

D

Entwicklung eines Lasermonitorsystemes für das rückwärtige elektromagnetische Kalorimeter des HERA-H1-Detektors

Experimentell-physikalische Diplomarbeit
am I. Institut für Experimentalphysik
der Universität Hamburg

vorgelegt von
Manfred Fleischer

Tornesch
im August 1990

Das rückwärtige elektromagnetische Kalorimeter (BEMC) des HERA-H1-Detektors, das aus 88 Blei-Szintillator-Sampling-Modulen aufgebaut ist, die mit PIN-Dioden über seitlich angebrachte Wellenlängenschieber ausgelesen werden, soll mit Hilfe eines Lasermonitorsystemes überwacht werden.

Das Konzept sieht vor, das UV-Licht eines gepulsten Stickstofflasers ($\lambda = 337.1 \text{ nm}$) mittels zweier Quarzglasfasern zu zwei Verteilern zu transportieren, dort unter Beibehaltung der Wellenlänge auf jeweils 115 HCS-Fasern eines Faserbündels zu verteilen und in die Module des BEMC einzupeisen. Das so erzeugte Szintillationslicht dient als Monitorsignal zur Aufrechterhaltung der Energieeichung in der Zeit zwischen den Nacheichungen über Physikereignisse, zur Interkalibration der Detektormodule und zur Intrakalibration der Photodioden eines Modules.

Dieses Lasermonitorsystem wurde im Labor aufgebaut. Alle Komponenten des Systemes wurden im besonderen Hinblick auf die notwendige Stabilität vor dem Hintergrund einer Genauigkeit von 1% untersucht. Dabei wurde gefordert, daß das Verhältnis der Lichtintensitäten in den verschiedenen Fasern konstant ist. Die Untersuchungen zur Absoluteichung, also der Bau eines Referenzsystemes, werden in einer anderen Diplomarbeit durchgeführt.

Zum Nachweis der Funktionsfähigkeit des Systemes wurden mehrere Langzeittests durchgeführt. Ein erster Einsatz dieses Systemes an den Modulen des BEMC erfolgte während der Kalibrationsmessungen am DESY-Teststrahl.

The backward electromagnetic calorimeter (BEMC) of the H1-detektor at HERA - consisting of 88 lead-szintillator-sampling-calorimeter-modules with read-out by wavelength-shifters and photodiodes - shall be controlled by a laser-monitoring-system.

The UV-light of a pulsed nitrogen-laser ($\lambda = 337.1 \text{ nm}$) will be transported via two silica-fibers to distribution-boxes. There the UV-light will be distributed to 115 Hard-Clad-Silica-fibers of a fiberstar, which transport the monitor-signals to the modules of the BEMC. These signals will be used for calibration in the time between recalibration by physical events and for intercalibration of the modules and of the photodiodes in each module.

This laser-monitoring-system has been built up in the laboratory and was tested for stability on a level of 1%. It was demanded, that the ratio of light intensities of the different fibers was constant. The absolute calibration by means of a reference-system is being developed in a second thesis.

To proof the system under real conditions some long-time-tests were performed. A first installation of the laser-monitoring-system at the modules of the BEMC has been done in a calibration-run at the DESY-testbeam.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Einführung in Kalibration und Monitoring	6
2.1	Probleme von Kalbration am Beispiel des BEMC	6
2.2	Funktionsweise von Monitorsystemen	9
3	Das Konzept für die Überwachung des BEMC	11
3.1	Methoden der Überwachung ohne Monitorsystem	11
3.1.1	Elektronischer Pulsler	11
3.1.2	Elektronspektren der e-p-Wechselwirkung	12
3.1.3	Minimal-ionisierende Teilchen	14
3.2	Das Konzept des Lasermonitorsystemes	15
3.2.1	Anforderungen an das Monitorsystem	15
3.2.2	Überblick über Aufbau und Installation des Monitorsystemes	16
3.2.3	Aufgaben des Lasermonitorsystemes	20
4	Die Komponenten des Lasermonitorsystemes	22
4.1	Der Laser	24
4.1.1	Betriebsdaten des Stickstofflasers	24
4.1.2	Der Betrieb des Lasers	25
4.2	Die laserseitige Optik	27
4.2.1	Justierung des Laserkopfes	28
4.2.2	Einfluß des Strahlquerschnittes	29
4.2.3	Der Strahlteiler	30
4.2.4	Neutralfilter	31
4.2.5	Einkopplung in die Primärfaser	34
4.3	Die Primärfaser	36
4.3.1	Konfektionierung der Primärfasern	36
4.3.2	Krümmungsverhalten der Primärfasern	37
4.3.3	Kopplungseigenschaften	38
4.4	Der Verteiler	40
4.4.1	Das Verfahren zur Homogenisierung der Ausleuchtung am Verteilerausgang	40
4.4.2	Optimierung der Ausleuchtung	41
4.5	Die Sekundärfasern	45
4.5.1	Krümmungseigenschaften der Sekundärfasern	45
4.5.2	Aufbau eines Faserbündels	48
4.5.3	Testmessungen mit einem Faserbündel	50

Inhaltsverzeichnis

4.6	Die Referenzfasern	56
4.6.1	Die Konfektionierung der Referenzfasern	57
4.6.2	Die Faser-Faser-Kopplung	58
4.6.3	Ankopplungstest der Referenzfaser an den Referenzphotomultiplier	59
5	Stabilitätsverhalten	60
5.1	Kurzzeitstabilität	60
5.2	Verhalten bei Wiederinbetriebnahme	62
5.3	Langzeitverhalten	63
5.3.1	Langzeittest I: Überdehnung von Sekundärfasern	64
5.3.2	Langzeittest II: Verlegung unter Spannung	65
5.3.3	Langzeittests III und IV	66
6	Probelauf am DESY-Teststrahl	68
7	Zusammenfassung	73
A	Die Physik des Stickstoff-Lasers	75
B	Betrieb und Bedienung des Lasers	78
C	Zur Installation des Systemes	84
D	Faseroptik und Faserdaten	90
	Literaturverzeichnis	94
	Danksagung	99

Abbildungsverzeichnis

1.1	Lageplan von HERA	1
1.2	Der H1-Detektor	2
1.3	Der Aufbau des BEMC	4
3.1.1	Zeit (in Tagen), bis jedes Modul von 100 quasielastischen Ereignissen getroffen wurde	12
3.1.2	Myonenspektren	14
3.2.1	Transmission von Quarzglas.....	16
3.2.2	Der laserseitige Aufbau	17
3.2.3	Der Aufbau des Verteilungssystems	18
3.2.4	Einkopplungsorte bei der letzten Szintillatorplatte.....	18
3.2.5	Aufbau der Referenzsysteme	19
3.2.6	Quotientenspektrum	21
4.0.1	Meßaufbau	22
4.0.2	Der Detektor und die verwendete Elektronik	23
4.1.1	Signalhöenspektrum des gereinigten Lasers bei optimaler Einstellung .	25
4.1.2	Signalhöenspektrum des Lasers im verschmutzten Zustand	26
4.1.3	Signalhöhe des Lasers während eines Dauertests	26
4.1.4	Signalhöhe des Lasers während des Langzeittests III	27
4.2.1	Laserseitiger Aufbau im Labor	28
4.2.2	Einfluß des Strahldurchmessers auf den Quotienten	29
4.2.3	Verhältnis der zwei Signale hinter dem Strahlteiler	30
4.2.4	Meßaufbau zur Bestimmung der Transmission von Filtern	31
4.2.5	Durch Neutralfilter erreichbare Signalhöhen	32
4.2.6	Quotientenspektren bei unterschiedlichen Intensitäten	33
4.2.7	Quotient bei Benutzung verschiedener Filter.....	34
4.2.8	Quotient bei Verschiebung des Einkopplungsortes entlang der optischen Achse	35
4.2.9	Quotient bei Verschiebung quer zur optischen Achse	35
4.3.1	Polierte Faseroberflächen	37
4.3.2	Radienabhängigkeiten	37
4.3.3	Quotient bei laserseitiger Drehung der (geklebten) Primärfaser	39
4.3.4	Statistik bei wiederholter laserseitiger Ankopplung	39
4.3.5	Statistik bei den verteilerseitigen Kopplungstests	40
4.4.1	Polardiagramm der Lichtverteilungen an verschiedenen Streuscheiben .	41
4.4.2	Aufbau der verteilerseitigen Optik.....	42
4.4.3	Maximale Intensität in Abhängigkeit des Linsenabstandes	42
4.4.4	Intensitätsverteilung am Verteilerausgang	44

Abbildungsverzeichnis

4.5.1	Aufbau einer HCS-Faser	45
4.5.2	Aufbau zur Messung des Krümmungsverhaltens	46
4.5.3	Krümmungsverhalten der Sekundärfasern	46
4.5.4	Transmission bei einer Windung	47
4.5.5	Hülse des Faserbündels	48
4.5.6	Optisch aktive Fläche eines Faserbündels	49
4.5.7	Einfluß der Crimptiefe auf die Transmission	49
4.5.8	Ein konfektioniertes Faserbündel	50
4.5.9	Transmissionen und Signalhöhenbereiche der Fasern des blauen Faserbündels	51
4.5.10	Abstrahlcharakteristik einer schlecht konfektionierten Faser.....	52
4.5.11	Bereiche der Oberfläche	53
4.5.12	Transmission der Fasern des blauen Faserbündels, sortiert nach den Bereichen	54
4.5.13	Fasern des Randbereiches in nicht optimaler Position	55
4.5.14	Fasern des Randbereiches, optimal verlegt	55
4.6.1	Ein SMA-Stecker vom Typ 905	57
4.6.2	Polierte Oberfläche im SMA-Stecker	57
4.6.3	Prinzip einer Faser-Faser-Kopplung.....	58
4.6.4	Statistik bei dem Test der Faser-Faser-Kopplung.....	58
4.6.5	Signalhöhenspektrum eines Photomultipliers unter Verwendung eines CsJ-Kristalls	59
5.1.1	Der Quotient während des ersten Tests zur Kurzzeitstabilität	61
5.1.2	Zweiter Test zur Kurzzeitstabilität	62
5.2.1	Stabilitätsverhalten bei Wiederinbetriebnahme des Lasers	63
5.3.1	Langzeittest I	64
5.3.2	Langzeittest II	65
5.3.3	Langzeittest III	66
5.3.4	Langzeittest IV	67
6.1	Positionierung der Module bei den Kalibrationsmessungen	68
6.2	Signalhöhenspektren eines Monitorlaufes mit optischer Dichte 2.13 .	69
6.3	Quotientenspektren bei einem Monitorlauf mit optischer Dichte 2.13 .	71
A1	Der Laserkopf	75
A2	Niveauschema des Stickstofflasers	76
A3	Prinzipschaltbild des Lasers	77
B1	Stickstoffversorgung im verwendeten Stickstofflaser	78
B2	Signalhöhe des Lasers in Abhängigkeit vom Stickstoffdurchfluß	79
B3	Druckabhängigkeit des Lasers	80
B4	Pulsratenabhängigkeit des Lasers	81
B5	Der Aufbau des Laserkopfes	82
B6	Der Aufbau des <i>Spark-Gaps</i>	83

Abbildungsverzeichnis

C1	Der H1-Detektors in der Strahlposition	84
C2	Rückwand des Elektronik-Trailers	85
C3	Aufbau des BEMC	86
C4	Fuß des BEMC mit dem montierten Verteiler	87
C5	Kopplung der Sekundärfasern an die Module des BEMC	88
C6	Die Stecker des Faserbündels	89
D1	Aufbau einer Stufenindex-Multimode-Faser	90
D2	Akzeptanz einer Stufenindex-Faser	91
D3	Moden in einer Stufenindex-Multimode-Faser	92
D4	Pulsverbreiterung durch Multimode-Dispersion	92

Tabellenverzeichnis

2.1	Strahlenschäden in SCSN 38 und Y 7	8
4.1	Daten des verwendeten Stickstofflasers	24
4.2	Auswirkungen von Reinigung und Neueinstellung des Lasers auf den Quotienten	29
4.3	Transmission der verwendeten Neutralfilter	31
4.4	Monitorsignale und die Eichpunkte des BEMC	32
4.5	Breite der "Homogenitätsbereiche" am Verteilerausgang	43
4.6	Intensitätsverteilung am Verteilerausgang	44
4.7	Einfluß des Abstandes zwischen Faseroberfläche und Szintillatorplatte	52
4.8	Das "blaue" Faserbündel im Überblick	53
6.1	Mittelwerte der Diodenspektren von Modul Nr.10	70
D1	Faserdaten der verwendeten HCS-Fasern	93

Kapitel 1

Einleitung

Im Jahr 1991 wird die **Hadronen-Elektronen-Ring-Anlage (HERA)** in Betrieb gehen. Es sollen dort Kollisionen von 820 GeV Protonen und 30 GeV Elektronen untersucht werden. HERA ist damit die erste Speicherringanlage, in der Teilchen unterschiedlicher Familien zur Kollision gebracht werden; in den früher gebauten Speicherringexperimenten werden Teilchen und deren Antiteilchen (also e^+ und e^- oder p und \bar{p}) verwendet. Die geplante Schwerpunktergie von 314 GeV wird in den ersten Jahren nach Inbetriebnahme die höchste, in Speicherringanlagen erreichte *CM*-Energie sein. Sie entspricht im Fall eines *Fixed-Target*-Experiments einem Leptonen-Strahl mit einer Energie von 52 TeV .

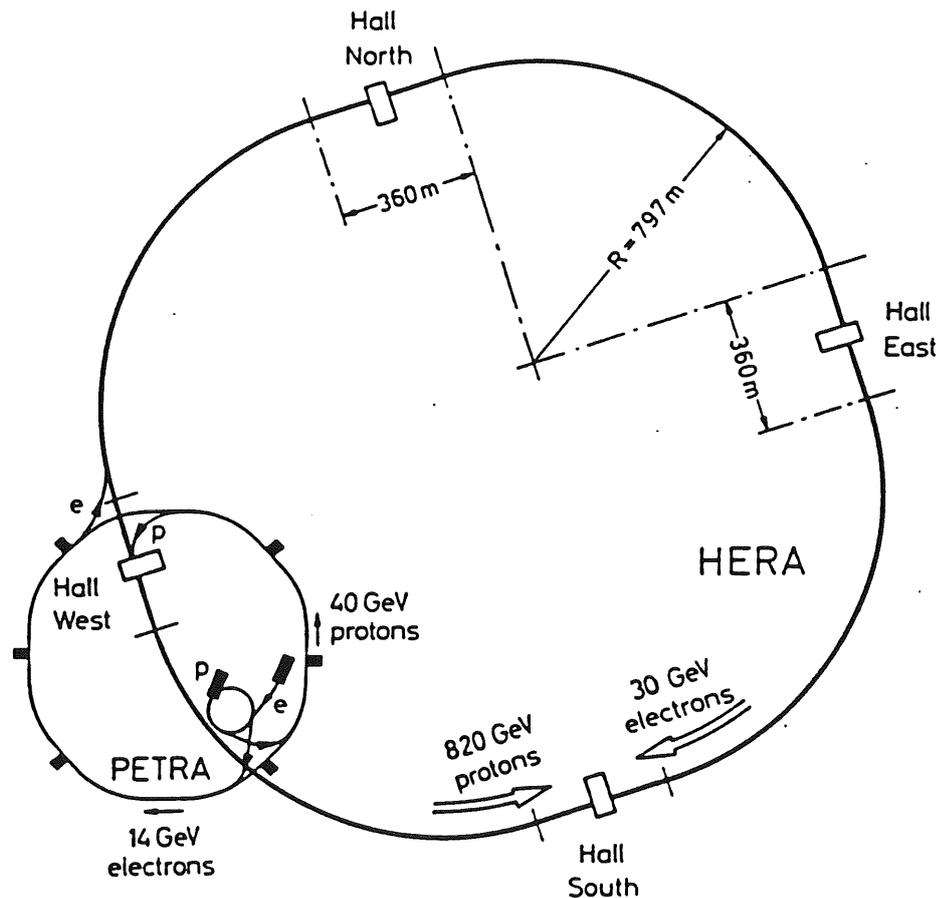


Abbildung 1.1: Lageplan von HERA; aus [Wol 86]

HERA bietet die Möglichkeit, die Strukturfunktion des Protons in einem bisher noch nicht erschlossenem Bereich kinematischer Variablen (Q^2 bis $40\,000\text{ GeV}^2$) zu bestimmen. Messungen zur Überprüfung und Untersuchung der QCD und der elektroschwachen Wechselwirkung können vorgenommen werden und geben Aufschluß über eine eventuelle Unterstruktur der Quarks und Leptonen bei einer Auflösung von $3 \cdot 10^{-20}\text{ m}$ [Wol 86]. Außerdem wird sich HERA möglicherweise als eine Quelle für neue Teilchen erweisen, z.B. des Higgs-Bosons oder des top-Quarks, das bei einer Masse zwischen 140 und $200\text{ GeV}/c$ vermutet wird [Hol 90].

