.3mm wird bis zum Kurvenstück eingebracht. Das Erreichen des Kurvenstückes signalisiert sich durch eine stetig stark ansteigende aufzuwendende Schubkraft. Ferner sollte dies mit der zu erwartenden Länge der Transportröhre verglichen werden. Ist diese Verbindung offen bzw. wird sie durch die Benutzung geöffnet, stoppt der Draht plötzlich und die nötige Schubkraft steigt sprunghaft an.
- (2) Testen der Verbindung 1:
Der Draht wird zwischen der Position A und B (siehe Abbildung C.1) mehrfach hin- und herbewegt. Sollte sich dabei die Verbindung 1 öffnen, wird der Kraftaufwand für die Vorwärts-

bewegung deutlich kleiner, da der Draht nun die Transportröhre verläßt. In diesem Fall ist das Prüfen der Verbindung 2 nicht mehr möglich und die Transportröhre wird als unbrauchbar markiert, falls eine Reparatur nicht möglich sein sollte.

- (3) Der Draht wird weiter bis an die Frontplatte geschoben. Die Länge des bereits eingeschobenen Drahts wird markiert.
- (4) Testen der Verbindung 2:
Ist sichergestellt, daß der Draht das Ende der Transportröhre erreicht hat, wird die Schubkraft deutlich erhöht. Bleiben die Verbindungen unbeeinträchtigt, ändert sich die am Draht gemachte Markierung nicht mehr. Dieses sollte mehrfach wiederholt werden. Danach ist der Draht bis vor die Verbindung 1 zurückzuziehen, um erneut bis zur Frontplatte vorgeschoben zu werden. Sind die Verbindungen nicht gelöst worden, zeigt sich dies dadurch, daß die Längenmarkierung noch übereinstimmt. Um eine Beschädigung der Wellenlängenschieberhülse zu vermeiden, ist der letzte Arbeitgang mit geringer Kraft durchzuführen. Hat sich eine Verbindung geöffnet, wird sich dies durch eine erheblich größere Schubkraft und/oder aber durch einen größeren Längenvorschub des Drahtes bemerkbar machen.

Sollte sich gleich zu Beginn des Tests herausstellen, daß ein Draht des Querschnittes 1.3 mm zu hohe Reibungskräfte aufweist, läßt sich diese Methode auch mit einem Draht von 1.2 mm durchführen. Scheitert auch dies, ist davon auszugehen, daß die Transportröhre nicht befahrbar ist.

Mit Hilfe dieses Testverfahrens wurden insgesamt in den 870 getesteten Transportröhren 14 offene Verbindungsstücke nachgewiesen, von denen fünf nachträglich repariert werden konnten. Insgesamt mußten 77 der Transportröhren mit Drahtstiften verschlossen werden, da sie entweder nicht belegt waren oder aber eine Benutzung eine zu große Schubkraft (14 mal aufgetreten) erforderte.

Sollen mit der Innenabtastung eingebaute Module vermessen werden, wird es nötig sein, diese Testmethoden erneut anzuwenden, da durch den Transport der Module bzw. durch ihren Einbau eine nachträgliche Veränderung des Zustandes der Transportröhren durchaus eingetreten sein kann, wie es zwei nach dem Einbau der Module geprüfte Transportröhren gezeigt haben.

Anhang D

Belegungsplan der Transportröhren

Transportröhrensystem des Moduls F11

Turm	Länge	Position	Röhrenkennzeichnung
23	2390 mm	HACØ	±48
22	2590 mm	HACØ	nicht belegt
21	2690 mm	E3E4	±43
	2790 mm	E1E2	±40
20	2890 mm	E3E4	±37
	2990 mm	E1E2	±34
19	3090 mm	E3E4	±31
	3190 mm	E1E2	±28
18	3290 mm	E3E4	±25
	3390 mm	E1E2	±22
17	3490 mm	E3E4	±19
	3590 mm	E1E2	±16
16	3690 mm	E3E4	±13
	3790 mm	E1E2	±10
15	3890 mm	E3E4	±45
	3990 mm	E1E2	±42
14	4090 mm	E3E4	±39
	4190 mm	E1E2	±36
13	4290 mm	E3E4	±33
	4390 mm	E1E2	±30
12	4490 mm	E3E4	±27

Turm	Länge	Position	Röhrenkennzeichnung
1	6690 mm	HACØ	±8
2	6490 mm	HACØ	nicht belegt
3	6290 mm	E3E4	±17
	6390 mm	E1E2	±14
4	6090 mm	E3E4	±23
	6190 mm	E1E2	±20
5	5890 mm	E3E4	±29
	5990 mm	E1E2	±26
6	5690 mm	E3E4	±35
	5790 mm	E1E2	±32
7	5490 mm	E3E4	±41
	5590 mm	E1E2	±38
8	5290 mm	E3E4	±47
	5390 mm	E1E2	±44
9	5090 mm	E3E4	±9
	5190 mm	E1E2	±6
10	4890 mm	E3E4	±15
	4990 mm	E1E2	±12
11	4690 mm	E3E4	±21
	4790 mm	E1E2	±18
12	4590 mm	E1E2	±24

Tabelle D.1: Transportröhrenführung eines F11 Moduls (CD2).

Transportröhrensystem des Moduls F12

Turm	Länge	Position	Röhrenkennzeichnung
23	2390 mm	HACØ	±48
22	2590 mm	HACØ	46 links nicht belegt
21	2790 mm	HACØ	±40
20	2890 mm	E3E4	±37
	2990 mm	E1E2	±34
19	3090 mm	E3E4	±31
	3190 mm	E1E2	±28
18	3290 mm	E3E4	±25
	3390 mm	E1E2	±22
17	3490 mm	E3E4	±19
	3590 mm	E1E2	±16
16	3690 mm	E3E4	±13
	3790 mm	E1E2	±10
15	3890 mm	E3E4	±45
	3990 mm	E1E2	±42
14	4090 mm	E3E4	±39
	4190 mm	E1E2	±36
13	4290 mm	E3E4	±33
	4390 mm	E1E2	±30
12	4490 mm	E3E4	±27

Turm	Länge	Position	Röhrenkennzeichnung
1	6590 mm	HACØ	±8
2	6390 mm	HACØ	±14
3	6290 mm	HACØ	nicht belegt
4	6090 mm	E3E4	-23 rechts nicht belegt
	6190 mm	E1E2	±20
5	5890 mm	E3E4	±29
	5990 mm	E1E2	±26
6	5690 mm	E3E4	±35
	5790 mm	E1E2	±32
7	5490 mm	E3E4	±41
	5590 mm	E1E2	±38
8	5290 mm	E3E4	±47
	5390 mm	E1E2	±44
9	5090 mm	E3E4	±9
	5190 mm	E1E2	±6
10	4890 mm	E3E4	±15
	4990 mm	E1E2	±12
11	4690 mm	E3E4	±21
	4790 mm	E1E2	±18
12	4590 mm	E1E2	±24

Tabelle D.2: Transportröhrenführung eines F12 Moduls (NL2).

Anhang E

Position der Module im ZEUS-Detektor

Bei der vorliegenden Arbeit sind die Module mit zwei Kennzeichnungen versehen, die einmal auf die ursprüngliche Namensgebung und auf eine zweckmäßigere, die auf die programmtechnische Verwaltung der Datensätze zurückgeht. Zudem wurde die Kennzeichnung der Module nach ihrem Einbau neu gestaltet, so daß eine Übersicht der unterschiedlichen Nomenklaturen notwendig erscheint.

Die Herstellungsnummer beinhaltet den Kalorimetertyp (F- oder RCAL), das Herstellungsland und eine fortlaufende Produktionsnummer. Allen ^{60}Co -Läufen wurde eine der Reihenfolge der ersten Messung entsprechende Kalibrierungsnummer gegeben. Zur Kennung des Kalorimetertyps wurde den Datensätzen ein F oder R hinzugefügt. So ist beispielsweise der Datensatz C13D1636.FZX dem FCAL-Modul Nummer 13 mit der fortlaufenden Nummer 1636 zuzuordnen. Das vorangestellte C gibt an, daß die Daten bereits konzentriert wurden. Die Buchstabengruppe FZX bedeutet, daß es sich um **Zebra exchange** Daten des FCALs handelt. Der Buchstabe D hat keine weitere Bedeutung.

Im ZEUS-Detektor wurden die Module des F- und RCALs erneut entsprechend ihrer Position von links nach rechts (aus der Protonenrichtung gesehen) durchnummeriert. Die beiden nachfolgenden Tabellen ermöglichen die Zuordnung der unterschiedlichen Nomenklaturen. Es wurde ebenfalls vermerkt mit welcher Abtastmethode, die Module vermessen wurden. Die Prozentzahlen beziehen sich dabei auf die Anteil der tatsächlich vermessenen Transportröhren.

Herstellungsnummer	Kalibrierungsnummer	Positionsnummer	Modultyp	Methode:	
				Innen	Außen
FNL8	23	F1	F6		X
FCD10	22	F2	F5		X
FNL10	21	F3	F4		X
FCD8	4	F4	F3		X
FNL6	19	F5	F22		X
FCD7	6	F6	F21		X
FCD5	7	F7	F12	87%(D)	-
FCD4	8	F8	F12		X
FCD1	9	F9	F12	15%(C)	X
FNL3	16	F10	F12		X
FCD3	11	F11	F11		X
FCD24	12	F12T	F1T		X
FCD26	12	F12B	F1B		X
FCD2	13	F13	F11	94%(C)	X
FNL1	14	F14	F12		X
FNL5	10	F15	F12		X
FNL2	15	F16	F12	86%(C)	X
FNL4	17	F17	F12	54%(C), 90%(D)	X
FCD6	18	F18	F21		X
FNL7	5	F19	F22		X
FCD9	20	F20	F3		X
FNL11	3	F21	F4		X
FCD11	2	F22	F5		X
FNL9	1	F23	F6		X

Tabelle E.1: Zuordnung der FCAL-Module unter Angabe der Abtastmethode. Es wurde prozentual angegeben wieviel der möglichen Transportröhren der Innenabtastung an welchem Standort (D=DESY, C=CERN) vermessen wurden.

Herstellungs- nummer	Kalibrierungs- nummer	Positions- nummer	Modul- typ	Methode: Außen
RNL20	1	R1	R6	X
RCD21	2	R2	R5	X
RNL22	3	R3	R4	X
RCD20	20	R4	R3	X
RCD17	19	R5	R23	X
RNL16	18	R6	R22	X
RNL17	7	R7	R21	X
RNL12	14	R8	R12	X
RNL14	10	R9	R12	X
RCD14	16	R10	R12	X
RCD12	13	R11	R11	X
RCD23	12	R12T	R1T	X
RCD25	12	R12B	R1B	X
RCD13	11	R13	R11	X
RNL15	8	R14	R12	X
RCD15	9	R15	R12	X
RNL13	15	R16	R12	X
RCD16	17	R17	R21	X
RNL18	6	R18	R22	X
RCD18	5	R19	R23	X
RCD19	4	R20	R3	X
RNL21	21	R21	R4	X
RCD22	22	R22	R5	X
RNL19	23	R23	R6	X

Tabelle E.2: Zuordnung der RCAL-Module. Alle Module wurden ausschließlich mit der Außenabtastung vermessen.

Anhang F

Übersicht der Mittelwerte der optischen Parameter für das FCAL und RCAL

Die nachfolgenden Tabellen geben eine Übersicht der berechneten Werte für T, (S_L/S_R)- und die (W_L/W_R)- Quotienten, bzw. ihrer Mittelwerte. Dabei wurden zunächst diese Größen für jeden einzelnen Szintillator ermittelt und dann über die Sektion unter Berücksichtigung der in Kapitel 7, Seite 90, gemachten Einschränkungen gemittelt. Diese Zahlen sind zum Zeitpunkt der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit noch nicht für die ZEUS-Kollaboration verfügbar. Bei Bedarf muß ein herkömmliches Magnetband mit dem Namen **EXTRO1** mit den Daten der optischen Parameter für die einzelnen Szintillatoren sowie der Mittelwerte für die Sektionen eingelesen werden. Der **SAVESET**-Name lautet **att_new.save**. Die Datenfiles für die optischen Parameter für die einzelnen Szintillatoren tragen den Namen „Kalibrationsnummer“_TOWER_T.DAT (z.B. F15_20.T.DAT) und wurden folgenderweise gegliedert:

```
UNO DETERMINATION SELFUNO, RIGHTUNO= 1970.806 LEFTUNO= 2153.578
module: F13 tower: 1 channel: 5 cell: 4
```

0.669587	0.903246	1.068854	1.651308
0.673847	0.898066	1.072285	1.672686
0.666098	0.908498	1.061788	1.670351
0.665709	0.869544	1.080078	1.667150
0.671330	0.848796	1.070855	1.664597
0.666537	0.822734	1.099047	1.680867
0.666391	0.843792	1.087791	1.679750

usw.

Der Hinweis **SELFUNO** in der Überschrift zeigt an, daß für die Berechnung von $^{60}\text{Co}/\text{UNO}$ der UNO-Wert aus den Photomultiplierantworten bestimmt wurden. Dazu wurde das Signal des Photomultipliers auf der dem Präparat abgewandten Seite aus dem inaktiven Bereich bestimmt. Die Daten wurden mit der Kalibrationsnummer (F13), dem Turm (tower 1), dem Photomultiplier (channel: 5)

und der Transportröhre (cell: 4) gekennzeichnet. In der nachfolgende Auflistung sind die Bezeichnungen der Photomultiplier und der Transportröhren angegeben.

Die erste Spalte beinhaltet die T-Werte, die zweite die (S_L/S_R) -Quotienten und die dritte die (W_L/W_R) -Quotienten. Der vierte Wert ist für das Gesamtsignal Typ 3 (vergleiche dazu Kapitel 10).

cannel: 1 → EMC1	cell: 1 → HACØ
cannel: 2 → EMC2	cell: 2 → E1E2
cannel: 3 → EMC3	cell: 3 → E3E4
cannel: 4 → EMC4	cell: 4 → HACØ
cannel: 5 → HACØ	
cannel: 6 → HAC1	
cannel: 7 → HAC2	

Tabelle F.1: Auflistung der Bezeichnungen für die Photomultiplier in den Datenfiles.

Für die Mittelwerte der optischen Parameter einer Sektion hat der Datenfile die Gestalt:

MODULE: 17 FCAL - RUNS 0263 TO 0303

UNO DETERMINATION	SELFUNO,	RIGHTUNO=	525.9393	LEFTUNO=	461.7938
MODULE	TOWER	CHANNEL	CELL	LAMBDA	SIGMA
F17	17	3	3	0.6925	0.0070

SL/SR	SIGMA	WL/WR	SIGMA	NO OF SCINTS
0.9320	0.0345	0.8599	0.0199	25

MEAN VALUE OF THE
 SUM OF ALL ANSWERS SIGMA
 6.0694 0.2292

BEGIN OF COUNT:10END OF COUNT:23

FITTING PARAMETERS :
 =====

ABSCISSA-T	SLOPE-T	RESIDUAL
0.7017	-0.0003	0.0000

ABSCISSA-WLWR	SLOPE-WLWR	RESIDUAL
0.9142	-0.0031	0.0000

ABSCISSA-SLSR	SLOPE-SLSR	RESIDUAL
0.6379	0.0224	0.0000

ABSCISSA OF SUM(I(J,K))	SLOPE	RESIDUAL	
6.4363	-0.0150	0.0021	usw.