Bei HERA werden zunächst zwei Detektoren aufgebaut: **H1** und **ZEUS**. In diesen Detektoren sollen möglichst viele Größen der Reaktionsprodukte bestimmt werden: Masse, Ladung, Impuls, Energie und Flugrichtung. Da nun aber das Schwerpunktsystem der e-p-Kollisionen nicht mit dem Laborsystem übereinstimmt, sind die Detektoren asymmetrisch aufgebaut.

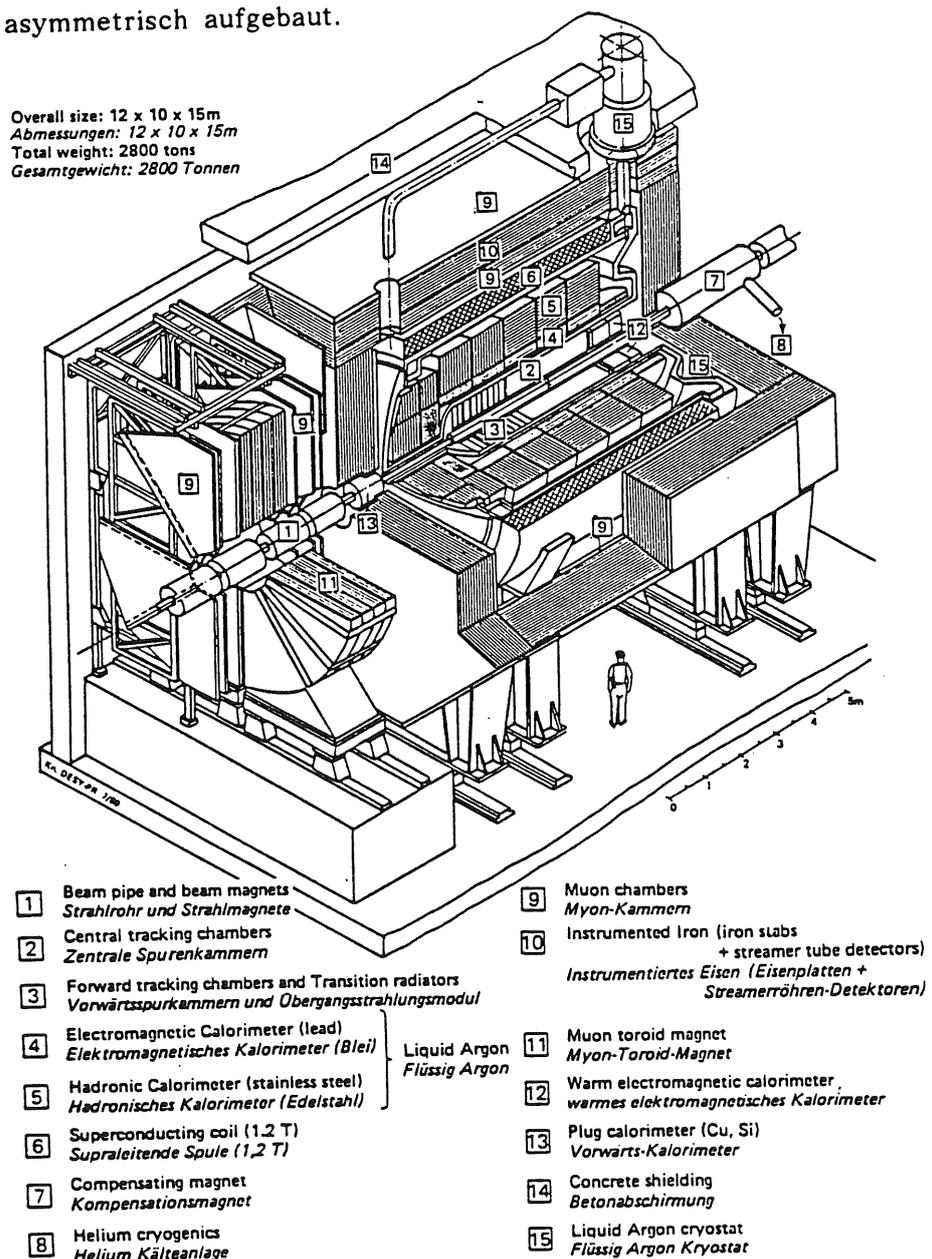


Abbildung 1.2: Der H1-Detektor; aus [TPR 89]

Im H1-Detektor (Abbildung 1.2) wird der Wechselwirkungspunkt (WWP) zunächst von Driftkammern und Vieldraht-Proportionalkammern ([2] und [3]) umschlossen, die die Spur geladener Teilchen messen. Diese Spurenkammern liegen im Innern des Liquid-Argon-Kalorimeter, bestehend aus einem elektromagnetischen [4] und einem hadronischen Teil [5], dessen Aufgabe es ist, die Reaktionsprodukte zu stoppen und dabei ihre Energie zu bestimmen. Das Liquid-Argon Kalorimeter ist in einem Kryostaten aufgebaut.

Weiter außen befindet sich eine supraleitende Spule [6], mit der ein homogenes axiales Magnetfeld von 1.2 Tesla erzeugt wird. Ein instrumentiertes Eisenjoch [10] umrandet von Myonendetektoren nimmt den Magnetfeldrückfluß auf.

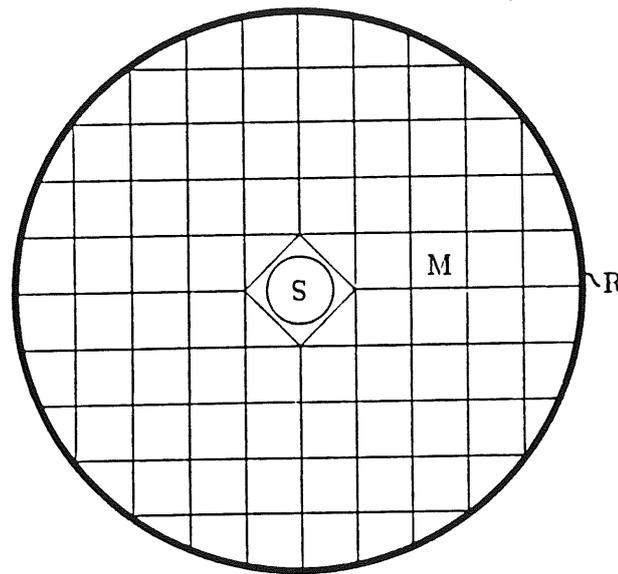
Um einen möglichst großen Raumwinkel zur vollständigen Erfassung aller kinematischer Größen abzudecken, wird das zylindrisch aufgebaute Liquid-Argon-Kalorimeter auf der Ein- und Austrittsseite des Strahlrohres durch zwei kleinere Kalorimeter ergänzt, durch das Vorwärtskalorimeter [13] und das rückwärtige elektromagnetische Kalorimeter [12]; sie befinden sich außerhalb des Kryostaten und werden deshalb auch als warme Kalorimeter bezeichnet.

Alle Kalorimeter des H1-Detektors arbeiten nach dem "Sampling-Prinzip": Es wechseln sich Lagen passiven Absorbermaterials (im Fall des H1-Detektors: Cu, Fe oder Pb) mit Schichten aktiven Materials (Szintillator, flüssiges Argon o.ä.) ab. Als Absorbermaterial verwendet man bevorzugt Elemente mit hoher Ordnungszahl¹, in denen hochenergetische Teilchen wirkungsvoll abgebremst werden, weil charakteristische Abschwächlängen wie die Strahlungslänge X_0 (bei Elektronen) oder die nukleare Absorptionslänge λ (bei Hadronen) kurz sind. Dabei entsteht ein Teilchenschauer, dessen Energie im passiven Material nicht gemessen werden kann. Ein kleiner, im statistischen Mittel aber konstanter Teil der Schauerenergie wird im aktiven Medium deponiert und kann dort ausgelesen werden.

Im Fall des rückwärtigen elektromagnetischen Kalorimeters BEMC (*backward electromagnetic calorimeter*), auf dessen Erfordernisse die vorliegende Diplomarbeit ausgerichtet ist, handelt es sich um ein Blei-Szintillator-Kalorimeter. Es befindet sich in Elektronenflugrichtung hinter dem WWP. Seine Hauptaufgabe ist die Messung der Energie gestreuter Elektronen. Das BEMC hat einen Durchmesser von ca. 160 cm und ist 40 cm tief. Damit deckt es einen Winkelbereich von 155 bis 175 Grad ab (nach der H1-Konvention: Protonenrichtung entspricht 0 Grad). Das Kalorimeter besteht aus 88 Modulen, von denen 56 einen quadratischen und 32 einen dreieckigen oder trapezförmigen Querschnitt haben (siehe Abbildung 1.3 a).

Alle Module sind aus 50 Lagen Szintillator vom Typ SCSN 38 und 49 Lagen Blei aufgebaut (siehe Abbildung 1.3 b). Das entspricht einer Länge von 22.4 X_0 . Die Auslese der Signale erfolgt über seitlich angebrachte Wellenlängenschieber, in denen das blaue Szintillationslicht, das bei dem Durchqueren eines geladenen Teilchens durch das Modul in den aktiven Schichten entsteht, in grünes Licht umgewandelt wird. An den Enden der Wellenlängenschieber befinden sich Photodioden, die das auftreffende Licht in elektrische Impulse umsetzen. Diese Impulse werden

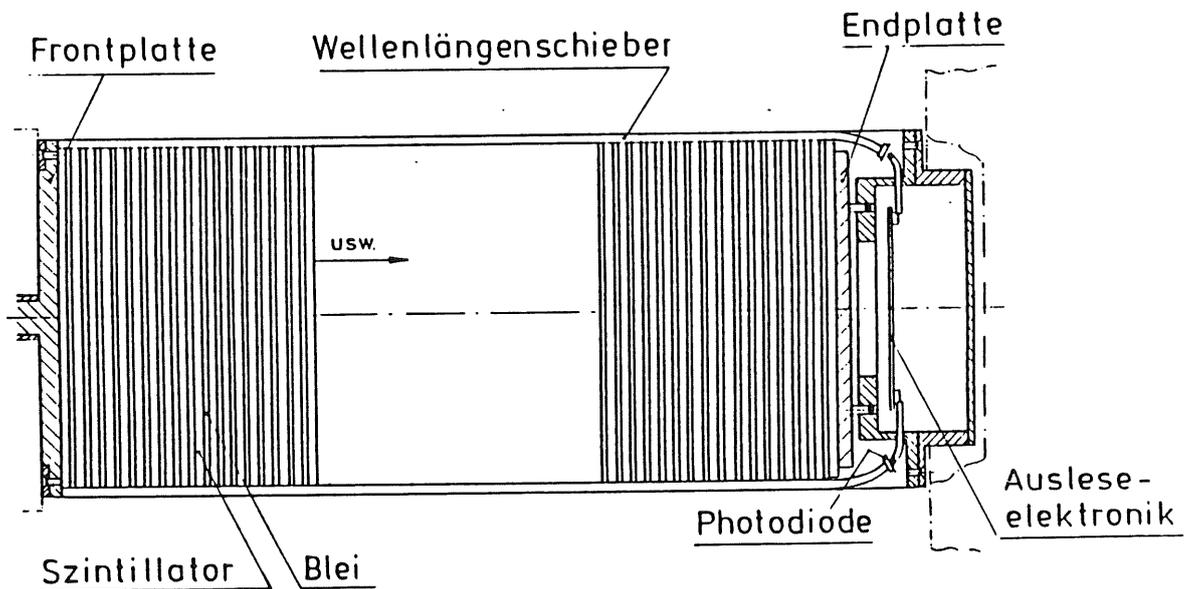
¹ Die Auswahl von Fe und Cu - zwei Elemente mit mittlerer Ordnungszahl - ist als Kompromiß zwischen Kosten und physikalisch wünschenswerten Eigenschaften zu verstehen.



M: Kalorimetermodul
 R: Trägerring
 S: Strahlrohr

Abbildung 1.3: Der Aufbau des BEMC

a: (oben) Anordnung der Module
 b: (unten) Ein quadratisches Modul des BEMC im Längsschnitt



durch ladungsempfindliche Vorverstärker, die sich an den Enden der Module befinden, verstärkt. Bei den quadratischen und trapezförmigen Modulen werden an zwei gegenüberliegenden Seiten kurze Wellenlängenschieber angebracht. Mit diesen zusätzlichen Wellenlängenschiebern, die nur an den hinteren 15 Szintillatorschichten anliegen, ist es möglich, Elektronen von Hadronen zu unterscheiden. Die Elektronen haben ihr Schauermaximum im vorderen Teil der Module, während die Hadronen (insbesondere Pionen) auf der relativ kurzen Absorptionsstrecke von nur 0.8λ , die der Detektor für sie darstellt, auch im hinteren Teil Energie deponieren, wenn auch kein vollständiges *Energie-containment* erfolgt. So wird das Verhältnis der Signale von langen und kurzen Wellenlängenschiebern in gewissem Umfang eine Separation der Elektronen von den hadronischen Ereignissen ermöglichen.

Kapitel 1: Einleitung

Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Monitorsystemes, das dazu beitragen soll, die Eichung des BEMC über einen Zeitraum von mehreren Jahren aufrecht zu erhalten. Die Ergebnisse einer Voruntersuchung [Sch 89] dienen als Ausgangspunkt bei Auslegung und Konstruktion des Systemes, das auf Einspeisung kurzer, ultravioletter Lichtpulse (337.1 nm) eines Stickstofflasers in jeweils eine Szintillatorplatte der Kalorimetermodule beruht. Ziel dieser Arbeit ist der Aufbau dieses lasergestützten Monitorsystemes im Labor und der Nachweis, daß es im Rahmen der geforderten Genauigkeit von 1 % im Prinzip funktioniert.

Alle Untersuchungen zu Fragen der Stabilität der Referenzsysteme sind bei [Gri 90] dargestellt. Was die Installation und erste Erfahrungen nach Inbetriebnahme des Monitorsystemes betrifft, wird bei [Ssc 91] zu finden sein.

Diese Diplomarbeit gliedert sich in sieben Kapitel:

Nach der Einleitung (Kapitel 1) werden im Kapitel 2 die Grundlagen von Kalibration und "Monitoring" erörtert. Daraus resultierend wird das Konzept des Lasermonitorsystemes für das BEMC im 3. Kapitel vorgestellt. Die Darstellung der Eigenschaften der Komponenten des Lasermonitorsystemes folgt im 4. Kapitel. Untersuchungsergebnisse zu Fragen der Stabilität sind im 5. Kapitel zu finden. Von den ersten Erfahrungen beim Einsatz des Systemes am DESY-Teststrahl wird im 6. Kapitel berichtet. Das siebte Kapitel enthält eine Zusammenfassung.

Kapitel 2

Einführung in Kalibration und Monitoring

In diesem Kapitel soll eine Einführung in die Grundlagen von Kalibration und *Monitoring* gegeben werden, so daß die grundlegende Problematik der Überwachung von Kalorimetern deutlich wird.

2.1 Probleme von Kalibration am Beispiel des BEMC

In einem modernen Kalorimeter werden bei Energiemessungen die Ausgangssignale in digitale Informationen umgewandelt. Um eine Zuordnung von deponierter Energie zu der Nummer des Kanals eines Analog-Digital-Konverters - im folgenden nur noch kurz ADC genannt - vornehmen zu können, muß jeder Signalweg der Detektormodule mit Hilfe bekannter Energien kalibriert werden, die auf dieselbe Weise wie im späteren Meßbetrieb in den Modulen deponiert werden.

Im BEMC erzeugt ein ionisierendes Teilchen bei der Energiedeposition Szintillationslicht in den aktiven Schichten der Module. Dieses (blaue) Szintillationslicht wird an den Kanten der Szintillatorplatten in seitlich angebrachte Wellenlängenschieber eingekoppelt, (als grünes Licht) zu den Photodioden transportiert und dort in Ladungen umgewandelt. Die gemessene Ladung ist proportional zur Menge des erzeugten Lichts, ist aber abhängig von den Lichtsammleigenschaften des Detektors in Abhängigkeit von den Einschußbedingungen.

Es reicht also nicht aus, mit einer γ -Quelle nur die sensitiven Photodioden zu überwachen und dann die γ -Energie in Elementarladungen umzurechnen, da beim normalen Meßbetrieb sowohl die Lichtentstehung als auch die Verteilung und Weiterleitung des Szintillationslichtes (neben den Eigenschaften der Photodioden) wesentlich das Ausgangssignal der Module beeinflusst.