Als erste Information ist die Kalibrationsnummer angegeben, sowie der Bereich der Laufnummern. Die zweite Zeile enthält die gleichen Informationen wie die der Einzeldaten mit dem Unterschied, daß als letzte Zahl der Mittelwert der Transmission \bar{T} , im Datenfile mit LAMBDA bezeichnet, mit seiner Standardabweichung angegeben wurde. Darauf folgen die Sektionsmittelwerte der Quotienten (S_L/S_R) und (W_L/W_R) mit ihren Standardabweichungen und die Anzahl der vom Programm ermittelten Szintillatoren. Weiterhin wurden die Gesamtantwortfunktion nach Typ 3, der Bereich der analysierten Szintillatoren und die ermittelten Parameter einer linearen Anpassung an die optischen Parameter der einzelnen Szintillatoren und der Gesamtantwort angegeben. Es wurden bei den Anpassungen nur Geraden der Form $y=ax+b$ berücksichtigt. Die Bedeutung der Ergebnisse der Anpassungen ergeben sich aus den Überschriften.

Die hier aufgeführten Tabellen beinhalten nur die Mittelwerte der Module für die unterschiedlichen Szintillatoren und für die nicht miteinander vergleichbaren Bestrahlungspositionen, wobei die Transportröhrenpositionen E1/E2 und E3/E4 für die HAC-Szintillatoren zusammengefaßt wurden. Messungen der HAC1-Sektionen mit der Transportröhrenposition HACØ wurde gesondert betrachtet, da die betreffenden Szintillatoren für diese Transportröhrenposition von der Kante aus, also in der Nähe der Abstandshalter, bestrahlt wurden und sich somit eine von den übrigen Werten unterschiedliche Eindringtiefe der γ -Quanten ergibt.

Bei der Zusammenfassung der Werte für die Module wurde nicht weiter berücksichtigt, daß eine einzelne Sektion oder aber auch mehrere in der Analyse fehlen und somit die Anzahl der Daten, die zu dem Mittelwert beitragen, von Modul zu Modul unterschiedlich sein kann. Die optischen Parameter lassen sich nur angeben, wenn wenigstens vier Läufe von je zwei Bestrahlungsseiten vorhanden sind. Außerdem muß die Auswerteroutine für jeden Lauf der gleichen Sektion die gleiche Anzahl an Szintillatoren finden. Aufgrund dieser Einschränkungen kann es vorkommen, daß für ein Modul bei einem bestimmten Szintillatortyp und einer bestimmten Transportröhre keine Ergebnisse berechnet wurden (siehe z.B. FHAC1, Modul F11, Transportröhrenposition HACØ).

Die Mittelwerte der Module μ und die Standardabweichungen σ wurden wie folgt berechnet:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_n \quad , \quad \sigma^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N \sigma_n^2 + \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N \mu_n^2 - \mu^2 .$$

Dabei ist μ_n der Mittelwert der einzelnen Sektionen, σ_n die dazugehörige Standardabweichung und N die Anzahl der analysierten Sektionen.

FEMC1-Szintillatoren

Kalibrations- nummer	Anregungs- position	T-Werte	σ_{relativ}	$\frac{S_L}{S_R}$	σ_{relativ}	$\frac{W_L}{W_R}$	σ_{relativ}
03	E1/E2	0.672	± 1.1 %	1.083	± 1.9 %	0.997	± 2.1 %
04	E1/E2	0.677	± 1.8 %	1.103	± 2.7 %	0.992	± 2.0 %
05	E1/E2	0.677	± 2.4 %	1.135	± 1.7 %	1.014	± 2.2 %
06	E1/E2	0.669	± 1.7 %	1.061	± 2.9 %	1.000	± 1.7 %
08	E1/E2	0.676	± 2.8 %	1.096	± 4.7 %	0.998	± 2.1 %
09	E1/E2	0.660	± 2.2 %	1.088	± 2.1 %	1.008	± 2.0 %
10	E1/E2	0.654	± 2.1 %	1.035	± 4.1 %	1.000	± 1.3 %
11	E1/E2	0.675	± 2.3 %	1.050	± 4.7 %	0.992	± 1.6 %
12	E1/E2	0.671	± 2.1 %	1.091	± 6.0 %	1.000	± 2.0 %
13	E1/E2	0.680	± 1.4 %	1.107	± 3.0 %	1.004	± 1.8 %
14	E1/E2	0.668	± 1.8 %	1.037	± 2.2 %	0.999	± 2.7 %
15	E1/E2	0.661	± 2.1 %	0.922	± 4.9 %	1.006	± 1.4 %
16	E1/E2	0.672	± 1.8 %	1.018	± 3.6 %	1.004	± 2.7 %
17	E1/E2	0.681	± 2.5 %	1.083	± 8.3 %	1.005	± 1.5 %
18	E1/E2	0.688	± 2.3 %	1.086	± 2.6 %	1.007	± 1.6 %
19	E1/E2	0.671	± 2.1 %	1.085	± 4.2 %	0.999	± 2.2 %
20	E1/E2	0.667	± 2.1 %	1.158	± 1.8 %	0.994	± 2.0 %
21	E1/E2	0.696	± 2.8 %	1.143	± 2.1 %	1.037	± 2.8 %
Mittelwerte:		0.672	± 2.5 %	1.067	± 6.1 %	1.002	± 2.1 %

Tabelle F.2a: Modulmittelwerte der optischen Parameter für FEMC1-Szintillatoren.

FEMC2-Szintillatoren

Kalibrations- nummer	Anregungs- position	T-Werte	σ_{relativ}	$\frac{S_L}{S_R}$	σ_{relativ}	$\frac{W_L}{W_R}$	σ_{relativ}
03	E1/E2	0.710	± 1.9 %	0.907	± 5.0 %	0.999	± 1.2 %
04	E1/E2	0.708	± 2.5 %	0.907	± 4.9 %	1.018	± 2.9 %
05	E1/E2	0.690	± 2.7 %	0.923	± 5.6 %	0.984	± 2.0 %
06	E1/E2	0.709	± 1.4 %	0.842	± 2.6 %	0.992	± 1.5 %
08	E1/E2	0.694	± 2.1 %	0.917	± 5.9 %	1.001	± 3.0 %
09	E1/E2	0.687	± 2.6 %	0.890	± 3.9 %	0.985	± 2.3 %
10	E1/E2	0.683	± 1.8 %	0.867	± 3.7 %	0.980	± 1.9 %
11	E1/E2	0.700	± 2.5 %	0.936	± 4.9 %	1.003	± 2.1 %
12	E1/E2	0.708	± 1.8 %	0.860	± 7.1 %	0.996	± 2.7 %
13	E1/E2	0.698	± 1.9 %	0.881	± 4.0 %	0.992	± 2.1 %
14	E1/E2	0.684	± 1.9 %	0.860	± 3.5 %	0.999	± 2.0 %
15	E1/E2	0.680	± 1.3 %	0.917	± 6.0 %	0.988	± 2.3 %
16	E1/E2	0.703	± 2.4 %	0.907	± 5.4 %	0.984	± 2.0 %
17	E1/E2	0.701	± 2.3 %	0.831	± 3.0 %	0.984	± 1.6 %
18	E1/E2	0.678	± 1.9 %	0.921	± 3.8 %	0.993	± 1.9 %
19	E1/E2	0.689	± 3.1 %	0.870	± 3.4 %	0.996	± 3.0 %
20	E1/E2	0.710	± 2.2 %	0.932	± 4.5 %	1.001	± 4.3 %
21	E1/E2	0.682	± 2.2 %	0.898	± 2.8 %	1.009	± 2.5 %
Mittelwerte:		0.695	± 2.7 %	0.890	± 5.7 %	0.994	± 2.6 %

Tabelle F.2b: Modulmittelwerte der optischen Parameter für FEMC2-Szintillatoren.