Die Module des BEMC sind also nur so zu kalibrieren, daß man Elektronen mit bekannter Energie in die Module treffen läßt und alle Faktoren, die die Lichtausbeute eines Modules beeinflussen - insbesondere Einschußort und Einschußwinkel -, bei der Eichung berücksichtigt.

Um eine genaue Kalibration zu erhalten, die auch Nicht-Linearitäten erfaßt, müssen die Signale mehrerer bekannter Energien, verteilt über den gesamten Meßbereich, aufgenommen werden. Zusätzlich muß die Linearität der Elektronik incl. der ADCs durch Pulsermessungen bestimmt werden.

Grundsätzlich gilt, daß jede Kalibration nur so genau sein kann, wie die "Referenzenergie" bekannt ist. Für das BEMC wird eine Genauigkeit von 1 % angestrebt, was sich als ein sehr hoch gestecktes Ziel erweist.

Die Kalibration aller Module des BEMC wird am DESY-Teststrahl 22 vorgenommen. Dort stehen aber nur Elektronen bis zu einer maximalen Energie von 6 GeV zur Verfügung. Zwar wurde die Strahlstabilität durch wiederholte Messungen mit "Referenzmodulen" überwacht, allerdings ist die Absolutenergie nicht mit der erforderlichen Genauigkeit bekannt; eine Renormierung wird somit nötig sein.

Deshalb ist ein weiterer Test einiger Module an einem Teststrahl von CERN geplant, wo der gesamte Meßbereich mit größerer Genauigkeit vermessen werden kann.

Nach Abschluß der Kalibrationsmessungen werden die geeichten Module im H1-Detektor eingebaut. Nun lauern aber verschiedene Gefahren, die alle die Kalibration der Module beeinflussen können:

a) Mechanische Veränderungen:

Zwar sind laut [Wun 88] aller Wahrscheinlichkeit nach solche Veränderungen der Kalibration auszuschließen, jedoch galt diese Aussage nur für die Module einer alten Konfiguration, bei denen die Wellenlängenschieber in Ausfräsungen druckfrei gelagert wurden. Bei den Modulen der jetzigen Konfiguration wurde zur Homogenisierung der Ausgangssignale eines Moduls zwischen den Szintillator- und Bleiplatten schattiertes Reflektorpapier eingelegt. Wenn nun durch Transport, Montage oder einem irgendwie gearteten Druck diese Papierlagen beeinflußt werden - z.B. daß Restluft herausgedrückt wird oder sich der Kontakt des Papiers zur Szintillatorplatte ändert, so daß die (Total-) Reflexion beeinträchtigt wird - , kann das Auswirkungen auf die Lichtausbeute, und somit auch auf die Kalibration haben.

b) Umgebung im H1-Detektor:

Das BEMC befindet sich im H1-Detektor in einem axialen Magnetfeld von ca. 1.2 Tesla. Untersuchungen zum Einfluß eines Magnetfeldes auf das Verhalten der Module des BEMC [Har 90] haben ergeben, daß ein Effekt in der Größenordnung von 3 % zu erwarten ist. Ein zweiter Effekt droht durch die im Bereich des BEMC vorgesehene Stickstoffatmosphäre: Durch Diffusion des Stickstoffs in das Szintillator- und Wellenlängenschiebermaterial der Module kann es zu einer Veränderung der Lichtausbeute kommen¹.

c) Meßbetrieb:

Während des Meßbetriebes kommt es in unmittelbarer Umgebung des Strahlrohres von HERA zu einer täglichen Strahlendosis von ca. 1 Gray. Diese Strahlenbelastung wird verursacht zum einen durch Kollisionen (besonders des Protonenstrahls) mit Molekülen und Atomen des Restgases und mit Materie der Umgebung des Strahlrohres, zum anderen durch Synchrotronstrahlung des Elektronenstrahls.

¹ Ein Ersatz der Stickstoffatmosphäre durch trockene Luft sollte auch vor dem Hintergrund von Strahlenschäden (siehe Punkt C) erwogen werden.

Durch Strahlenschäden kommt es zu einer zusätzlichen Absorption. Die gesamte Abschwächlänge δ_{ges} setzt sich dann aus einer materialspezifischen Abschwächlänge δ_o und einer durch Strahlung bedingten Abschwächlänge δ_{rad} wie folgt zusammen:

$$\delta_{ges}^{-1} = \delta_o^{-1} + \delta_{rad}^{-1}$$

Die Größe δ_{rad}^{-1} setzt sich aus einem nicht permanenten Teil proportional zu $a \cdot D$ und einem permanenten Teil $b \cdot D$ zusammen:

$$\delta_{rad}^{-1}(D,t) = a \cdot D \cdot e^{-t/T} + b \cdot D$$

wobei D die Dosis und T Zeitkonstante für die Erholung ist.

Die Größen a , b und T sind für das verwendete Szintillatormaterial SCSN 38 und das Wellenlängenschiebermaterial Y 7 bei einer Bestrahlung mit 25 MeV Protonen und einer Dosis von 10^4 Gray bestimmt worden [ZEU 87].

Material	SCSN 38	SCSN 38	Y 7	Y 7
Atmosphäre	Stickstoff	Trockene Luft	Stickstoff	Trockene Luft
a ($cm^{-1} Gy^{-1}$)	$1.8 \cdot 10^{-5}$	-	-	$0.5 \cdot 10^{-5}$
T (Tage)	18	< 2	-	105
b ($cm^{-1} Gy^{-1}$)	$6 \cdot 10^{-7}$	$11 \cdot 10^{-7}$	$80 \cdot 10^{-7}$	$< 2 \cdot 10^{-7}$

Tabelle 2.1: Strahlenschäden in SCSN 38 und Y 7 bei einer Bestrahlung mit 25 MeV Protonen; Dosis: 10^4 Gray

Man sieht in Tabelle 2.1 die Nachteile einer Stickstoffatmosphäre sehr deutlich: Es gibt einen großen permanenten Schaden in Y7; außerdem ist der nicht-permanente Schaden in SCSN 38 groß und heilt nur langsam aus.

Bei trockener Luft ist der permanente Schaden in Y7 verschwindend klein, ein nicht-permanenter Schaden wird aber nur langsam ausheilen. Einen ähnlichen Trend gibt es beim SCSN 38: Zwar gibt es einen höheren permanenten Schaden wie in der Stickstoffatmosphäre, der nicht-permanente Schaden ist dort aber verschwindend klein und heilt auch schnell aus.

Es bleibt also festzuhalten, daß es bei der Lichtausbeute der Module durch verschiedene Einflüsse zu Veränderungen kommen kann, die allesamt die Kalibration beeinflussen.

Es gibt in gewissem Umfang die Möglichkeit, die Energieeichung des BEMC über Ereignisse mit bekannter Energie zu überwachen, z.B. mit minimal ionisierenden Teilchen und - im HERA-Experiment - mit quasielastischen gestreuten Elektronen. Diese Methoden werden in Kapitel 3.1 diskutiert.

Eine allgemein übliche Methode zur Überwachung von Kalorimetern läuft unter dem Namen "Monitorsystem", dessen grundlegende Gedanken im folgenden erläutert werden.

2.2 Funktionsweise von Monitorsystemen

Die Aufgabe von Monitorsystemen ist es, in der Zeit zwischen zwei Kalibrationen die Funktion und Eichung eines Detektors zu überwachen. Bei der Kalibration zur Zeit t_0 wurde für jedes Modul i ein Faktor CAL_i bestimmt, der die Pulshöhe $P_i(t_0)$ einer korrekten Energie E_i zuordnet. Für jedes geeichte Modul gilt somit:

$$E_i = P_i(t_0) \cdot CAL_i$$

Da die Pulshöhe eines Moduls von unterschiedlichsten Veränderungen beeinflusst werden kann, ist es bei einer Energiemessung wichtig, immer die aktuelle Pulshöhe $P_i(t)$ in die korrekte Energie umrechnen zu können. Dazu ist es notwendig, den Korrekturfaktor $CORR_i(t)$ zu kennen. Für die Bestimmung dieser Korrekturfaktoren zu einer beliebigen Zeit t werden Monitorsysteme eingesetzt. Mit Hilfe von Monitorsignalen MON_i , die in Form, Höhe und Länge einem typischen Physiksinal ähnlich sein sollen, muß der gesamte Signalweg aller Module überprüft werden. Über das Verhältnis zur ersten Messung zur Zeit t_0 mit den frisch geeichten Modulen erhält man den Korrekturfaktor:

$$P_i(t_0) = P_i(t) \cdot CORR_i(t)$$

$$\begin{aligned} \text{Somit ist dann: } E_i &= P_i(t) \cdot CAL_i(t_0) \cdot CORR_i(t) \\ &= P_i(t) \cdot CAL_i(t_0) \cdot \frac{MON_i(t_0)}{MON_i(t)} \end{aligned}$$

Da natürlich auch die Monitorsignale Schwankungen unterworfen sind, ist bei der Durchführung von Monitorläufen die Höhe der Monitorsignale zu überwachen. Dafür werden Referenzsysteme benötigt.

Für die Zeit eines kurzen Monitorlaufes, in der die Stabilität eines Referenzsystemes vorausgesetzt werden kann, reicht es, den Quotienten aus der Pulshöhe eines Moduls $P_{Mod i}$ zur Pulshöhe eines Referenzsystemes P_{Ref} zu bilden:

$$MON_i(t) = \frac{P_{Mod i}(t)}{P_{Ref}(t)}$$

Sind aber auch langfristige Schwankungen zu beachten, muß eine Kontrollmöglichkeit geschaffen werden. Dafür kann z.B. eine γ -Quelle dienen. Dann gilt für ein Monitorsignal:

$$MON_i(t) = \frac{P_{Mod i}(t)}{P_{Ref}(t)} \cdot \frac{\langle P_{Quelle}(t) \rangle}{\langle P_{Quelle}(t_0) \rangle}$$

wobei $\langle P_{Quelle} \rangle$ das Signal einer Quelle ist, bei dem aber eine ausreichend große Ereigniszahl zur Bestimmung der Lage eines Photopeaks abgewartet werden muß.

Zur Durchführung von Monitorläufen sollte ein auf das Detektormodul abgestimmter Algorithmus entwickelt werden. Als Randbedingungen sollte dabei beachtet werden, den normalen Meßbetrieb durch die Datennahme des Monitor-systemes nicht wesentlich einzuschränken. Auf der anderen Seite sollten Monitorläufe so oft es geht und in regelmäßigen Abständen durchgeführt werden, um eine gute Qualität der Meßdaten zu gewährleisten.

Wichtigstes Kriterium für ein gutes Monitorsystem ist, daß zeitliche Veränderungen des Monitorsystemes langsamer erfolgen sollten als die zu erwartenden Veränderungen des zu überwachenden Detektors. Dies ist mit der Ankopplung des Referenzsystemes an radioaktive Quellen im Prinzip gewährleistet, wenn die Detektion der Quellensignale zeitlich konstant ist.

Da aber doch mit schwankungsbehafteten Referenzsystemen zu rechnen ist (Zählrateneffekte, Alterung, Ausfall etc.), sind mehrere Referenzsysteme mit nach Möglichkeit unterschiedlichen Detektoren erforderlich. So ist dann eine gegenseitige Kontrolle der redundanten Referenzsysteme möglich.

Diese Überlegungen waren ausschlaggebend, zwei verschiedene Referenzsysteme für das Monitorsystem des BEMC zu konzipieren: Eines soll auf der Basis von Photomultipliern das andere mit Photodioden arbeiten. Der Aufbau dieser Systeme wird in Abschnitt 3.2.2 erläutert; die Untersuchungen dazu sind aber Thema einer anderen Diplomarbeit [Gri 90].

Kapitel 3

Das Konzept für die Überwachung des BEMC

Es stehen verschiedene Methoden für die Überwachung der Module des BEMC zur Verfügung. Im ersten Teil dieses Kapitels sollen diejenigen Möglichkeiten zur Überwachung der Eichung vorgestellt und diskutiert werden, die unabhängig von einem Monitorsystem arbeiten. Im zweiten Teil wird das Konzept für ein Monitorsystem vorgestellt, das auf die Eigenschaften des BEMC abgestimmt ist.

3.1 Methoden der Überwachung ohne Monitorsystem

Für eine von einem Monitorsystem unabhängige Kontrolle stehen im Fall des BEMC nur zwei unterschiedliche Methoden zur Verfügung: Die Kontrolle der Elektronik durch einen elektronischen Pulser und die Auswertung der gemessenen Elektronenspektren aus der e-p-Wechselwirkung. Ferner liefern Myonen, die mit dem Protonenstrahl in das BEMC eintreten, als minimal-ionisierende Teilchen ein Signal, das ca. 300 MeV Elektronenenergie entspricht und nur knapp über dem Rauschen liegt.

3.1.1 Elektronischer Pulser

Ein elektronischer Pulser, der im Rahmen der H1-Kollaboration zur Verfügung steht, wird zur Kontrolle der Elektronik eingesetzt. Das kann unabhängig vom Betrieb des HERA-Ringes, aber auch während des Meßbetriebes des H1-Detektors geschehen. Es gibt also keine prinzipiellen zeitlichen Restriktionen bei der Datennahme der Pulssignale.

Mit Hilfe des elektronischen Pulsers ist es möglich, den gesamten dynamischen Bereich der Elektronik auf Linearität hin zu überprüfen. Alle Veränderungen der Elektronik - in den Vorverstärkern an den Modulen, in den Hauptverstärkern oder den ADCs außerhalb des Detektors - können mit ihm diagnostiziert werden; und das macht den elektronischen Pulser zu einem wichtigen Kontrollinstrument.

Zwar lassen Messungen des Rauschens noch gewisse Aussagen über den Zustand der Photodioden zu, jedoch sind prinzipiell keine Aussagen über Veränderungen auf den Signalweg vor den Photodioden möglich; dieser Bereich ist der Kontrolle über die Elektronik vollends unzugänglich.

3.1.2 Elektronenspektren der e-p-Wechselwirkung

Während der Strahlzeiten bei HERA können im BEMC charakteristische Spektren der Elektron-Proton-Wechselwirkung gemessen werden.

Am hochenergetischen Ende dieser Spektren sind die sogenannten quasielastischen Ereignisse zu finden. Beim Auftreffen im BEMC gibt es eine winkelabhängige maximale Elektronenenergie E_{\max} :

$$E_{\max}(\vartheta) = \frac{E_{e1} \cdot E_{\text{prot}}}{E_{e1} \cdot \sin^2 \vartheta + E_{\text{prot}} \cdot \cos^2 \vartheta} \quad \begin{array}{l} E_{e1} = 30 \text{ GeV} \\ E_{\text{prot}} = 820 \text{ GeV} \end{array}$$

Bei kleinen Streuwinkeln ϑ erhält man am hochenergetischen Ende einen Peak in den Elektronenspektren, der allerdings zu größeren Streuwinkeln - also zum Außenrand des Kalorimeters hin - immer weniger ausgeprägt ist. Durch eine Analyse der Verschiebung dieser Spektren und insbesondere über die Veränderung der hochenergetischen Flanke des Peaks sollte sich die Eichinformation gewinnen lassen.

Um die winkelabhängige Zählrate der quasielastischen Ereignisse abschätzen zu können, sind Simulationsrechnungen durchgeführt worden [Bau 89a]. Dafür wurden folgende Annahmen gemacht:

- HERA läuft mit maximaler Luminosität von $\mathcal{L} = 2 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-2}$.
- Für die Strukturfunktion des Protons wurde die EMC-Parametrisierung angenommen [Fel 85].
- Es werden alle quasielastischen Ereignisse als solche erkannt und auch ausgelesen.