FEMC3-Szintillatoren

Kalibrationsnummer	Anregungsposition	T-Werte	σ_{relativ}	$\frac{S_L}{S_R}$	σ_{relativ}	$\frac{W_L}{W_R}$	σ_{relativ}
03	E3/E4	0.679	± 1.2 %	1.085	± 2.1 %	0.989	± 1.4 %
04	E3/E4	0.681	± 1.9 %	1.113	± 4.6 %	0.994	± 3.4 %
05	E3/E4	0.713	± 1.4 %	1.135	± 2.9 %	1.019	± 2.0 %
06	E3/E4	0.695	± 1.5 %	1.029	± 3.8 %	1.008	± 1.8 %
08	E3/E4	0.692	± 3.1 %	1.086	± 3.7 %	1.010	± 2.6 %
09	E3/E4	0.663	± 2.5 %	1.069	± 3.1 %	1.012	± 2.2 %
10	E3/E4	0.677	± 2.1 %	1.025	± 3.8 %	1.011	± 2.1 %
11	E3/E4	0.692	± 2.4 %	1.069	± 5.1 %	1.001	± 1.8 %
12	E3/E4	0.713	± 2.9 %	1.056	± 5.4 %	0.997	± 2.3 %
13	E3/E4	0.689	± 1.8 %	1.056	± 4.4 %	1.009	± 1.9 %
14	E3/E4	0.668	± 1.8 %	1.058	± 6.8 %	1.004	± 2.1 %
15	E3/E4	0.673	± 2.3 %	0.890	± 4.5 %	0.989	± 1.8 %
16	E3/E4	0.681	± 1.7 %	1.014	± 5.2 %	1.007	± 2.2 %
17	E3/E4	0.700	± 2.3 %	1.060	± 5.6 %	1.020	± 2.7 %
18	E3/E4	0.689	± 2.4 %	1.090	± 3.2 %	0.999	± 1.8 %
19	E3/E4	0.679	± 2.2 %	1.049	± 3.8 %	1.026	± 3.9 %
20	E3/E4	0.692	± 1.5 %	1.140	± 3.1 %	1.001	± 1.6 %
21	E3/E4	0.717	± 1.9 %	1.051	± 1.8 %	0.988	± 5.1 %
Mittelwerte:		0.687	± 3.0 %	1.056	± 6.0 %	1.006	± 2.5 %

Tabelle F.2c: Modulmittelwerte der optischen Parameter für FEMC3-Szintillatoren.

FEMC4-Szintillatoren

Kalibrationsnummer	Anregungsposition	T-Werte	σ_{relativ}	$\frac{S_L}{S_R}$	σ_{relativ}	$\frac{W_L}{W_R}$	σ_{relativ}
03	E3/E4	0.678	± 2.9 %	0.913	± 1.9 %	1.017	± 2.1 %
04	E3/E4	0.693	± 2.2 %	0.905	± 6.1 %	1.002	± 3.3 %
05	E3/E4	0.670	± 2.1 %	0.923	± 5.9 %	0.992	± 2.4 %
06	E3/E4	0.681	± 1.5 %	0.865	± 3.5 %	0.999	± 1.8 %
08	E3/E4	0.679	± 2.1 %	0.942	± 6.0 %	1.021	± 2.5 %
09	E3/E4	0.676	± 2.6 %	0.901	± 3.4 %	0.998	± 2.1 %
10	E3/E4	0.661	± 1.5 %	0.888	± 3.9 %	1.002	± 2.4 %
11	E3/E4	0.675	± 2.6 %	0.868	± 4.2 %	1.006	± 1.6 %
12	E3/E4	0.674	± 1.9 %	0.898	± 8.7 %	1.003	± 1.7 %
13	E3/E4	0.678	± 1.5 %	0.906	± 3.5 %	0.996	± 1.5 %
14	E3/E4	0.678	± 2.1 %	0.844	± 4.5 %	0.998	± 2.2 %
15	E3/E4	0.667	± 1.2 %	0.887	± 4.2 %	0.998	± 1.6 %
16	E3/E4	0.687	± 1.7 %	0.868	± 4.0 %	0.997	± 2.4 %
17	E3/E4	0.686	± 1.6 %	0.841	± 1.1 %	0.994	± 2.6 %
18	E3/E4	0.668	± 2.0 %	0.915	± 3.2 %	1.004	± 1.8 %
19	E3/E4	0.679	± 1.8 %	0.881	± 2.5 %	1.007	± 2.6 %
20	E3/E4	0.680	± 2.1 %	0.956	± 3.3 %	0.994	± 1.9 %
21	E3/E4	0.654	± 0.8 %	0.983	± 2.1 %	1.067	± 7.9 %
Mittelwerte:		0.676	± 2.3 %	0.896	± 5.8 %	1.002	± 2.5 %

Tabelle F.2d: Modulmittelwerte der optischen Parameter für FEMC4-Szintillatoren.

FHACØ-Szintillatoren

Kalibrations- nummer	Anregungs- position	T-Werte	σ_{relativ}	$\frac{S_L}{S_R}$	σ_{relativ}	$\frac{W_L}{W_R}$	σ_{relativ}
01	HACØ	0.666	± 1.6 %	1.005	± 3.7 %	1.001	± 1.1 %
02	HACØ	0.678	± 1.9 %	1.019	± 2.1 %	1.000	± 1.6 %
03	HACØ	0.690	± 1.3 %	0.968	± 2.6 %	0.997	± 1.1 %
04	HACØ	0.677	± 0.8 %	0.997	± 2.6 %	0.999	± 1.3 %
05	HACØ	0.671	± 1.2 %	1.022	± 4.1 %	1.006	± 1.7 %
06	HACØ	0.671	± 0.8 %	0.962	± 2.1 %	0.996	± 1.4 %
08	HACØ	0.674	± 1.1 %	0.987	± 2.7 %	0.998	± 2.0 %
09	HACØ	0.668	± 1.1 %	0.992	± 2.7 %	0.999	± 1.4 %
10	HACØ	0.662	± 0.8 %	0.987	± 3.0 %	1.008	± 1.3 %
11	HACØ	0.676	± 1.6 %	0.965	± 1.8 %	0.985	± 2.2 %
12	HACØ	0.683	± 1.9 %	0.991	± 3.6 %	1.003	± 1.4 %
13	HACØ	0.667	± 1.0 %	0.972	± 2.9 %	0.999	± 1.5 %
14	HACØ	0.660	± 1.6 %	1.001	± 1.8 %	1.004	± 1.4 %
15	HACØ	0.672	± 1.5 %	1.015	± 1.2 %	0.986	± 2.2 %
16	HACØ	0.682	± 1.7 %	0.997	± 2.5 %	1.010	± 1.3 %
17	HACØ	0.663	± 1.0 %	0.980	± 4.2 %	0.991	± 1.2 %
18	HACØ	0.665	± 0.7 %	0.997	± 2.9 %	1.006	± 0.9 %
19	HACØ	0.668	± 1.4 %	0.996	± 2.5 %	1.006	± 1.3 %
20	HACØ	0.684	± 2.1 %	1.043	± 1.7 %	0.998	± 1.6 %
21	HACØ	0.675	± 1.4 %	1.018	± 2.5 %	1.000	± 1.3 %
22	HACØ	0.676	± 1.1 %	0.995	± 2.4 %	1.001	± 1.3 %
23	HACØ	0.681	± 0.4 %	1.012	± 2.0 %	1.004	± 1.1 %
Mittelwerte:		0.674	± 1.8 %	1.000	± 3.4 %	1.001	± 1.5 %

Tabelle F.2e: Modulmittelwerte der optischen Parameter für FHACØ-Szintillatoren.