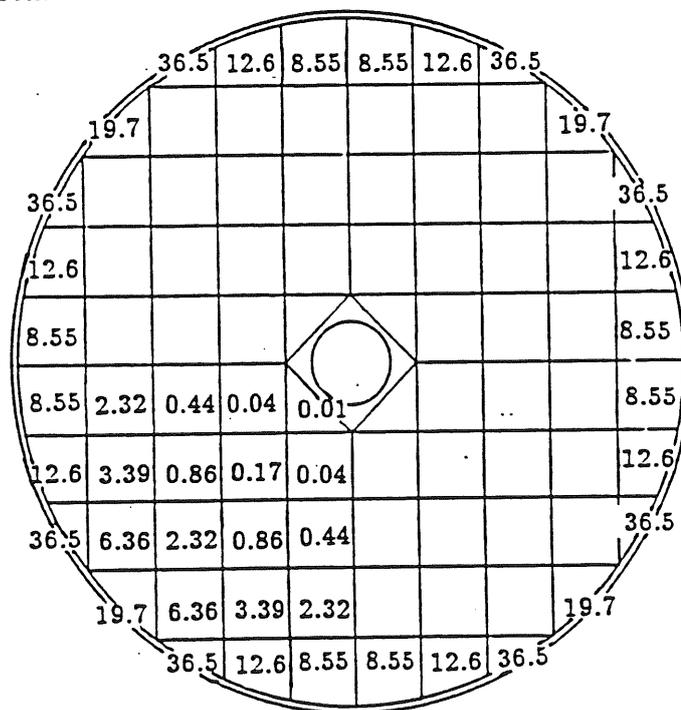


Abbildung 3.1.1: Zeit (in Tagen), bis jedes Modul von 100 quasielastischen Ereignissen mit $E > 0.99 E_{\max}$ getroffen wurde; aus [Sch 89]

In Abbildung 3.1.1 ist für jedes Modul die Anzahl an Tagen eingetragen, die es dauert, bis die Frontfläche eines Moduls von 100 quasielastisch gestreuten Elektronen getroffen wurde. Man erkennt im Zentrum des BEMC einen Bereich, in dem sicher täglich 100 solche Ereignisse zu erwarten sind. Im Randbereich des BEMC wird man aber mehr als einen Monat auf die 100 Ereignisse warten müssen.

Allerdings wird die Anzahl von 100 Ereignissen nicht ausreichen, eine Bestimmung der Eichkonstanten mit 1 % Genauigkeit vorzunehmen; die in Abbildung 3.1.1 angegebenen Zeiten müssen entsprechend der dafür nötigen Anzahl an Ereignissen multipliziert werden. Eine beliebige Vergrößerung der Zeitintervalle zwischen den Nacheichungen sollte aber vermieden werden, denn dadurch würden nur Fehler und Ungenauigkeiten durch Mittlung über zu große Zeitintervalle auftreten.

Allgemein erschwerend bei der Auswertung der e-p-Spektren ist die Verteilung eines elektronischen Schauers auf mehrere Module. Gerade mit wachsendem Azimutwinkel ϑ nimmt dieser Effekt zu, so daß es nahezu aussichtslos erscheint, eine auf 1% genaue Kalibration der Module des Randbereiches vorzunehmen, auch wenn man versucht, die Kalibration systematisch von innen nach außen fortzusetzen.

Diese Fortsetzung der Kalibration von kleineren zu größeren Streuwinkeln beruht im wesentlichen auf folgendem Verfahren: Mit Hilfe der Ortsinformation aus der dem BEMC vorgelagerten Vieldraht-Proportionalkammer lassen sich für die Module bei kleinen Streuwinkeln die Bereiche vollständigen *Containments*, d.h. vollständiger Deposition von Energie in ein einziges Modul, festlegen. In diesen Bereichen müßten dann unter Zugrundelegung der Ortsempfindlichkeit der Diodensignale die vier Diodensignale der langen Wellenlängenschieber innerhalb eines Moduls abgeglichen werden. Anschließend sind die Randbereiche der Module zu untersuchen, für die die Signale aus den Nachbarmodulen hinzuaddiert werden müssen. Unter Kenntnis der Ortsempfindlichkeit der Lichtausbeute und der Korrekturfunktion für die Leckrate aus den Kalorimetermodulen können nun auch die Dioden der Nachbarmodule abgeglichen werden.

Für diese Kalibration sollten die Physik-Ereignisse aus der Wechselwirkungszone verwendet werden, für die die Spektren - und insbesondere $E_{\max}(\vartheta)$ - berechnet werden können. Dies wird aber für kleinere Streuwinkel und damit geringere Impulsüberträge ein Problem, da die vom Proton ausgehenden *Jets* (*current-jet* und *spectator-jet*) ohne Wechselwirkung mit dem Detektor durch das Strahlrohr entweichen können. In diesen Fällen wird man keine Rückmeldung von dem Liquid-Argon-Kalorimeter, wahrscheinlich auch keine Rückmeldung von den Spurenkammern erhalten, ob das im BEMC beobachtete Ereignis aus der Wechselwirkungszone stammt. Es ergeben sich daher ernsthafte Triggerprobleme, die durch TOF-Szintillator-Vetowände etc. wohl auch nicht voll beseitigt werden können.

Es stellt sich daher die Frage, in wie weit man auch mit Spektren von Untergrundereignissen eine Kalibration, wie sie sich aus den Teststrahlungsmessungen ergibt, erhalten kann.

3.1.3 Minimal-ionisierende Teilchen

Myonen, die das BEMC durchqueren, verhalten sich wie minimal ionisierende Teilchen, d.h. sie erleiden als geladenes Teilchen einen charakteristischen, pro Wegstrecke konstanten Energieverlust durch Ionisation:

- a) Durchqueren die Myonen ein Modul des BEMC auf einem zur Strahlachse parallelen Weg, deponieren sie in den Szintillatorplatten eine sichtbare Energie von $E_{vis} \approx 40 \text{ MeV}$. (Zum Vergleich: Ein Elektron muß eine Energie von $40 \text{ MeV}/0.13 = 308 \text{ MeV}$ haben, um in einem elektromagnetischen Schauer die gleiche sichtbare Energie von 40 MeV in den Sampling-Kalorimeter-Modulen zu deponieren. Der Faktor 0.13 ist eine geometrie- und materialabhängige Konstante.) Die vom Myon deponierte Energie E_{vis} von ca. 40 MeV liegt deutlich oberhalb des Rauschens (13 MeV) und ist somit ein wichtiger Eichpunkt am unteren Ende des Energiespektrums des BEMC, solange sich die Rauscheigenschaft der Elektronik durch eventuelle Modifikationen zur Verminderung von *pile-up* nicht sehr verschlechtert.

- b) Handelt es sich um kosmische Strahlung, durchqueren Myonen das BEMC auf einem Weg, der eher orthogonal zur Strahlachse verläuft. Die Triggerung dieser Myonen könnte durch H1-Detektorkomponenten oberhalb des BEMC erfolgen (z.B. unter Zuhilfenahme des Liquid-Argon-Kalorimeters oder der Myonendetektoren). Die im BEMC deponierte Energie hängt wegen der *Sandwich*-Struktur empfindlich vom Einfallswinkel ab.

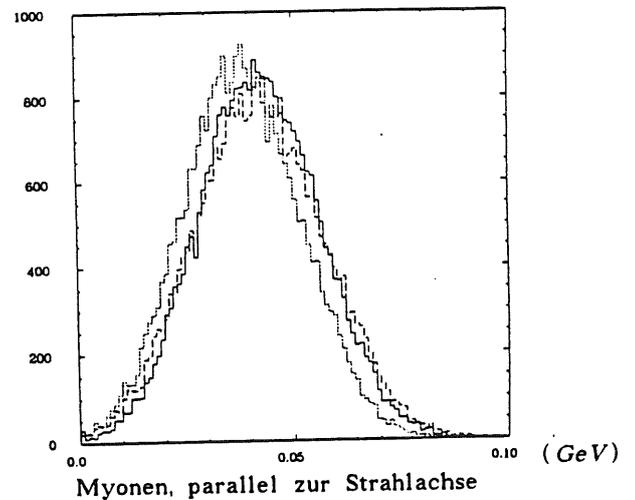
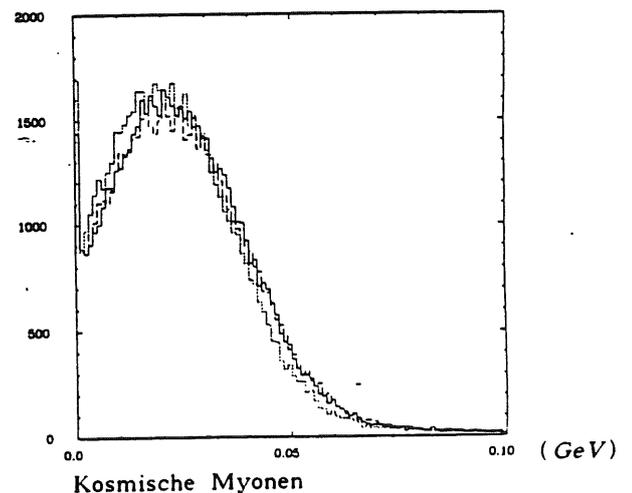


Abbildung 3.1.2: Myonenspektren einer Simulationsrechnung auf der Basis von 50000 Ereignissen [Bau 89 b]

— Referenzspektrum
 Spektrum bei 1% Veränderung der Kalibration
 - - - - - Rekalibriertes Spektrum



Die Untersuchungen zu dieser Kalibrationsmethode sind noch nicht abgeschlossen; deshalb können die zu erwartenden Zählraten noch nicht angegeben werden. Dabei sind insbesondere bei den strahl-parallelen Myonen noch Fragen offen (Zählrate, Winkelverteilung etc.), die wohl erst nach Inbetriebnahme endgültig geklärt werden können.

In beiden Fällen muß wegen der kleinen Signale (siehe Abbildung 3.1.2) und der Nähe zum Rauschen eine große Anzahl von Myonen abgewartet werden, um eine genaue Eichinformation zu erhalten.

3.2 Das Konzept des Lasermonitorsystemes

Ausgehend von den Anforderungen an ein Monitorsystem für das BEMC soll das Konzept für ein Lasermonitorsystem vorgestellt werden. Als Randbedingungen ging im wesentlichen die Raumproblematik ein: Die zentrale Lichtquelle muß außerhalb des H1-Detektors aufgebaut werden, ein Verteiler kann nur im schmalen Randbereich des BEMC plaziert werden und die Einspeisung der Monitorsignale kann nur in die vom WWP aus gesehene letzte Szintillatorplatte¹ vorgenommen werden. Diese drei Randbedingungen prägten das Konzept des Monitorsystemes.

3.2.1 Anforderungen an das Monitorsystem

Die im Abschnitt 3.1 aufgeführten Überwachungsmethoden zur Erhaltung der Energiekalibration haben alle ihre individuellen Schwachstellen. Mit Hilfe des Monitorsystemes gilt es, diese Schwachpunkte so zu überbrücken, daß man im Zusammenspiel aller Meßgrößen eine effiziente Kalibration erhält.

Der elektronische Pulser kontrolliert über den gesamten dynamischen Bereich die Elektronik und die Photodioden, aber alles was vor den Photodioden, also im Bereich der Szintillatoren und Wellenlängenschieber geschieht, und die Kalibration beeinflusst, ist dieser Kontrolle nicht zugänglich. Deshalb wird ein Monitorsystem benötigt, das einen Diodenabgleich (Intrakalibration) innerhalb eines Modules sowie zwischen den Modulen (Interkalibration) vornehmen kann; das den gesamten Signalweg einschließlich der Szintillation überprüft und auch den gesamten dynamischen Bereich des zu kalibrierenden Detektors überwachen kann. Durch einen Vergleich mit den Pulsermessungen ist somit eine redundante Kontrolle der Linearität der Module möglich.

Die Überwachung der Kalibration durch Physikereignisse ist insofern beschränkt, da sie nur während der Strahlzeiten möglich sind und bei ihnen immer auch der Zeitfaktor eine Rolle spielt. Da es einen Zählratengradienten gibt und man deshalb für den Außenbereich des BEMC Daten über eine lange Zeit sammeln muß (ehe man eine dann gemittelte Eichinformation bekommt), ist es sehr wünschenswert, mit dem Monitorsystem eine Interkalibration des BEMC vorzunehmen.

Ausgehend von Daten aus Physikereignissen des zentralen Bereiches läßt sich die Eichung unter Zuhilfenahme des Monitorsystemes nach außen zum Randbereich sicher wesentlich einfacher hochrechnen; insbesondere können so die langen Zeiträume zwischen den Nacheichungen im Randbereich mit Hilfe des Monitorsystemes überbrückt werden. Für diese Interkalibration ist es dann nötig, daß die Monitorsignale, die den verschiedenen Modulen zugeführt werden, zueinander ein konstantes Verhältnis aufweisen.

¹ Die technisch durchführbare, aber aufwendigere Einspeisung der Monitorsignale in mehrere Szintillatorplatten pro Modul wurde nicht vorgesehen, da die Entwicklung des Monitorsystemes erst nach der Entwicklung der Module angegangen wurde, aufgrund mangelnder Erfahrungen ein einfach gehaltenen Aufbau bevorzugt wurde und zudem eher pessimistische Prognosen über die Realisierung der Stabilitätsanforderungen gestellt wurden.

Das Monitorsystem des BEMC soll also:

- einen Diodenabgleich vornehmen können (Intra- und Interkalibration),
- den gesamten Signalweg überprüfen,
- im gesamten Energiebereich arbeiten können,

um so eine optimale Ergänzung der anderen Überwachungsmethoden zu erreichen.

Beim Entwurf des Systemes spielt aber auch die Forderung eine Rolle, daß man alle Signalwege zum BEMC und auch alle Verbindungen zu den einzelnen Modulen reproduzierbar ab- und wiederankoppeln können muß. Diese Forderung nach reproduzierbaren Kopplungen stellt einen Schwerpunkt der durchgeführten Untersuchungen dar und erfordert große Sorgfalt bei allen Arbeiten am und mit dem Monitorsystem.

Bei allen hier erwähnten Zielsetzungen muß insbesondere die Genauigkeitsanforderung von 1 % beachtet werden. Beim Betrieb des Monitorsystemes muß diese Genauigkeit also noch deutlich unterschritten werden, um eine vernünftige Eichung zu ermöglichen.

3.2.2 Überblick über Aufbau und Installation des Monitorsystemes

Die oben angesprochene Überwachung des gesamten Signalweges erfordert ein Monitorsignal, das in der Lage ist, Szintillation anzuregen. Diese Forderung ist mit UV-Licht erfüllbar. Als Signalquelle scheiden damit dezentral angebrachte Leuchtdioden aus, da es z.Zt. noch keine LEDs im UV-Bereich gibt. Zudem wäre eine Interkalibration bei einer Vielzahl von einzelnen Signalquellen nur schwer möglich. (Bei ihrer Ansteuerung könnte es außerdem durch Störpulse zu Problemen in der Vorverstärkerelektronik kommen.)

Eine Xenon-Lampe als zentrale Signalquelle, die in den Voruntersuchungen benutzt wurde, ist zwar relativ stabil, aber zum einen war die Intensität zu gering und zum anderen erzeugte die Xenonlampe 1 μ s lange Lichtpulse, die somit deutlich länger als die typische Abklingzeit im Szintillator SCSN 38 ($\tau = 2.5$ ns) sind.

Deshalb wird als zentrale Signalquelle ein gepulster Stickstofflaser eingesetzt. Er kann wegen der Superradianz des angeregten Stickstoffs sehr kurze Pulse (300 ps, ca. 10^{14} Photonen pro Puls) mit einer Wellenlänge von 337.1 nm emittieren. Diese Lichtpulse sind also deutlich kürzer als die Abklingzeit des Szintillators.

Um große Intensitätsverluste beim Transport der Laserpulse zu den Modulen zu vermeiden, sollten alle optischen Komponenten die Transmission von UV-Licht zulassen. Deshalb sind in diesem Monitorsystem alle Linsen, Fasern und sonstigen Optiken aus Quarzglas gefertigt, da Quarzglas auch noch im UV-Bereich gute Transmissions-eigenschaften hat.

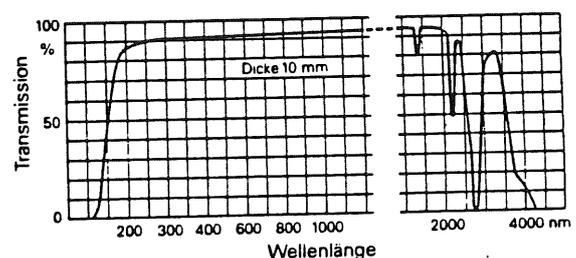


Abbildung 3.2.1: Transmission von Quarzglas; aus [Spi 89]

Aus Platzgründen kann der Laser nicht direkt am BEMC aufgebaut werden. Sein Standort ist außerhalb des Detektors in ca. 17 m Entfernung zum BEMC vorgesehen (siehe Anhang C).

Bevor nun das Laserlicht über Quarzglasfasern² ("Primärfasern") zum BEMC transportiert wird, ist laserseitig (siehe Abbildung 3.2.2) entsprechend den oben formulierten Anforderungen eine Quarzglas-Aufweitungsoptik aufgebaut, um Filter für einen Linearitätstest einsetzen zu können. Diese Aufweitung geschieht nach dem (umgekehrten) Prinzip des Gallileischen Fernrohrs. Zu der Bikonkavlinse mit einer Brennweite $f_1 = -20 \text{ mm}$ wurde eine Bikonvexlinse mit $f_2 = 100 \text{ mm}$ eingesetzt, um die Querschnittsfläche des Laserstrahles auf das 25-fache zu vergrößern, so daß problemlos beschichtete Optik eingesetzt werden kann.