FHAC1-Szintillatoren

Kalibrations- nummer	Anregungs- position	T-Werte	σ_{relativ}	$\frac{S_L}{S_R}$	σ_{relativ}	$\frac{W_L}{W_R}$	σ_{relativ}
01	HACØ	0.674	± 1.0 %	1.015	± 2.7 %	1.013	± 2.0 %
02	HACØ	0.664	± 1.6 %	1.017	± 2.7 %	1.007	± 1.8 %
03	HACØ	0.658	± 1.4 %	0.989	± 3.1 %	1.001	± 1.4 %
03	E1E2,E3E4	0.655	± 1.4 %	0.969	± 2.0 %	0.995	± 1.8 %
04	HACØ	0.686	± 0.8 %	0.962	± 3.2 %	0.991	± 1.4 %
04	E1E2,E3E4	0.682	± 0.8 %	0.965	± 2.9 %	0.998	± 1.7 %
05	HACØ	0.675	± 1.0 %	0.978	± 2.6 %	1.012	± 2.5 %
05	E1E2,E3E4	0.657	± 1.4 %	0.981	± 3.2 %	1.002	± 1.6 %
06	HACØ	0.675	± 0.5 %	0.936	± 3.8 %	0.986	± 1.3 %
06	E1E2,E3E4	0.664	± 0.8 %	0.908	± 4.3 %	0.985	± 1.6 %
07	HACØ	0.656	± 1.7 %	0.968	± 4.3 %	1.000	± 1.9 %
07	E1E2,E3E4	0.664	± 1.4 %	0.922	± 3.7 %	0.993	± 1.6 %
08	HACØ	0.676	± 0.6 %	1.014	± 2.5 %	1.011	± 1.6 %
08	E1E2,E3E4	0.668	± 0.8 %	0.989	± 3.9 %	1.006	± 2.0 %
09	HACØ	0.673	± 0.8 %	1.002	± 2.4 %	1.003	± 1.5 %
09	E1E2,E3E4	0.667	± 1.2 %	1.017	± 3.1 %	1.005	± 1.4 %
10	HACØ	0.683	± 0.7 %	0.996	± 2.6 %	0.999	± 1.7 %
10	E1E2,E3E4	0.678	± 1.3 %	0.912	± 3.9 %	0.994	± 1.8 %
11	HACØ	0.686	± 0.4 %	1.069	± 4.9 %	0.996	± 1.5 %
11	E1E2,E3E4	0.676	± 1.1 %	1.007	± 3.5 %	1.003	± 1.8 %
12	HACØ	0.690	± 1.5 %	0.986	± 3.4 %	0.993	± 2.2 %
12	E1E2,E3E4	0.681	± 1.7 %	0.989	± 4.6 %	1.002	± 1.9 %
13	HACØ	0.672	± 0.7 %	1.019	± 2.3 %	1.002	± 1.2 %
13	E1E2,E3E4	0.668	± 0.7 %	0.987	± 2.5 %	1.006	± 1.4 %
14	HACØ	0.675	± 0.6 %	1.005	± 2.5 %	0.999	± 1.1 %
14	E1E2,E3E4	0.674	± 0.6 %	0.973	± 4.7 %	0.998	± 1.4 %
15	HACØ	0.653	± 1.6 %	0.887	± 4.3 %	0.996	± 1.6 %
15	E1E2,E3E4	0.660	± 2.1 %	0.872	± 4.3 %	0.971	± 5.5 %
16	HACØ	0.670	± 0.5 %	0.979	± 4.4 %	1.008	± 1.8 %
16	E1E2,E3E4	0.670	± 1.0 %	0.974	± 3.0 %	0.999	± 1.6 %
17	HACØ	0.661	± 1.9 %	0.967	± 2.8 %	0.997	± 2.0 %
17	E1E2,E3E4	0.673	± 1.2 %	0.988	± 7.0 %	1.002	± 1.5 %
18	HACØ	0.676	± 0.6 %	0.936	± 2.6 %	0.991	± 1.5 %
18	E1E2,E3E4	0.662	± 1.5 %	0.922	± 2.5 %	0.988	± 1.5 %
19	HACØ	0.678	± 0.8 %	0.960	± 3.0 %	1.000	± 1.2 %
19	E1E2,E3E4	0.673	± 0.9 %	0.956	± 2.5 %	0.997	± 1.7 %
20	HACØ	0.682	± 1.5 %	1.031	± 4.3 %	1.003	± 1.7 %
20	E1E2,E3E4	0.667	± 0.9 %	1.063	± 2.8 %	1.008	± 1.6 %
21	HACØ	0.675	± 2.0 %	0.986	± 2.9 %	0.999	± 1.8 %
21	E1E2,E3E4	0.675	± 1.0 %	0.989	± 2.1 %	0.990	± 1.4 %
22	HACØ	0.656	± 1.6 %	0.972	± 2.6 %	0.998	± 1.8 %
23	HACØ	0.678	± 0.8 %	1.004	± 2.8 %	1.005	± 1.6 %
Mittelwerte für HACØ:		0.672	± 1.9 %	0.989	± 4.0 %	1.001	± 1.8 %
Mittelwerte für E1E2,E3E4:		0.670	± 1.5 %	0.970	± 5.6 %	0.998	± 2.0 %

Tabelle F.2f: Modulmittelwerte der optischen Parameter für FHAC1-Szintillatoren.

FHAC2-Szintillatoren

Kalibrationsnummer	Anregungsposition	T-Werte	σ_{relativ}	$\frac{S_L}{S_R}$	σ_{relativ}	$\frac{W_L}{W_R}$	σ_{relativ}
01	HACØ	0.885	± 3.7 %	1.000	± 1.5 %	1.010	± 1.1 %
02	HACØ	0.708	± 1.2 %	0.991	± 2.3 %	1.003	± 1.1 %
03	HACØ	0.706	± 1.1 %	0.989	± 2.4 %	1.001	± 1.4 %
03	E1E2,E3E4	0.692	± 1.3 %	0.986	± 2.1 %	1.001	± 2.2 %
04	HACØ	0.696	± 0.9 %	0.975	± 2.2 %	0.999	± 1.7 %
04	E1E2,E3E4	0.682	± 1.2 %	0.985	± 3.0 %	1.007	± 1.7 %
05	HACØ	0.699	± 0.7 %	0.985	± 3.4 %	1.007	± 2.6 %
05	E1E2,E3E4	0.687	± 0.7 %	0.954	± 2.3 %	0.996	± 1.6 %
06	HACØ	0.697	± 0.5 %	0.968	± 2.3 %	1.000	± 1.7 %
06	E1E2,E3E4	0.691	± 0.7 %	0.944	± 3.4 %	1.002	± 1.6 %
07	HACØ	0.654	± 1.2 %	1.057	± 2.6 %	1.020	± 2.1 %
07	E1E2,E3E4	0.669	± 0.8 %	1.011	± 3.9 %	1.000	± 2.1 %
08	HACØ	0.701	± 0.8 %	0.972	± 3.7 %	1.006	± 1.8 %
08	E1E2,E3E4	0.692	± 0.9 %	0.965	± 3.4 %	1.002	± 2.0 %
09	HACØ	0.697	± 0.5 %	0.975	± 2.2 %	1.000	± 1.4 %
09	E1E2,E3E4	0.688	± 0.8 %	0.979	± 2.4 %	1.001	± 2.0 %
10	HACØ	0.698	± 0.4 %	0.998	± 3.4 %	0.998	± 2.2 %
10	E1E2,E3E4	0.689	± 0.7 %	0.946	± 3.4 %	0.995	± 1.7 %
11	HACØ	0.702	± 0.8 %	1.022	± 2.3 %	0.999	± 2.0 %
11	E1E2,E3E4	0.697	± 1.3 %	0.996	± 3.3 %	1.001	± 1.9 %
12	HACØ	0.711	± 1.2 %	1.025	± 3.1 %	1.004	± 1.5 %
12	E1E2,E3E4	0.708	± 0.9 %	1.014	± 4.0 %	1.003	± 1.8 %
13	HACØ	0.688	± 1.0 %	0.984	± 2.6 %	1.005	± 1.7 %
13	E1E2,E3E4	0.684	± 0.7 %	0.976	± 2.2 %	1.004	± 1.6 %
14	HACØ	0.695	± 0.6 %	1.013	± 2.9 %	1.000	± 1.5 %
14	E1E2,E3E4	0.689	± 0.6 %	0.991	± 3.3 %	1.004	± 1.9 %
15	HACØ	0.674	± 0.6 %	0.892	± 2.6 %	0.984	± 1.8 %
15	E1E2,E3E4	0.684	± 1.3 %	0.913	± 3.4 %	0.983	± 5.7 %
16	HACØ	0.686	± 0.7 %	1.000	± 3.8 %	0.999	± 1.8 %
16	E1E2,E3E4	0.684	± 0.7 %	1.015	± 4.1 %	1.002	± 1.8 %
17	HACØ	0.685	± 1.3 %	0.974	± 4.6 %	0.996	± 1.9 %
17	E1E2,E3E4	0.682	± 1.0 %	0.962	± 4.7 %	0.999	± 2.0 %
18	HACØ	0.699	± 0.6 %	0.977	± 2.6 %	0.997	± 1.8 %
18	E1E2,E3E4	0.692	± 1.1 %	0.973	± 2.6 %	1.001	± 1.6 %
19	HACØ	0.693	± 0.6 %	1.006	± 2.5 %	1.000	± 1.7 %
19	E1E2,E3E4	0.684	± 0.6 %	1.002	± 2.4 %	1.000	± 1.6 %
20	HACØ	0.695	± 1.2 %	1.040	± 4.1 %	1.008	± 1.8 %
20	E1E2,E3E4	0.684	± 1.1 %	1.073	± 3.0 %	1.010	± 1.6 %
21	HACØ	0.694	± 0.9 %	0.988	± 2.7 %	1.001	± 1.3 %
21	E1E2,E3E4	0.690	± 0.8 %	0.993	± 1.8 %	0.997	± 1.2 %
23	HACØ	0.711	± 2.5 %	1.003	± 1.6 %	0.999	± 1.2 %
Mittelwerte für HACØ:		0.698	± 1.9 %	0.993	± 3.2 %	1.004	± 1.7 %
Mittelwerte für E1E2,E3E4:		0.689	± 1.4 %	0.979	± 4.2 %	1.001	± 2.1 %