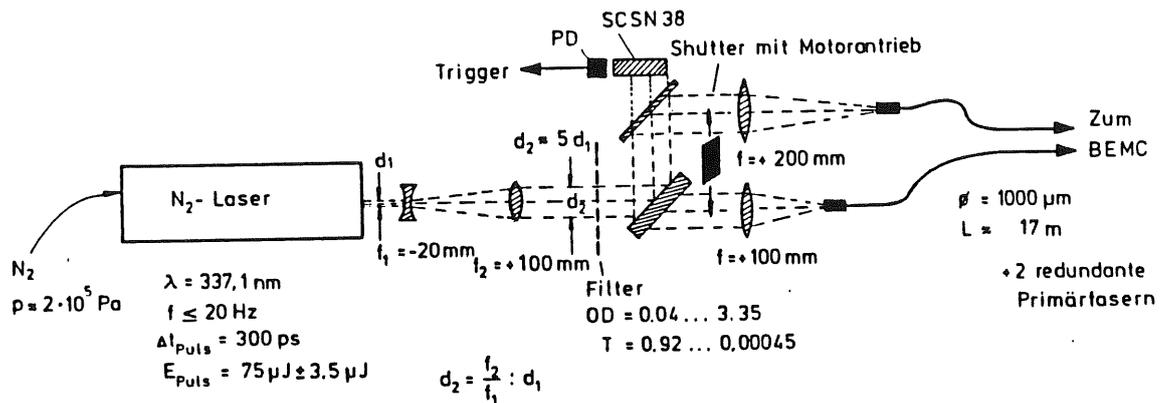


Abbildung 3.2.2: Der laserseitige Aufbau

Nach [Sch 89] soll das Monitorsystem möglichst redundant ausgelegt sein. Deshalb werden jedem Modul zwei Signale auf zwei voneinander unabhängigen Transportwegen zugeführt. Die dafür erforderliche Strahlteilung ist aus Platzgründen und wegen der Unzugänglichkeit nicht direkt am BEMC vorzunehmen, sondern wird laserseitig aufgebaut. Dafür wird ein 50/50 Strahlteiler eingesetzt. Ein Spiegel (mit 99% Reflexion) sorgt für eine parallele Einspeisung in die Primärfasern.

Die Signalerfassung während eines Monitorlaufes ist nur dann möglich, wenn ein Triggerpuls die Datennahme einleitet. Da eine solche Triggerung durch die Elektronik des Lasers wegen eines großen Zeit-Jitters von ca. $1 \mu\text{s}$ (siehe Anhang A) nicht möglich ist, wird man den Triggerpuls aus dem Laserlichtpuls generieren. Man kann dazu hinter dem in Abbildung 3.2.2 skizzierten Spiegel (Transmission von ca. 1%) eine Photodiode aufbauen. Diese Photodiode liefert aufgrund des kurzen Lichtweges ca. 100 ns vor den Modulen ein Signal und kann so die Datenacquisition der Monitorsignale rechtzeitig "einschalten".

Hinter dem Strahlteiler muß ein *Shutter* aufgebaut werden, um so sicherzustellen, daß jeweils nur ein Signalweg mit Licht versorgt wird. Hinter dem *Shutter* sorgen Bikonvexlinsen für eine Fokussierung zur Einspeisung in die Fasern.

Für den Transport des Laserlichtes zum BEMC werden zwei "Primärfasern" eingesetzt. Um große Intensitäten zu transportieren und dabei die Abschwächung des UV-Lichtes möglichst gering zu halten, werden Quarzglasfasern mit einem Durchmesser von $1000 \mu\text{m}$ (siehe Abschnitt 4.3) verwendet. Sie werden neben zwei redundanten Primärfasern in einen Wellenschlauch eingezogen, der dann zum BEMC verlegt wird.

²Im folgenden meist kurz als "Fasern" bezeichnet, zusätzlich zuweilen nach dem Einsatzgebiet benannt.

Das Verteilungssystem wird an der Außenseite des Trägerringes des BEMC aufgebaut; dafür steht eine längliche Fläche im Bereich der Füße des Kalorimeters zur Verfügung (siehe Anhang C). Das UV-Licht aus einer Primärfaser wird dort mittels Quarzglasoptik aufgeweitet und trifft dann auf eine Oberflächenstreuung. Das gestreute Licht trifft im Anschluß daran auf einen Quarzglasstab, hinter dem ein Faserbündel (siehe Abschnitt 4.5) montiert wird.

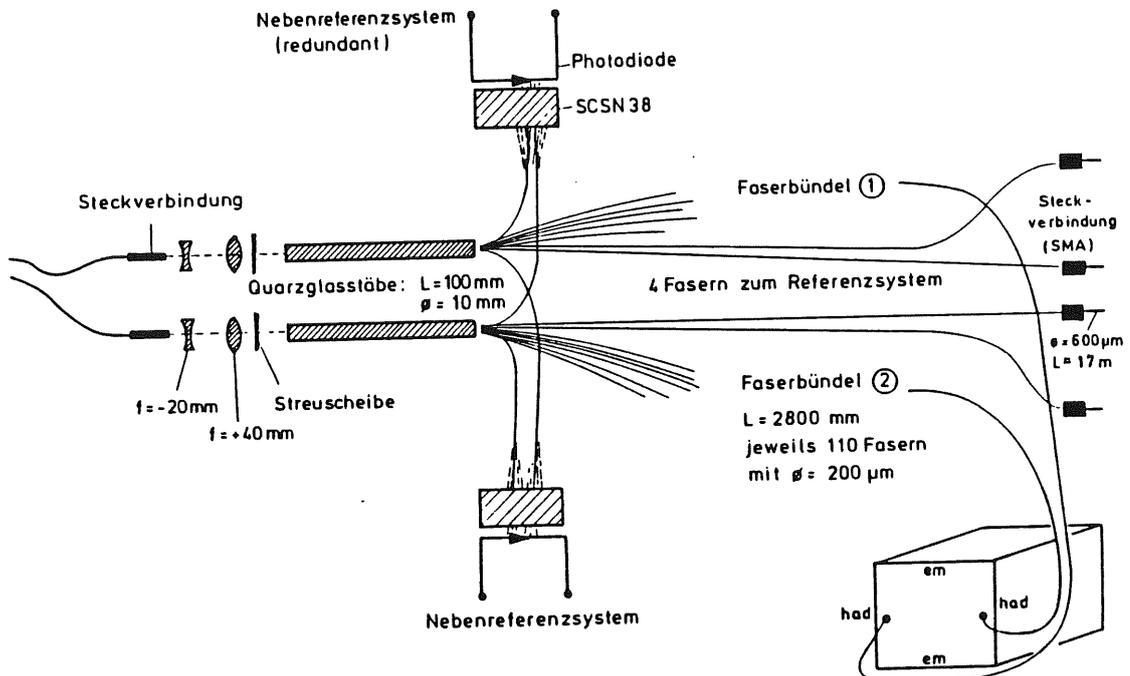


Abbildung 3.2.3: Der Aufbau des Verteilungssystemes

Die Faserbündel bestehen aus 115 Quarzglasfasern ("Sekundärfasern") mit einem Durchmesser von $200 \mu\text{m}$. 80 Modulen wird von jedem Faserbündel eine Faser zugeführt; bei 8 Modulen mit kleinem dreieckigen Querschnitt kann aus Platzgründen nur eine Faser angekoppelt werden. Die Ankopplung wird wegen der geforderten Demontierbarkeit an der Rückseite der Module vorgenommen. An den Ankopplungs-orten, die sich an einer freien Stelle innerhalb des Elektronikgehäuses (siehe Abbildung 1.3 b) befinden, ist ein Aluminiumröhrchen in die Abschlußplatte eingebracht worden, in das die einzelnen mit einem Stecker versehenen Sekundärfasern eingeführt und mit einem Federmechanismus (siehe Abbildung C 5) befestigt werden. So trifft das UV-Licht auf die - vom WWP aus gesehen - letzte Szintillatorplatte (siehe Abbildung 3.2.4). Das Monitorsignal wird dort von allen Wellenlängenschiebern ausgelesen, und somit können alle acht Photodioden überprüft und abgeglichen werden.

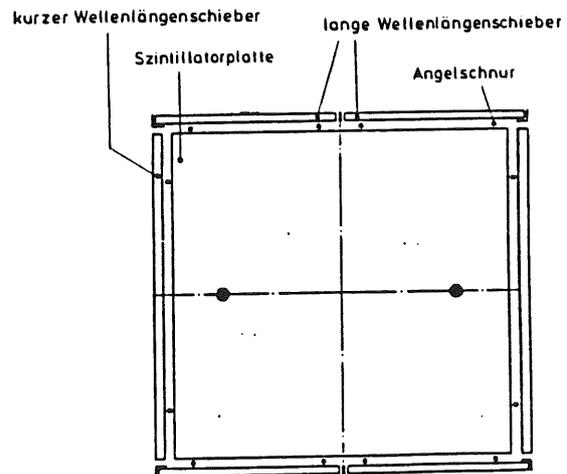


Abbildung 3.2.4: Einkopplungsorte bei der letzten Szintillatorplatte

Jeweils zwei Fasern eines Faserbündels werden mit Steckern versehen, die eine reproduzierbare Faser-Faser-Kopplung ermöglichen. Dafür eignen sich SMA-Stecker vom Typ 905 (Näheres siehe Abschnitt 4.6.1). Eine solche Kopplung wird an Quarzglasfasern mit einem Durchmesser von $600 \mu\text{m}$ ("Referenzfasern") vorgenommen, die ein Monitor-signal wieder aus dem Detektor transportieren und einem Referenzsystem zuführen.

Es sind zwei verschiedene Aufbauten für das Referenzsystem vorgesehen (siehe Abb. 3.2.5): Einmal wird eine Referenzfaser (1a und 2a) über einen Filter (zur Abschwächung) an einen CsJ-Kristall gekoppelt. Das Signal wird dann mit einem stabilisierten Photomultiplier ausgelesen. Eine γ -Quelle (Th C') sorgt für einen absoluten Eichpunkt. Die Referenzfasern 1b und 2b werden zu einem Szintillatorplättchen geführt. Das durch UV-Licht angeregte Szintillationslicht wird von Photodioden ausgelesen, die auch mit Hilfe einer Quelle (geplant ist der Einsatz von ^{109}Cd oder ^{241}Am) überwacht werden müssen.

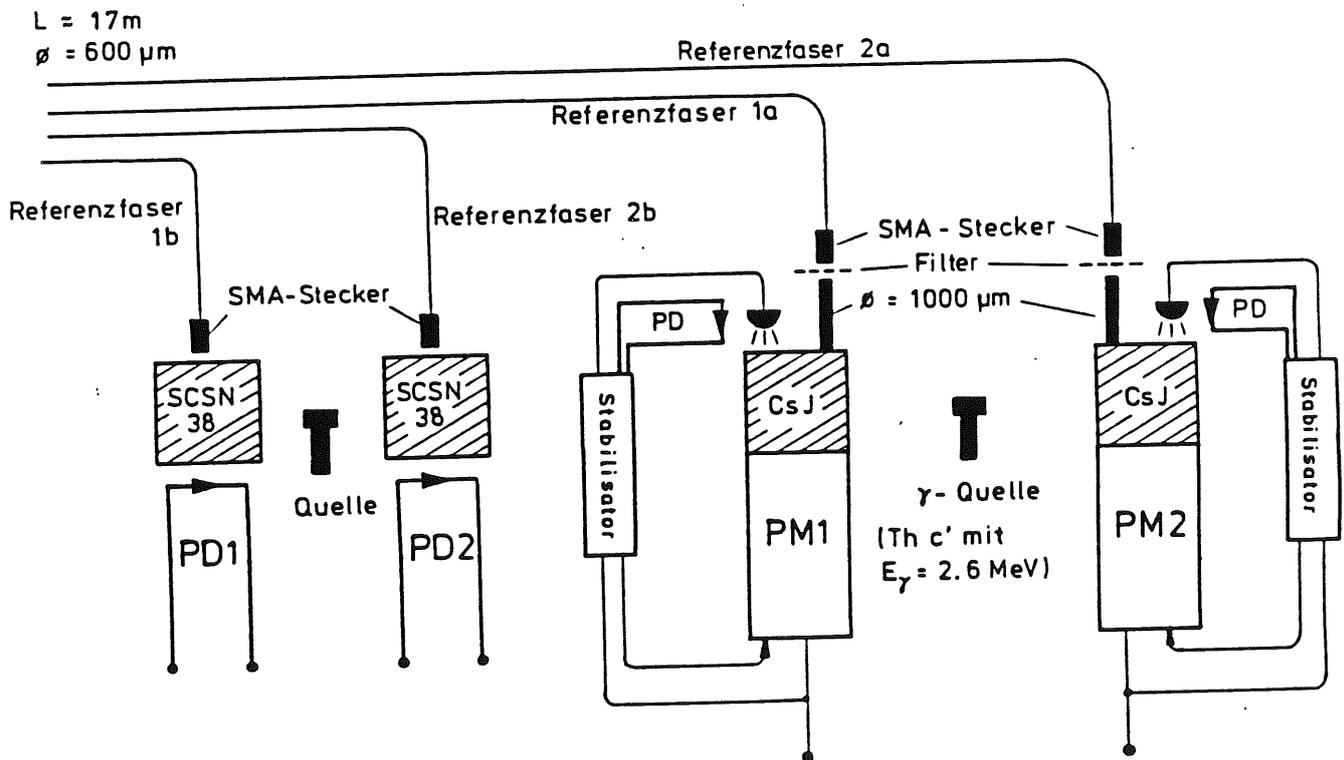


Abbildung 3.2.5: Aufbau der Referenzsysteme

Da alle Verbindungen des Monitorsystemes nach außen entsprechend den Anforderungen abkoppelbar sein müssen und damit der Verlust der Eichinformation droht, sind direkt am BEMC Nebenreferenzsysteme vorgesehen, bei denen die zugeführten Fasern, fest verlegt, immer angekoppelt bleiben sollen. Über solch ein Nebenreferenzsystem ist eine Renormierung der Hauptreferenzsysteme nach Wiederankopplung möglich.

3.2.3 Aufgaben des Lasermonitorsystemes

Mit dem oben vorgestellten Aufbau des Lasermonitorsystemes sind folgende Aufgaben möglich:

a) Ausfallkontrolle:

Sie ist in dem Moment möglich, wenn ein Monitorsignal in ausreichender Größe, d.h. oberhalb der Schwelle, in die einzelnen Module gelangt.

b) Überwachung der Zeitauflösung:

Da sich zum einen Monitorsignale von den Physikereignissen nicht sehr unterscheiden (Anregung der Szintillation durch kurze UV-Lichtpulse) und zum anderen die Pulse der zentralen Lichtquelle über gleichlange Lichtwege transportiert werden (also zeitgleich in allen Modulen eintreffen), ist es möglich, das Zeitverhalten der einzelnen Module zu überprüfen.

c) Diodenabgleich innerhalb eines Modules (Intrakalibration):

Das im Modul erzeugte Signal wird von allen 8 Photodioden gesehen. Durch Quotientenbildung der resultierenden 6 Signale - die zwei Dioden eines kurzen Wellenlängenschiebers werden jeweils von einem Vorverstärker ausgelesen - läßt sich innerhalb eines Modules ein Abgleich der 6 Signalwege vornehmen.

d) Linearitätstest:

Mit den Neutralfiltern lassen sich reproduzierbar mehrere verschiedene Intensitäten einstellen. Wenn zuvor eine Grundeinstellung vorgenommen worden ist, um eine Intensitätsschwankung des Lasers auszugleichen, kann so der gesamte dynamische Signalbereich des BEMC erfaßt und vermessen werden.

e) Überwachung des gesamten Signalweges:

Das vorgestellte Lasermonitorsystem ist in der Lage, Szintillation in den Modulen anzuregen, und kann so das Kalorimeter im eigentlichen Meßmodus testen. Da aber das Signal nur in eine Szintillatorplatte eingespeist wird, sind im Falle einer Korrektur von Eichkonstanten nicht nachprüfbar Annahmen über die räumliche Verteilung von Schäden im gesamten Modul zu machen. Wenn man aber Daten aus Physikereignissen (Spektren der e-p-Wechselwirkung oder von minimal-ionisierende Teilchen) in eine Korrektur mit einfließen läßt, kann man hoffen, zu einer vernünftigen Übereinstimmung von Laserkalibration und Kalibration auf der Grundlage der Spektren zu gelangen.

f) Interkalibration:

Da die Zählrate der in Kapitel 3.1 angesprochenen Physikereignisse im Außenbereich des BEMC wesentlich geringer als im Innenbereich ist und so der Zeitraum bis zur Nacheichung unvermeidbar lang zu werden droht, ist es anzustreben, über Monitorsignale eine Interkalibration der Module zu bewerkstelligen. Grundlegende Voraussetzung für eine solche Interkalibration ist, daß ein Monitorsignal für ein beliebiges Modul zu jedem beliebigen anderen Monitorsignal in einem konstanten Verhältnis stehen muß. Das heißt also, daß der Quotient aus zwei beliebigen Monitorsignalen über große Zeiträume konstant sein muß. Die absolute Größe eines Monitorsignales spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Deshalb könnte eine Interkalibration auch ohne ein stabiles Referenzsystem vorgenommen werden.