Tabelle F.2g: Modulmittelwerte der optischen Parameter für FHAC2-Szintillatoren.

REMC1-Szintillatoren

Kalibrationsnummer	Anregungsposition	T-Werte	σ_{relativ}	$\frac{S_L}{S_R}$	σ_{relativ}	$\frac{W_L}{W_R}$	σ_{relativ}
03	E1/E2	0.677	± 1.8 %	0.868	± 4.5 %	0.999	± 0.8 %
04	E1/E2	0.679	± 1.5 %	0.957	± 3.3 %	0.999	± 1.6 %
05	E1/E2	0.681	± 1.4 %	0.977	± 2.9 %	1.000	± 1.2 %
06	E1/E2	0.679	± 2.0 %	0.955	± 2.6 %	0.995	± 1.5 %
07	E1/E2	0.671	± 1.6 %	0.988	± 3.1 %	1.004	± 1.2 %
08	E1/E2	0.680	± 1.6 %	0.961	± 4.1 %	0.999	± 1.2 %
09	E1/E2	0.684	± 2.0 %	0.944	± 3.1 %	0.997	± 1.5 %
10	E1/E2	0.688	± 1.7 %	0.924	± 2.5 %	1.012	± 2.0 %
11	E1/E2	0.687	± 1.3 %	0.951	± 2.7 %	0.999	± 1.5 %
12	E1/E2	0.680	± 1.4 %	0.974	± 2.8 %	1.001	± 4.9 %
13	E1/E2	0.683	± 1.6 %	1.009	± 2.5 %	0.994	± 1.6 %
14	E1/E2	0.667	± 2.2 %	0.980	± 2.7 %	1.002	± 1.7 %
15	E1/E2	0.683	± 1.6 %	0.931	± 3.3 %	0.996	± 1.3 %
16	E1/E2	0.679	± 2.1 %	0.931	± 2.8 %	0.998	± 1.3 %
17	E1/E2	0.679	± 2.3 %	0.970	± 2.8 %	1.002	± 1.2 %
18	E1/E2	0.665	± 2.3 %	0.942	± 2.6 %	1.008	± 1.8 %
20	E1/E2	0.678	± 1.3 %	0.937	± 3.1 %	1.000	± 1.5 %
21	E1/E2	0.682	± 1.2 %	0.975	± 3.1 %	1.001	± 1.0 %
Mittelwerte:		0.679	± 2.0 %	0.957	± 4.0 %	1.000	± 1.9 %

Tabelle F.2h: Modulmittelwerte der optischen Parameter für REMC2-Szintillatoren.

REMC2-Szintillatoren

Kalibrations- nummer	Anregungs- position	T-Werte	σ_{relativ}	$\frac{S_L}{S_R}$	σ_{relativ}	$\frac{W_L}{W_R}$	σ_{relativ}
03	E3/E4	0.684	± 1.1 %	0.931	± 3.8 %	0.996	± 2.0 %
04	E3/E4	0.677	± 1.6 %	0.939	± 3.3 %	0.999	± 1.6 %
05	E3/E4	0.674	± 1.5 %	0.990	± 3.5 %	0.998	± 1.5 %
06	E3/E4	0.673	± 2.2 %	0.957	± 3.0 %	0.996	± 1.7 %
07	E3/E4	0.676	± 1.9 %	1.005	± 2.7 %	1.000	± 1.4 %
08	E3/E4	0.676	± 1.8 %	0.966	± 2.9 %	0.996	± 1.3 %
09	E3/E4	0.678	± 2.4 %	0.988	± 4.1 %	0.997	± 1.6 %
10	E3/E4	0.685	± 1.5 %	0.940	± 3.1 %	1.006	± 1.9 %
11	E3/E4	0.681	± 1.6 %	0.970	± 2.8 %	1.004	± 1.4 %
12	E3/E4	0.679	± 1.7 %	1.017	± 3.1 %	0.971	± 6.3 %
13	E3/E4	0.680	± 1.5 %	1.036	± 3.2 %	1.000	± 1.3 %
14	E3/E4	0.672	± 1.8 %	0.983	± 2.4 %	0.997	± 1.5 %
15	E3/E4	0.681	± 1.5 %	0.946	± 3.3 %	0.999	± 1.5 %
16	E3/E4	0.677	± 2.1 %	0.937	± 4.6 %	0.996	± 1.1 %
17	E3/E4	0.676	± 2.3 %	0.999	± 2.4 %	1.004	± 1.3 %
18	E3/E4	0.664	± 2.2 %	0.979	± 3.4 %	0.996	± 1.7 %
20	E3/E4	0.670	± 1.7 %	0.968	± 3.2 %	1.005	± 1.3 %
21	E3/E4	0.681	± 1.5 %	1.034	± 1.5 %	1.005	± 1.4 %
Mittelwerte:		0.677	± 2.0 %	0.975	± 4.3 %	0.998	± 2.2 %

Tabelle F.2i: Modulmittelwerte der optischen Parameter für REMC2-Szintillatoren.

RHACØ-Szintillatoren

Kalibrationsnummer	Anregungsposition	T-Werte	σ_{relativ}	$\frac{S_L}{S_R}$	σ_{relativ}	$\frac{W_L}{W_R}$	σ_{relativ}
01	HACØ	0.654	± 2.2 %	0.999	± 2.2 %	0.964	± 6.6 %
02	HACØ	0.693	± 5.3 %	0.958	± 1.4 %	0.999	± 1.0 %
03	HACØ	0.677	± 1.5 %	0.944	± 3.2 %	0.999	± 1.3 %
04	HACØ	0.668	± 2.1 %	0.980	± 3.3 %	1.000	± 1.2 %
05	HACØ	0.670	± 2.1 %	1.019	± 2.5 %	1.001	± 1.3 %
06	HACØ	0.658	± 1.9 %	1.030	± 2.3 %	1.001	± 1.5 %
07	HACØ	0.660	± 1.2 %	0.980	± 5.1 %	1.007	± 2.2 %
08	HACØ	0.669	± 1.7 %	0.976	± 3.8 %	0.993	± 1.1 %
09	HACØ	0.668	± 1.5 %	0.989	± 2.3 %	1.000	± 1.1 %
10	HACØ	0.667	± 1.4 %	0.962	± 2.4 %	1.000	± 1.0 %
11	HACØ	0.686	± 1.5 %	0.963	± 1.5 %	0.997	± 1.4 %
13	HACØ	0.696	± 0.7 %	1.028	± 5.1 %	0.998	± 0.7 %
14	HACØ	0.687	± 1.3 %	0.992	± 3.1 %	0.998	± 1.4 %
15	HACØ	0.682	± 1.3 %	0.971	± 2.5 %	1.000	± 1.8 %
16	HACØ	0.675	± 1.1 %	0.964	± 1.8 %	0.994	± 2.3 %
17	HACØ	0.665	± 2.1 %	1.008	± 3.4 %	1.002	± 1.1 %
18	HACØ	0.670	± 1.4 %	1.010	± 2.2 %	0.998	± 1.4 %
20	HACØ	0.666	± 2.2 %	0.968	± 2.9 %	0.997	± 1.8 %
21	HACØ	0.694	± 1.7 %	1.036	± 2.7 %	1.006	± 1.7 %
22	HACØ	0.675	± 1.4 %	1.001	± 2.4 %	1.016	± 9.5 %
23	HACØ	0.693	± 6.4 %	0.986	± 1.8 %	1.059	± 7.8 %
Mittelwerte:		0.675	± 2.8 %	0.990	± 4.1 %	1.001	± 3.3 %

Tabelle F.2k: Modulmittelwerte der optischen Parameter für RHACØ-Szintillatoren.

RHAC1-Szintillatoren

Kalibrations- nummer	Anregungs- position	T-Werte	σ_{relativ}	$\frac{S_L}{S_R}$	σ_{relativ}	$\frac{W_L}{W_R}$	σ_{relativ}
1	HACØ	0.693	± 1.5 %	0.985	± 1.9 %	1.000	± 1.6 %
2	HACØ	0.688	± 1.6 %	0.941	± 2.9 %	0.990	± 1.2 %
3	HACØ	0.694	± 1.6 %	0.943	± 3.4 %	0.996	± 1.6 %
3	E1E2,E3E4	0.677	± 1.4 %	0.915	± 2.4 %	0.999	± 1.8 %
4	HACØ	0.682	± 1.8 %	0.983	± 4.3 %	0.997	± 1.6 %
4	E1E2,E3E4	0.661	± 1.9 %	0.955	± 3.0 %	0.998	± 2.2 %
5	HACØ	0.688	± 1.8 %	0.966	± 3.5 %	1.001	± 1.7 %
5	E1E2,E3E4	0.668	± 1.8 %	0.950	± 3.5 %	0.994	± 1.9 %
6	HACØ	0.686	± 2.0 %	0.988	± 2.4 %	0.996	± 1.9 %
6	E1E2,E3E4	0.669	± 1.9 %	0.956	± 2.8 %	0.991	± 2.0 %
7	HACØ	0.686	± 1.7 %	0.972	± 2.1 %	0.995	± 1.4 %
7	E1E2,E3E4	0.669	± 2.3 %	0.964	± 2.7 %	0.996	± 2.1 %
8	HACØ	0.688	± 1.6 %	0.968	± 2.6 %	0.998	± 1.3 %
8	E1E2,E3E4	0.668	± 2.2 %	0.962	± 3.7 %	0.993	± 2.1 %
9	HACØ	0.685	± 1.9 %	1.028	± 2.4 %	1.001	± 1.5 %
9	E1E2,E3E4	0.668	± 1.8 %	1.029	± 4.2 %	1.002	± 2.0 %
10	HACØ	0.672	± 1.3 %	0.970	± 3.7 %	0.996	± 1.4 %
10	E1E2,E3E4	0.662	± 1.6 %	0.914	± 3.7 %	0.994	± 1.8 %
11	HACØ	0.704	± 1.0 %	0.989	± 2.5 %	0.999	± 1.6 %
11	E1E2,E3E4	0.687	± 1.3 %	0.984	± 2.1 %	0.999	± 1.9 %
12	HACØ	0.704	± 1.2 %	0.927	± 3.4 %	0.875	± 1.2 %
12	E1E2,E3E4	0.679	± 1.8 %	0.996	± 3.3 %	0.998	± 4.2 %
13	HACØ	0.667	± 1.1 %	1.008	± 2.2 %	1.001	± 1.3 %
13	E1E2,E3E4	0.637	± 1.9 %	0.987	± 3.0 %	0.996	± 1.6 %
14	HACØ	0.656	± 1.4 %	0.992	± 3.0 %	0.997	± 1.4 %
14	E1E2,E3E4	0.633	± 1.8 %	0.996	± 2.9 %	1.002	± 1.8 %
15	HACØ	0.676	± 1.1 %	0.983	± 2.4 %	1.000	± 1.3 %
15	E1E2,E3E4	0.659	± 1.4 %	0.984	± 3.7 %	0.997	± 1.8 %
16	HACØ	0.695	± 2.1 %	1.015	± 3.2 %	1.002	± 1.9 %
16	E1E2,E3E4	0.663	± 2.7 %	0.987	± 4.3 %	1.000	± 1.7 %
17	HACØ	0.680	± 3.6 %	0.988	± 5.3 %	0.999	± 2.3 %
17	E1E2,E3E4	0.676	± 1.6 %	0.992	± 3.2 %	1.002	± 1.9 %
18	HACØ	0.687	± 2.3 %	0.983	± 2.8 %	0.997	± 1.6 %
18	E1E2,E3E4	0.679	± 2.3 %	0.944	± 3.2 %	0.998	± 2.0 %
20	HACØ	0.682	± 1.1 %	0.969	± 3.0 %	1.001	± 1.5 %
20	E1E2,E3E4	0.656	± 2.1 %	0.950	± 3.3 %	0.995	± 2.0 %
21	HACØ	0.693	± 1.3 %	1.021	± 3.1 %	1.000	± 1.7 %
21	E1E2,E3E4	0.671	± 1.2 %	1.009	± 4.1 %	1.001	± 1.6 %
22	HACØ	0.693	± 2.6 %	0.994	± 3.7 %	0.996	± 1.6 %
23	HACØ	0.679	± 2.3 %	0.983	± 1.5 %	1.004	± 1.5 %
Mittelwerte für HACØ		0.685	± 2.2 %	0.983	± 3.9 %	0.997	± 2.0 %
Mittelwerte für E1E2,E3E4:		0.664	± 2.8 %	0.969	± 4.5 %	0.997	± 2.1 %

Tabelle F.21: Modulmittelwerte der optischen Parameter für RHAC1-Szintillatoren.