Vortests haben gezeigt, daß die Signale aus zwei Sekundärfasern in einem konstanten Verhältnis zueinander stehen (siehe Abbildung 3.2.6). Das gemessene Quotientenspektrum hat eine Halbwertsbreite ("*Full-Width-at-Half-Maximum*") unter 1 %, die im wesentlichen auf Ungenauigkeiten bei der Digitalisierung der Signale, die der Division vorangestellt ist, zurückzuführen ist. Die volle Breite vom unteren zum oberen Fußpunkt des Quotientenspektrums beträgt 2 %.

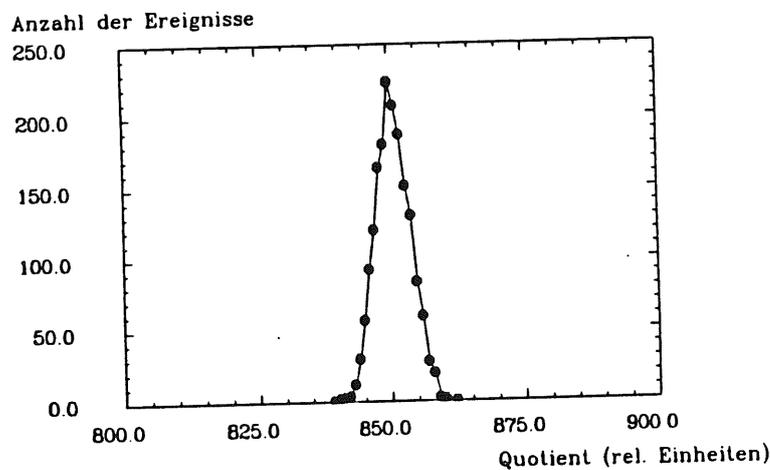


Abbildung 3.2.6: Quotientenspektrum

f) Absoluteichung:

Ist neben dem konstanten Quotienten auch ein stabiles Referenzsystem vorhanden, kann man den Eichpunkt durch eine Quelle in Einheiten von GeV-Elektronenenergie umrechnen und so in Verbindung mit den Daten aus Physikereignissen eine regelmäßige Absoluteichung vornehmen, auch in Zeiten, in denen die Zählraten wegen schlechter Luminosität gering sind.

Da bei Interkalibration und Absoluteichung durch das Lasermonitorsystem die Konstanz des Quotienten von herausragender Bedeutung ist, werden die Untersuchungen in Kapitel 4 und 5 im besonderen Hinblick auf die Stabilität des Quotienten durchgeführt. Dabei wird bei den Messungen immer von der sogenannten "Quotientenmethode" Gebrauch gemacht, d.h. es wird bei sofortiger Division der koinzidenten Signale der Wert des Quotienten gespeichert.

Kapitel 4

Die Komponenten des Lasermonitorsystemes

In diesem Kapitel werden die Komponenten des Lasermonitorsystemes im Hinblick auf den geplanten Einsatz im BEMC untersucht. Im Mittelpunkt steht dabei insbesondere die Frage, inwiefern sich die Eigenschaften der Komponenten auf die Interkalibration auswirken. Deshalb basieren etliche Messungen auf der im Abschnitt 3.2.3 vorgestellten Quotientenmethode. Die Darstellung der Eigenschaften und Funktionen der Komponenten orientiert sich an dem im Abschnitt 3.2.2 dargestellten Signalweg.

Alle Messungen wurden mit folgendem Aufbau durchgeführt:

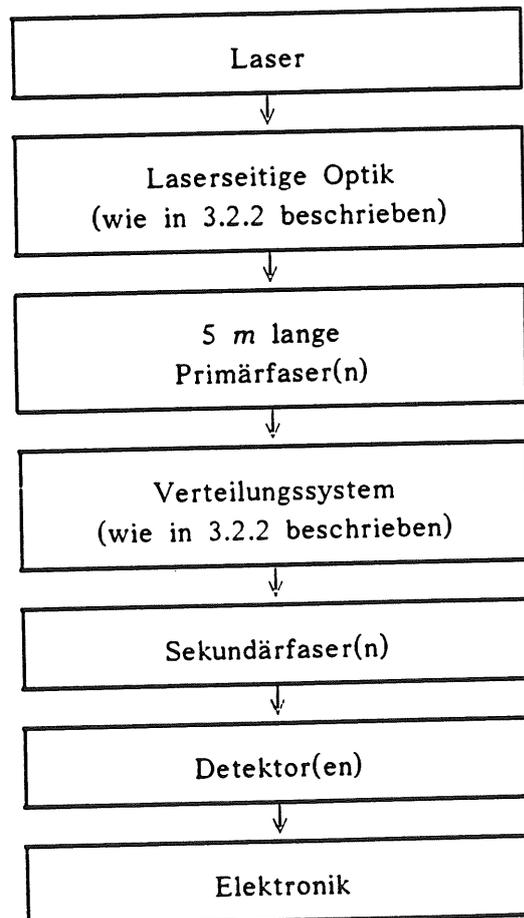


Abbildung 4.0.1: Meßaufbau

Die Detektoren waren nach einem, dem Aufbau am BEMC ähnlichen Prinzip aufgebaut: Das Licht einer angekoppelten Faser trifft senkrecht auf ein kleines Szintillatorplättchen (SCSN 38). An einer Seite dieses Szintillatorplättchens ist ein Wellenlängenschieberplättchen (Y7) angebracht. Ein 0.3 mm dicker Nylon-Faden (Angelschnur) sorgt für einen definierten Abstand sowohl zum Szintillatorplättchen als auch zu der an der Faser abgewandten Stirnseite angebrachten Photodiode. Da kein direkter optischer Kontakt besteht, ist Schwankungen durch sich eventuell verändernde Klebungen vorgebeugt; Einkopplungen über einen Luftspalt sind unkritisch. Die in diesem Aufbau verwendeten Photodioden¹ (Hamamatsu S2575) werden auch am BEMC eingesetzt. Um das Signal/Rauschverhältnis zu verbessern, ist eine Vorspannung (Bias) von -24 V angelegt. Außerdem wird mit dem Ziel einer niedrigen Gesamtkapazität zwischen Photodiode und Vorverstärker ein möglichst kurzes Koaxialkabel verwendet.

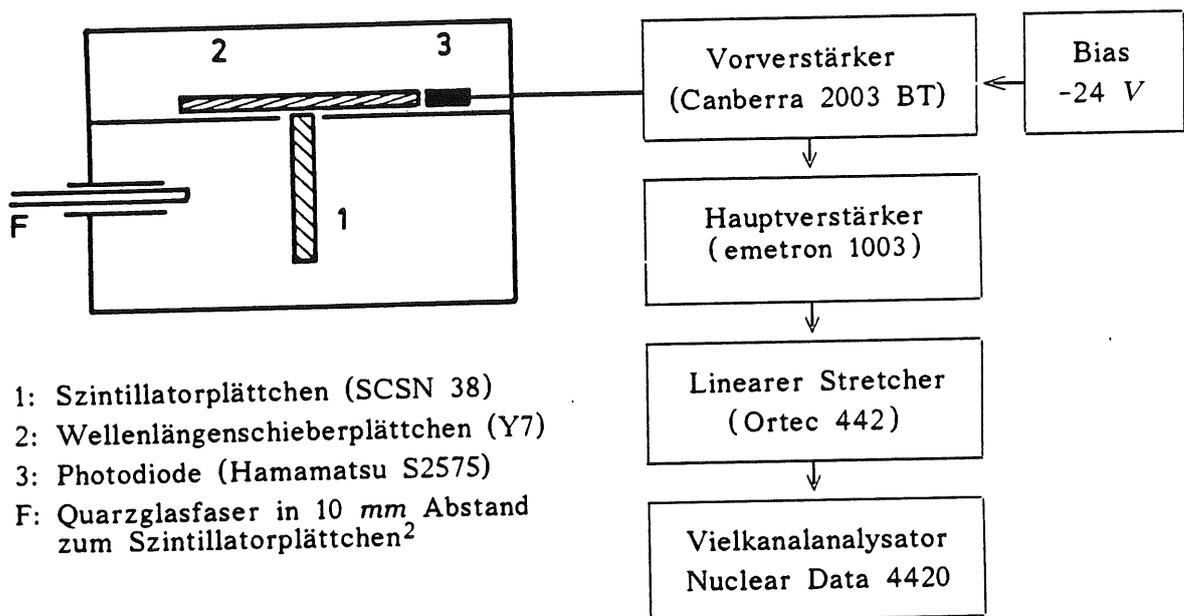


Abbildung 4.0.2: Der Detektor und die verwendete Elektronik

Das Signal der Photodioden wird durch einen ladungsempfindlichen Vorverstärker (Canberra 2003 BT) verstärkt und einem Hauptverstärker (Emetron 1003) zugeführt. Um das Signal kompatibel zum Vielkanal zu machen, befindet sich hinter dem Hauptverstärker ein linearer Stretcher (Ortec 442). Dort wird das Signal des Hauptverstärkers in einen 5 μ s langen Rechteckpuls umgewandelt, dessen Höhe gleich dem Maximum des Hauptverstärkersignales ist. In den ADCs des Vielkanalanalysators (ND 4420) werden die Signale aus den Stretchern digitalisiert. Koinzident eintreffende Signale können in einem Kalkulationsprogramm verarbeitet werden. Davon wird insbesondere bei Messungen nach der in Abschnitt 3.2.3 angesprochenen Quotientenmethode Gebrauch gemacht. Im Display sind dann sowohl die Signalhöhenspektren als auch das Quotientenspektrum ablesbar.

¹ Eine ausführliche Beschreibung der Diodeneigenschaften ist bei [Wun 88] zu finden.

² Es empfiehlt sich, um Winkelabhängigkeiten vorzubeugen, die Faser möglichst nah an die Szintillatorplatte heranzuführen. Bei der Steckverbindung der Fasern an die Module des BEMC wird dieser Abstand nur 1 mm sein (siehe Abbildung C5).

4.1 Der Laser

Hier werden im folgenden die Eigenschaften des N_2 -Lasers dargestellt, die relevant für Betrieb des Monitorsystemes sind. Die Physik des N_2 -Lasers ist im Anhang A zu finden, Hinweise zur Bedienung befinden sich im Anhang B.

4.1.1 Betriebsdaten des Stickstofflasers

In Tabelle 4.1 sind die Daten des verwendeten Stickstofflasers zusammengestellt, die für Aufbau und Betrieb des Lasermonitorsystemes relevant sind.

Energie pro Puls:	75 μJ +/- 5%
Wellenlänge:	337.1 nm
Energie der Photonen:	3.678 eV
Anzahl der Photonen pro Puls:	$1.27 \cdot 10^{14}$
Pulsdauer:	300 ps
Leistung pro Puls:	250 kW
Querschnittsfläche des Laserstrahls (laut Hersteller):	6 mm ²
Leistungsdichte:	4.2 MW/cm ²
Gemessene Querschnittsfläche Lange Halbachse (horizontal):	2.5 mm
Kurz Halbachse (vertikal):	2.0 mm
Querschnittsfläche:	15.71 mm ²
Leistungsdichte:	1.6 MW/cm ²
Divergenz horizontal:	3 mrad
vertikal:	7 mrad

Tabelle 4.1: Daten des verwendeten Stickstofflasers³

Laut Auskunft der Hersteller beschichteter Optiken sind Leistungen im MW/cm² Bereich schon als kritisch anzusehen. Deshalb wird der Laserstrahl um den Faktor 25 aufgeweitet, so daß sich die Querschnittsfläche auf ca. 400 mm² vergrößert. So können Filter, Strahlteiler und Spiegel dann unbesorgt eingesetzt werden.

³ LN 120 C; Hersteller: PRA Laser Inc., Kanada

4.1.2 Der Betrieb des Lasers

Das am Verteiler gemessene Signalhöhenspektrum hat - wenn der Laser gereinigt und optimal eingestellt ist - eine volle Breite bei halber Höhe (im folgenden kurz: FWHM für: *Full Width at Half Maximum*) von unter 3%. Damit sind die Puls-zu-Puls-Schwankungen deutlich kleiner als vom Hersteller angegeben.

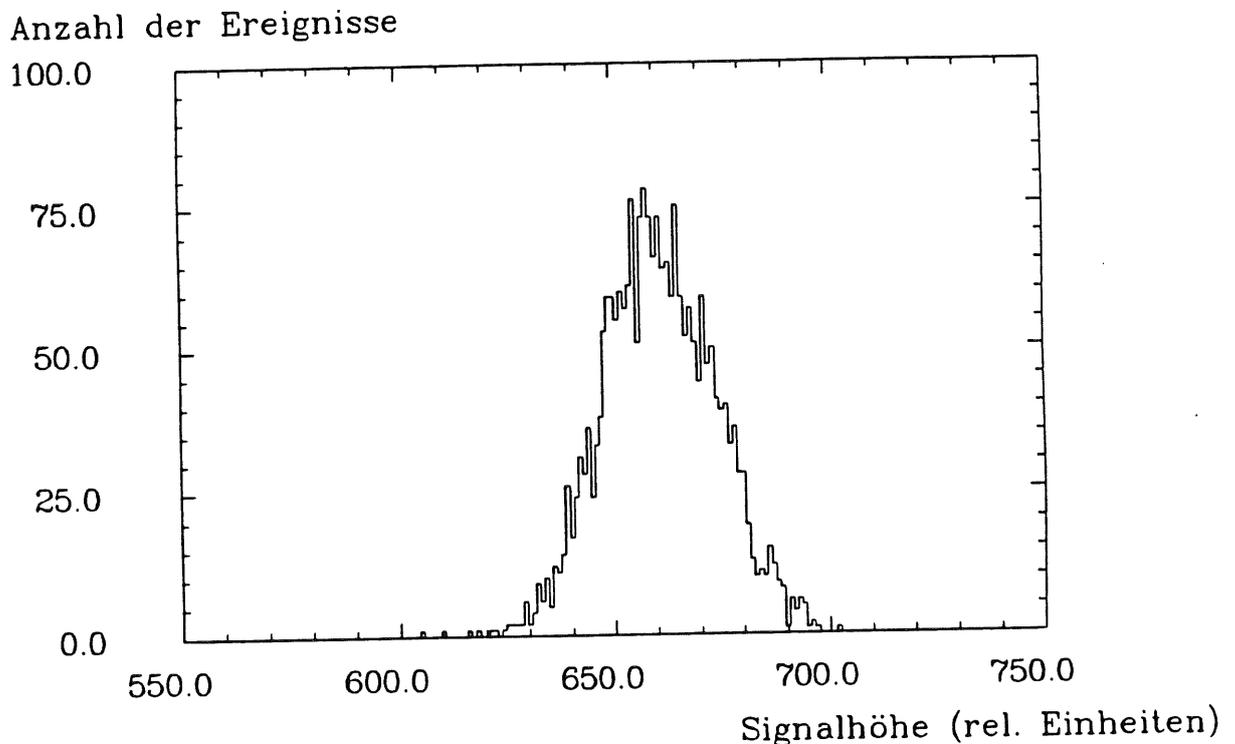


Abbildung 4.1.1: Signalhöhenspektrum des gereinigten Lasers bei optimaler Einstellung

Durch die Glimmentladung im Laserkanal kommt es aber zu Oxidationen, und so verschmutzen im Betrieb ganz allmählich die Elektroden. Dadurch ist aber eine funkenfreie Glimmentladung nicht mehr möglich, was zur Folge hat, daß dann vermehrt niederenergetische Pulse auftreten und sich die FWHM deutlich vergrößert. Zur Verbreiterung des Signalhöhenspektrums trägt aber auch die Verschmutzung des *Spark-Gaps*, einer Funkenkammer, die zuständig für die schnelle Entladung einer Elektrode ist, mit bei. Da sich ferner durch Abbrand die Funkenstrecke vergrößert, ist es neben der Reinigung des Laserkanals, der Elektroden und der Funkenkammer auch nötig, die Funkenstrecke im *Spark-Gap* zu justieren, um so wieder ein Signalhöhenspektrum mit kleiner FWHM zu bekommen.