Literaturverzeichnis

- [AMA 81] U. Amaldi,
Fluctuations in Calorimetry Measurements,
Physica Scripta 23 (1981) p.409
- [AND 91] A. Andresen et al.,
Construction and Beam Test of the ZEUS Forward and Rear Calorimeter,
Nucl. Instr. and Meth. A309 (1991) p.101
- [BEH 88] U. Behrens, E. Ros, W. Vogel,
First Measurement with Radioactive Sources in FCAL Prototype Modules,
ZEUS-Note 88-56, Hamburg (1988)
- [BEH 90] U. Behrens, et al. ,
Test of the ZEUS Forward Calorimeter Prototype,
Nucl. Instr. and Meth. A289 (1990) p.115
- [BIC 91] B. Bicken, U. Holm, T. Marckmann, K. Wick, M. Rhode,
Recovery and Permanent Radiation Damage of Plastic Scintillators at Different Dose Rates,
IEEE Transactions on Nuclear Science Vol.38, No.2 (1991) p.188
- [BRÜ 86] H. Brückmann,
A Precision Calibration Method (DU-CO) for the ZEUS Hadron Calorimeter,
ZEUS-Note 86-036, Hamburg (1986)
- [BUS 92] W. Busjan et al.,
Radiation Damage of Wave-Length Shifters,
wird veröffentlicht in Nuclear Physics B (1992)
- [CAT 87] M. Catanesi et al.,
Hadron, Elektron and Muon Response of a Uranium-Scintillator Calorimeter,
Nucl. Instr. and Meth. A260 (1987) p.43
- [CRI 90] J. Crittenden, E. Ros, J. Straver, T. Tsurugai
Calibration of FCAL and RCAL Modules at CERN,
ZEUS-Note 90-111, Hamburg (1990)
- [DAN 92] A. Dannemann,
persönliche Mitteilung,
Hamburg (1992);

- [DAW 89] J. Dawson et al.,
VME-Based DC Multiplexer/ADC,
AMZEUS-81, Rev.1, (1989); Argonne National Laboratory
- [FAB 86] C. W. Fabjan,
Calorimetry in High Energy Physics,
CERN-EP 85-54 (1985)
- [FER 86] R. Fernow,
Introduction to Experimental Particle Physics,
Cambridge (1986), Cambridge Univ. Pr.
- [GIA 89] I. Gialas, A.C. Caldwell, S.M. Ritz, F.J. Sculli,
Effect of Light Output Nonuniformity on the ZEUS Barrel Calorimeter Calibration,
Columbia University, (1989)
- [GIL 90] D. Gilkinson,
persönliche Mitteilung,
Hamburg, Genf (1990)
- [GIL 91] D. Gilkinson,
persönliche Mitteilung,
Hamburg, Montreal (1991)
- [GLO 91] G. Gloth,
Uniformitätsmessungen am ZEUS-Kalorimeter mit Hilfe von radioaktiven Präparaten und ihre Analyse,
Diplomarbeit Universität Hamburg (1991)
- [HAN 88] S. R. Hahn et al.,
Calibration Systems for the CDF Central Electromagnetic Calorimeter,
Nucl. Instr. and Meth. A267 (1988) p.351
- [HAR 91] J. Hartmann et al.,
Light Guides for the ZEUS Forward and Rear Calorimeters,
Nucl. Instr. and Meth. A305 (1991) p.366
- [HUN 91] L. W. Hung,
The ⁶⁰CO Calibration of the ZEUS Calorimeters,
MSc. McGill University Montreal, Québec (1991)
- [KAM 83] T. Kamon, K. Kondo, A. Yamashita, T. Shimizu, L. Nodulman,
A New Scintillator and Wavelength Shifter,
Nucl. Instr. and Meth. 213 (1983) p.261
- [KRÜ 90] R. Krüger,
Kalibration des ZEUS-Vorwärtskalorimeters mit radioaktiven Quellen,
Diplomarbeit Universität Hamburg (1990)
- [MAR 91] Th. Marckmann,
Serienuntersuchung zur Strahlenstabilität und Lichtausbeute des Szintillators SCSN-38 des ZEUS-Kalorimeters,
Diplomarbeit Universität Hamburg (1990)

- [MEY 91] F. Meyer,
Prüfung der mechanischen und optischen Eigenschaften des ZEUS-Kalorimeters.
Diplomarbeit Universität Hamburg (1991)
- [NEU 91] Th. Neumann,
Untersuchungen über Strahlenschäden an Wellenlängenschiebern und Szintillatoren,
Diplomarbeit Universität Hamburg (1991)
- [EGS 85] W. R. Nelson, H. Hirayama, D. W. O. Rogers,
The EGS4 Code System,
SLAC Report-265, (1985); Stanford Linear Accelerator Center
- [PAR 90] Particle Data Group,
Review of Particle Properties,
Phys. Lett. B 239 (1990)
- [POE 89] G. Poelz,
Strahlenschutz: Definitionen, Bemerkungen,
unveröffentlichte ZEUS-Mitteilung Hamburg (1989)
- [RIE 87] G. Riedel,
Longitudinale Ortsabhängigkeit der Antwortfunktion von Wellenlängenschiebern,
Diplomarbeit Universität Hamburg (1988)
- [RIM 90] Th. Rimkus,
Experimentelle Untersuchungen zur Quelleneichung von Hadronenkalorimetern und deren Analyse,
Diplomarbeit Universität Hamburg (1990)
- [ROG 84] D. W. O. Rogers,
Low Energy Electron Transport with EGS,
Nucl. Instr. and Meth. 277 (1984) p.535
- [ROS 86] E. Ros,
Effect of the Longitudinal Nonuniformities in the Calibration of the ZEUS Calorimeter,
ZEUS-Note 86-035 Hamburg (1986)
- [SCH 92] V. Schlottmann,
Analyse der optischen Eigenschaften von Szintillator- und Wellenlängenschiebermaterialien nach Bestrahlung,
Diplomarbeit Universität Hamburg (1992)
- [SIG 64] K. Siegbahn,
Alpha-, Beta- and Gamma-Ray Spectroscopy,
Amsterdam (1964)
- [WIC 92] K. Wick,
persönliche Mitteilung,
Hamburg (1992);
- [ZRE 70] V.P. Zrelov,
Čerenkov Radiation in High-Energy Physics,
Vol.1.2, Jerusalem, Israel: ISPT (1970)

Danksagung

Für die Ermöglichung und Betreuung dieser Promotionsarbeit danke ich Herrn Prof. Dr. K. Wick. Herrn Dr. R. Klanner danke ich für die zahlreichen, anregenden Diskussionen und die Durchsicht des Manuskripts.

Herzlich bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit bei der ^{60}Co -Gruppe:

B. Böhnert, D. Gilkinson, G. Gloth, D. Hanna, W. Hung, R. Krüger und K. Wick.

Weiterhin möchte ich allen Mitgliedern der ZEUS-Kollaboration für die Unterstützung und die Hilfe während des Schichtbetriebes danken.

Besonderen Dank gebührt der mechanischen Werkstatt des I. Institutes: B. Leicht und H. Wleklinski für die immer schnelle und sorgfältige Ausführung mechanischer Arbeiten nach laienhaften Vorlagen, den Technikern R. Mohrmann und H. Prause für die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der Experimente und W. Grell für die fachmännische Hilfe beim Aufbau mehrerer „hot sources“.

Frau Harm vom ZEUS-Sekretariat danke ich für die zuverlässige Erledigung vieler organisatorischer Arbeiten, Herrn Sabath von der Werkstattgruppe F35 für seinen Einsatz den Arbeiten an den Kalorimetermodulen.

Herrn H. Kammerlocher gilt mein Dank für die Erstellung des Programmpaketes für den „runcontroller“ und für die ständige Bereitschaft mit Rat und Tat behilflich zu sein.

Abschließend möchte ich allen Mitarbeitern am I. Institut sowie am DESY meinen Dank aussprechen, die am Gelingen dieser Arbeit Anteil hatten.

Herzlicher Dank gilt auch meiner Familie, allen Freunden und ganz besonders meiner Freundin Almut für die Geduld und Nachsicht, die häufig nötig waren.

Hamburg, den 04. Oktober 1992

Ich versichere, daß ich die vorliegende Dissertation unter Angabe aller verwendeter Referenzen selbständig angefertigt habe.

(Bodo Krebs)