Wird der Laser ohne Spülung mit Stickstoff in Betrieb genommen, stellt sich erst nach ca. 25 Minuten die Signalhöhe auf einem konstanten Niveau ein (siehe Abb. 4.1.3). Durch sorgfältiges Spülen kann erreicht werden, daß der Laser von vornherein eine konstante Signalhöhe liefert. Im Fall von Linearitätstests ist es - wegen der Verminderung der Intensität in definierten Schritten - nötig, Vorkehrungen zu treffen, daß der Laser eine konstante Signalhöhe liefert, entweder durch ausreichende Spülung oder durch entsprechend lange Vorlaufzeit.

Anzahl der Ereignisse

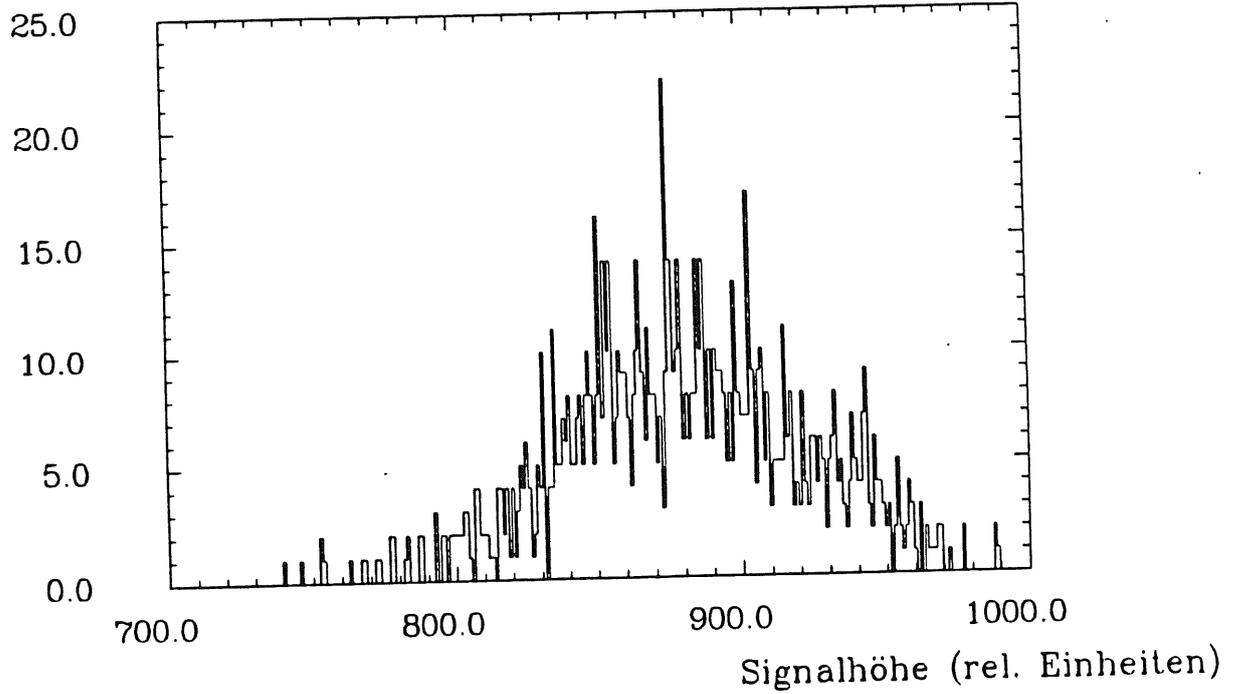


Abbildung 4.1.2: Signalthöhenspektrum des Lasers im verschmutzten Zustand

Signalhöhe (rel. Einheiten)

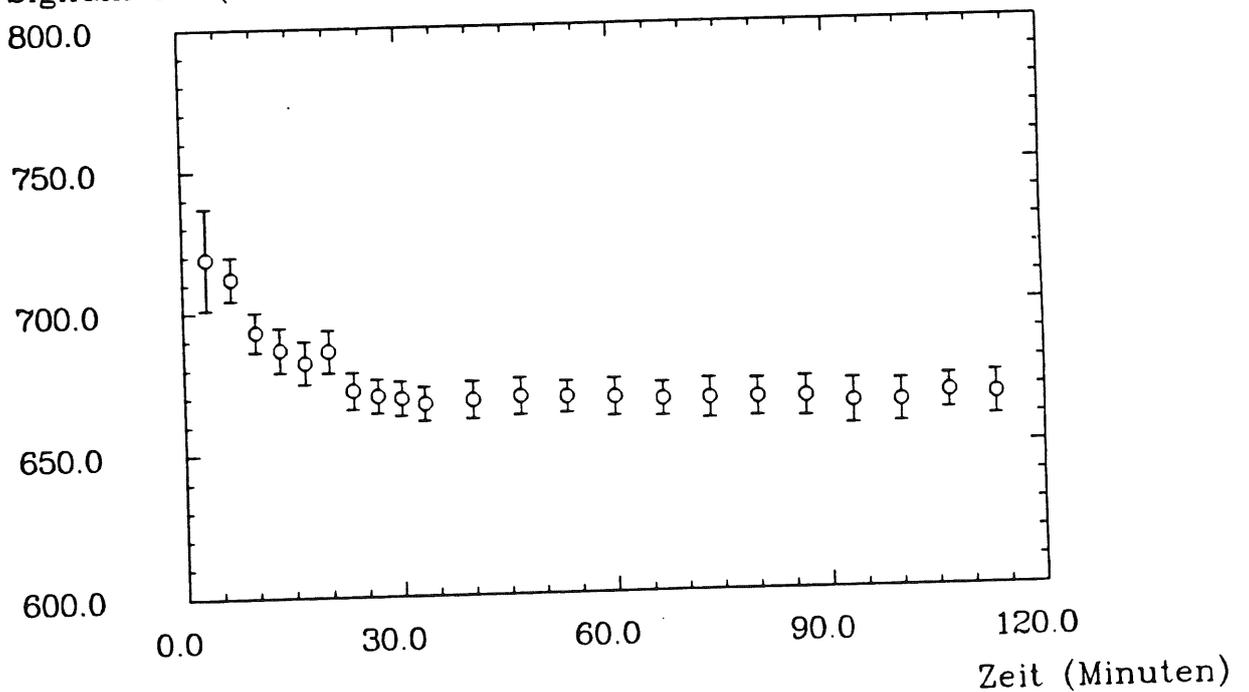


Abbildung 4.1.3: Signalhöhe des Lasers während eines Dauertests
(Die Fehlerbalken geben die FWHM der Signalthöhenspektren an.)

In Abbildung 4.1.4 sind die Signalhöhen über einen Zeitraum von einem Monat aufgetragen. Von Inbetriebnahme zu Inbetriebnahme sind deutliche Veränderungen zu erkennen. Eine Stabilisierung der Laserintensität und somit der Monitor-signale könnte sich im Betrieb des Lasermonitorsystemes als recht nützlich erweisen. Für eine solche Stabilisierung könnten Graufilter sorgen, die nach der Analyse der ersten Laserpulse so ausgewählt werden, daß die Monitor-signale möglichst optimal in den gewünschten Meßbereich fallen. Wenn man die Einstellung stufenlos vornehmen möchte, bietet sich der Einsatz eines motorgetriebenen kreisförmigen Filterkeiles an.

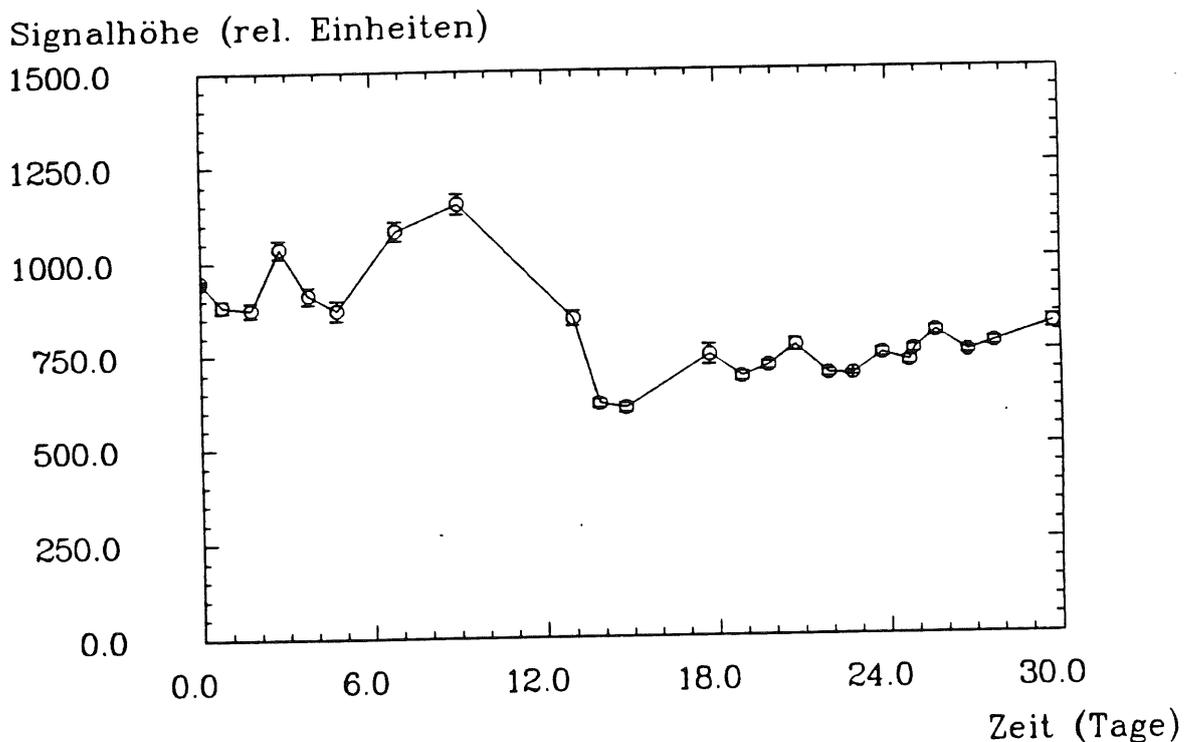


Abbildung 4.1.4: Signalhöhe des Lasers während des Langzeittests III
(Die Fehlerbalken geben die FWHM der Signalthöhenspektren an.)

Die erwähnten Puls-zu-Puls-, Einlauf- und Langzeitschwankungen erfordern bei einer Kalibration mit 1% Genauigkeit, daß die Signalhöhe Puls für Puls mit einem Referenzsystem kontrolliert wird. Für diese Kontrolle muß das System zumindest kurzzeitig (d.h. über die Zeit eines einzelnen Monitorlaufes) stabil arbeiten. Eine Langzeitstabilität ist im Hinblick auf eine Absoluteichung wünschenswert.

4.2 Die laserseitige Optik

Der Laserstrahl wird von einer Bikonkavlinse mit $f = -20 \text{ mm}$ aufgeweitet und verläuft nach Passieren einer Bikonvexlinse mit $f = 100 \text{ mm}$ (oder zwei Bikonvexlinsen mit $f = 200 \text{ mm}$) parallel zur optischen Achse. Es folgt dann mit einem Strahlteilersystem eine Aufteilung in zwei Strahlen, die mit Bikonvexlinsen wieder fokussiert und jeweils in eine Primärfaser eingespeist werden.

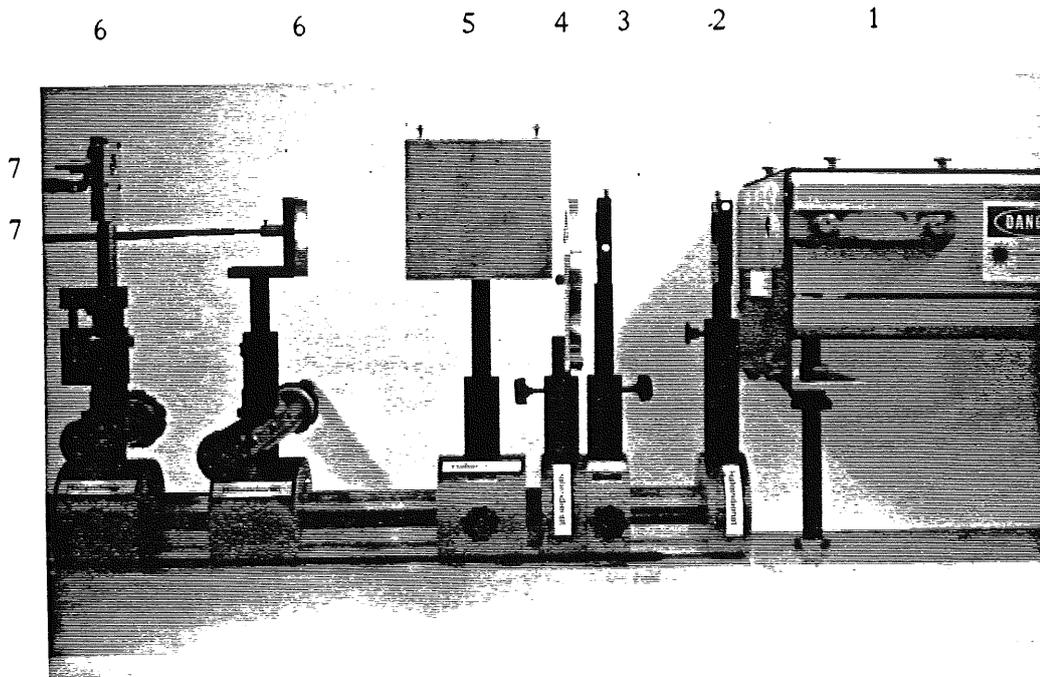


Abbildung 4.2.1: Laserseitiger Aufbau im Labor, entsprechend der Skizze in Abb. 3.2.2
 1: Laser; 2: Bikonkavlinse; 3: Bikonvexlinse; 4: Filterrad;
 5: Halter für Strahlteiler und Spiegel; 6: Halterungen für die Primärfasern; 7: Primärfasern

Neben den Eigenschaften der optischen Komponenten werden im folgenden auch Untersuchungen vorgestellt, die sich mit Auswirkungen durch Veränderungen des Aufbaus in Hinblick auf die Interkalibration und Absoluteichung beschäftigen. Am Ausgang des Mischers sind also insbesondere bei diesen Untersuchungen zwei Fasern angekoppelt, um die beiden Signalhöhen nach der Quotientenmethode Puls für Puls zu verarbeiten. Simuliert wurden:

- * Veränderungen am Laser, die bei Reinigung und Neueinstellung auftreten,
- * Veränderungen des Durchmessers des aufgeweiteten Strahls mit einer Blende,
- * Veränderungen der Laserintensität durch Filter,
- * Veränderungen des Strahlverlaufes durch Verschiebung der Einkopplungsposition in die Primärfaser.

4.2.1 Justierung des Laserkopfes

Der Laserkopf wurde mehrmals während einiger Langzeittests gereinigt. Nach der Reinigung wurde die Einstellung des Elektrodenabstands so vorgenommen, daß es über die gesamte Länge des Laserkanales zu einer gleichmäßigen Glimmentladung kommt. Am 1.3.90 wurde der Laser wegen Reparaturarbeiten sogar ganz aus dem Aufbau entfernt.

Der Quotient wurde jeweils vor und nach einer Reinigung und Neueinstellung gemessen. Die Veränderungen des Quotienten sind in Tabelle 4.2 aufgeführt. Sie blieben aber immer deutlich unter 1 %.

Reinigung am	Quotient (in rel. Einheiten)		Abweichung
	vor der Reinigung	nach der Reinigung	
21.2.90	603	605	0.33 %
01.3.90	607	608	0.16 %
20.4.90	617	618	0.16 %
03.5.90	640	639	0.16 %
14.5.90	635.5	635	0.08 %

Tabelle 4.2: Auswirkungen von Reinigung und Neueinstellung des Lasers auf den Quotienten

4.2.2 Einfluß des Strahlquerschnittes

Mit einer Irisblende wurde der Strahldurchmesser von ursprünglich 21.4 mm (Innendurchmesser der Linsenfassung) in Schritten von 2 mm verkleinert. Deutliche Auswirkungen auf den Quotienten sind erst bei einer Öffnung mit 6 mm Durchmesser bemerkbar. Eine solch drastische Veränderung des Strahlquerschnittes ist aber während des Betriebes nicht zu erwarten.

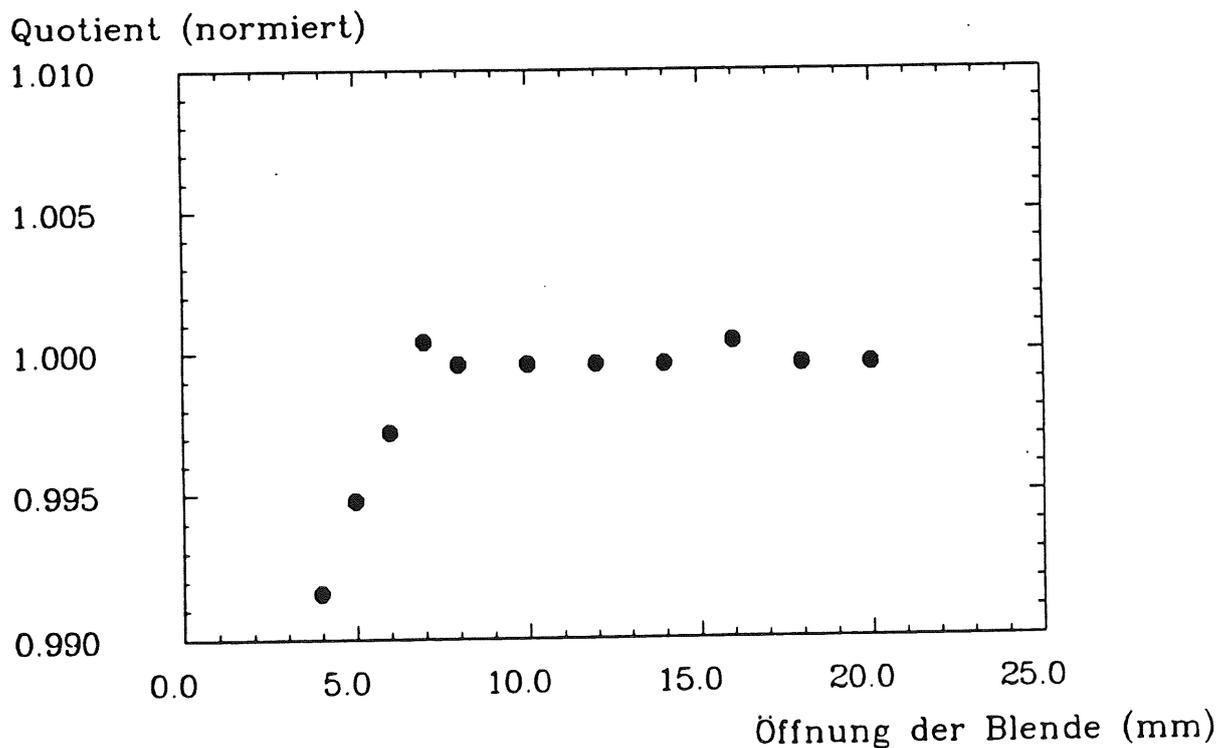


Abbildung 4.2.2: Einfluß des Strahldurchmessers auf den Quotienten (Der maximale Strahldurchmesser ist 21.4 mm.)

4.2.3 Der Strahlteiler

Zur Strahlteilung wird ein beschichtetes Quarzglasplättchen eingesetzt. Die Beschichtung ist so auf die Wellenlänge von 337.1 nm abgestimmt, daß bei Einstrahlung unter einem Winkel von 45 Grad ca. 50 % der Intensität reflektiert und 50 % transmittiert wird. Ein Spiegel sorgt für die Umleitung des reflektierten Strahls, so daß die Einspeisung in die Primärfasern parallel zur optischen Achse vorgenommen werden kann.

Strahlteilerplättchen und Spiegel sind in einem Aluminiumhalter (siehe Abbildung 4.2.1) integriert und fixiert. Da bei der mechanischen Fertigung dieser Halterung ein Fehler von bis zu 2 Grad auftreten kann, ist dadurch letztendlich auch die Genauigkeit für die Ausrichtung von Strahlteiler und Spiegel gegeben. In dem Fall, daß die Winkel nicht den geforderten 45 Grad entsprechen, kann das Auswirkungen auf das Strahlteilungsverhältnis haben. Da aber auch noch andere Einflüsse die Höhe der Monitorsignale beeinflussen können (Polituren der Primärfasern, Optik am Verteiler etc.), sollte erst nach Vollendung des Endaufbaus mit Hilfe eines Filters vor Einspeisung in eine der Primärfasern die Höhe der Monitorsignale der beiden verschiedenen Lichtwege angeglichen werden.

Eine Messung des Quotienten der Signale aus den beiden Signalwegen soll klären, ob die Strahlteilung Puls für Puls im gleichen Verhältnis geschieht. Das Quotientenspektrum hat eine FWHM von 1.4 %. Somit kann von diesem konstanten Strahlteilungsverhältnis in weiteren Messungen Gebrauch gemacht werden, die wegen der kleinen Halbwertsbreite eine hohe Genauigkeit haben (unter 1 %).

Anzahl der Ereignisse

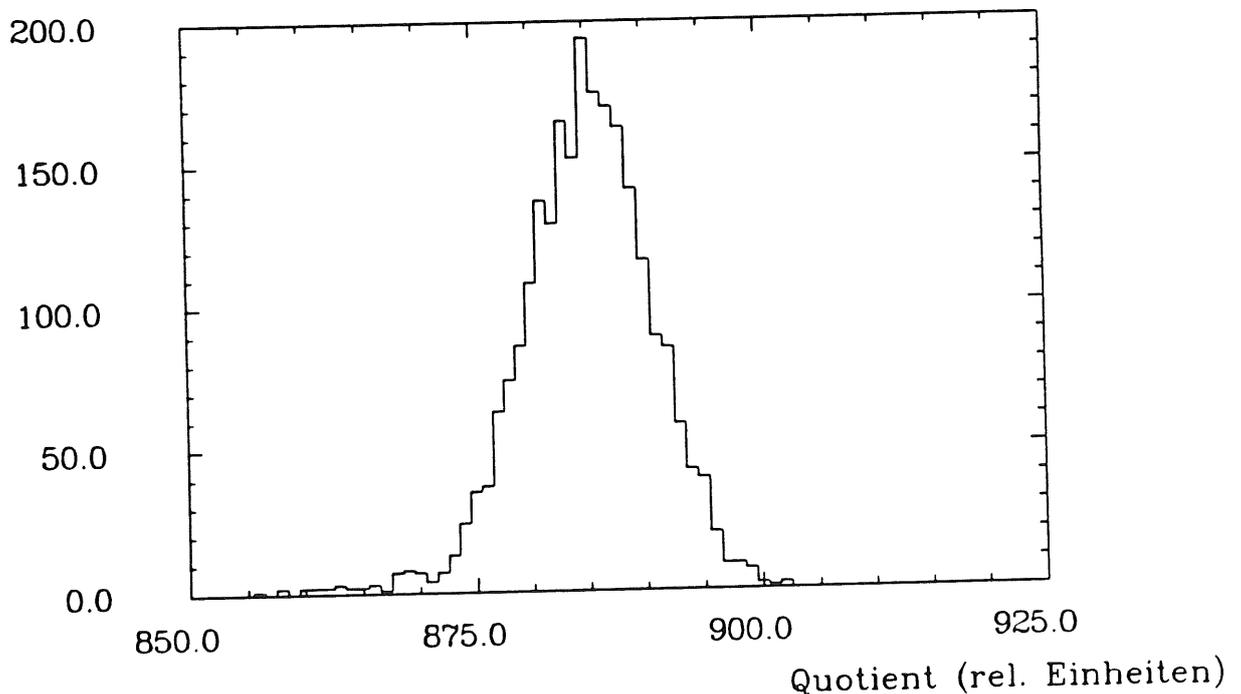


Abbildung 4.2.3: Verhältnis der zwei Signale hinter dem Strahlteiler

4.2.4 Neutralfilter

Für die Verminderung der Lichtintensität stehen sieben Neutralfilter aus Quarzglas zur Verfügung. Die Filter arbeiten unter Ausnutzung von Absorption ("Graufilter") und bei Filtern hoher optischer Dichte zusätzlich unter Ausnutzung der Reflexion an beschichteten Oberflächen. Die Transmissionen der Filter wurde mit Hilfe des Strahlteilers gemessen.

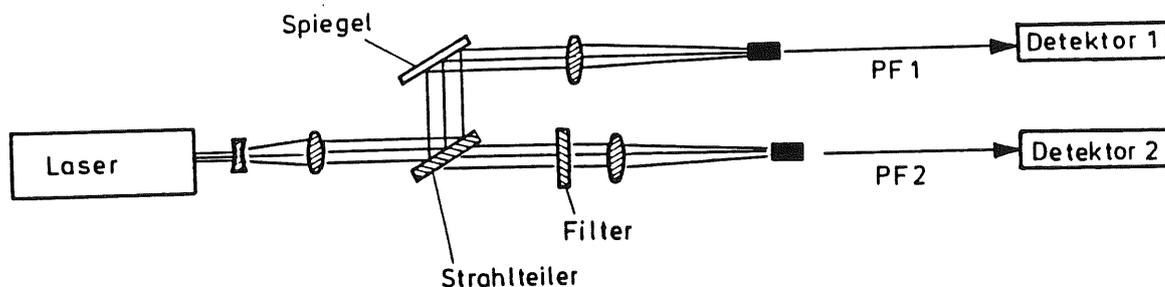


Abbildung 4.2.4: Meßaufbau zur Bestimmung der Transmission von Filtern

In einem Signalweg wurde die Signalhöhe vor Einspeisung in die Primärfaser (Pf. 2) mit den Filtern abgeschwächt und dann das Verhältnis zum anderen unveränderten Signalweg (Pf.1) Puls für Puls gemessen. Um die Transmissionen der Filter mit optischer Dichte 2.0 und 3.0 zu bestimmen, mußte die Verstärkung vergrößert werden, damit die sehr kleinen Signale überhaupt noch verarbeitet werden konnten. Da diese Messungen nur mit Hilfe des nächst niedrigeren Filters vorgenommen werden konnten und dabei auch deren Fehler eingingen, sind die Meßfehler wegen der Fehlerfortpflanzung entsprechend größer.

Opt. Dichte (nominal)	Opt. Dichte aus der Eichkurve bei 337.1 nm	Transmission laut Eichkurve (*)	Gemessene Transmission rel. Einheiten	normiert	Meßfehler
0.0	0	1.0 10E 0	970	1.00 10E 0	0.8%
0.04	0.04	9.12 10E-1	885	9.127 10E-1	0.8%
0.1	0.15	7.08 10E-1	688	7.096 10E-1	0.8%
0.3	0.27	5.37 10E-1	523	5.394 10E-1	0.8%
0.5	0.42	3.80 10E-1	375	3.867 10E-1	0.8%
1.0	0.92	1.20 10E-1	122	1.258 10E-1	0.8%
1.0 (**)			986		
2.0	2.15	7.08 10E-3	58	7.401 10E-3	1.15%
2.0 (**)			868		
3.0	3.35	4.47 10E-4	57	4.860 10E-4	1.63%

(*) Transmission: $T = 10^{-opt. Dichte}$
 (**) bei Veränderung der Verstärkung

Tabelle 4.3: Transmission der verwendeten Neutralfilter

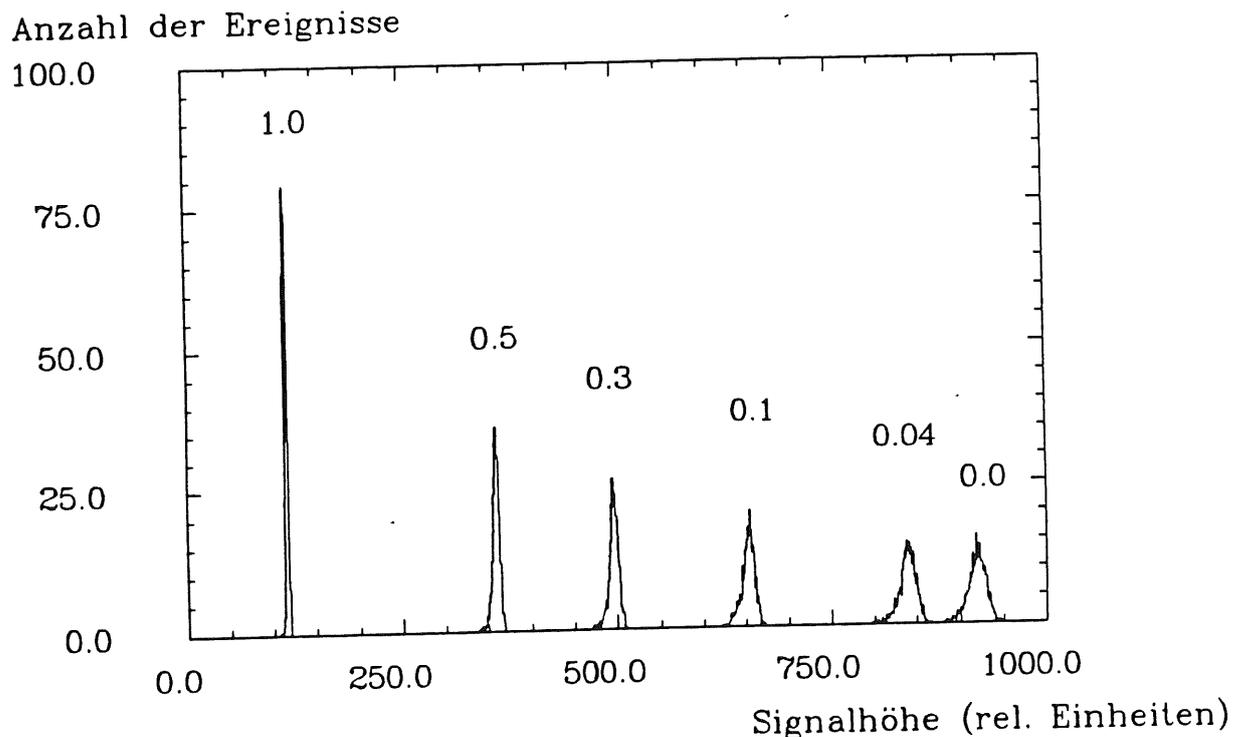


Abbildung 4.2.5: Durch die Neutralfilter erreichbare Signalhöhen

Baut man aber mehrere Filter hintereinander auf, so kann sich die Transmission des einzelnen Filters ändern, da es zu unvermeidbaren Mehrfach-Reflexionen kommt.

Andererseits ergibt sich aber durch eine Kombination mehrerer Filter die Möglichkeit, erst mit Filtern hoher optischer Dichte die gewünschten Intensitäten grob einzustellen und dann mit Filtern kleinerer optischer Dichten eine Feineinstellung vorzunehmen. Ein solches Vorgehen ist insbesondere dann nötig, wenn Linearitätstests über große Meßbereiche vorgenommen werden sollen. Auch beim BEMC ist solch ein Vorgehen ratsam:

1. Zum Ausgleich von Veränderungen der Laserintensität stellt mit Hilfe eines Filterkeiles die Signalhöhe auf das obere Ende des Meßbereiches ein (60 GeV).
2. Mit Hilfe der Filter mit optischer Dichte von (nominal) 1.0, 2.0 und 3.0 läßt sich jeweils ein um eine Größenordnung kleineres Signal einstellen:

Filter*	Monitorsignal simuliert	Bemerkungen
0.0	60 GeV	Quasielastisches Elektron: $E_e = 30 \text{ GeV}$
1.0	7.6 GeV	
2.0	444 MeV	Energieverlust von Myonen entspricht $E_e = 308 \text{ MeV}$
3.0	47 MeV	In der Größenordnung des Rauschens

* nominale optische Dichte; gemessene Transmissionen siehe Tabelle 4.3

Tabelle 4.4: Monitorsignale und die Eichpunkte des BEMC

3. Wenn man nun noch zusätzlich zu dieser Grobeinstellung die übrigen Filter mit kleineren optischen Dichten benutzt, ist ein detaillierter Linearitätstest möglich.

Abschnitt 4.2.4: Neutralfilter

Die Veränderung der Intensität (Abbildung 4.2.5) hat auf die Verteilung am Mischerausgang keinen Einfluß. Das Spektrum des Quotienten wird zwar bei kleinen Signalen etwas breiter (siehe Abbildung 4.2.6 f); das liegt aber nur an der Digitalisierung kleiner Signale und der daraus resultierenden Ungenauigkeit bei der Verarbeitung im Kalkulationsprogramm. Der Mittelwert des Quotienten bleibt bis auf statistische Schwankung konstant (siehe Abbildung 4.2.7).

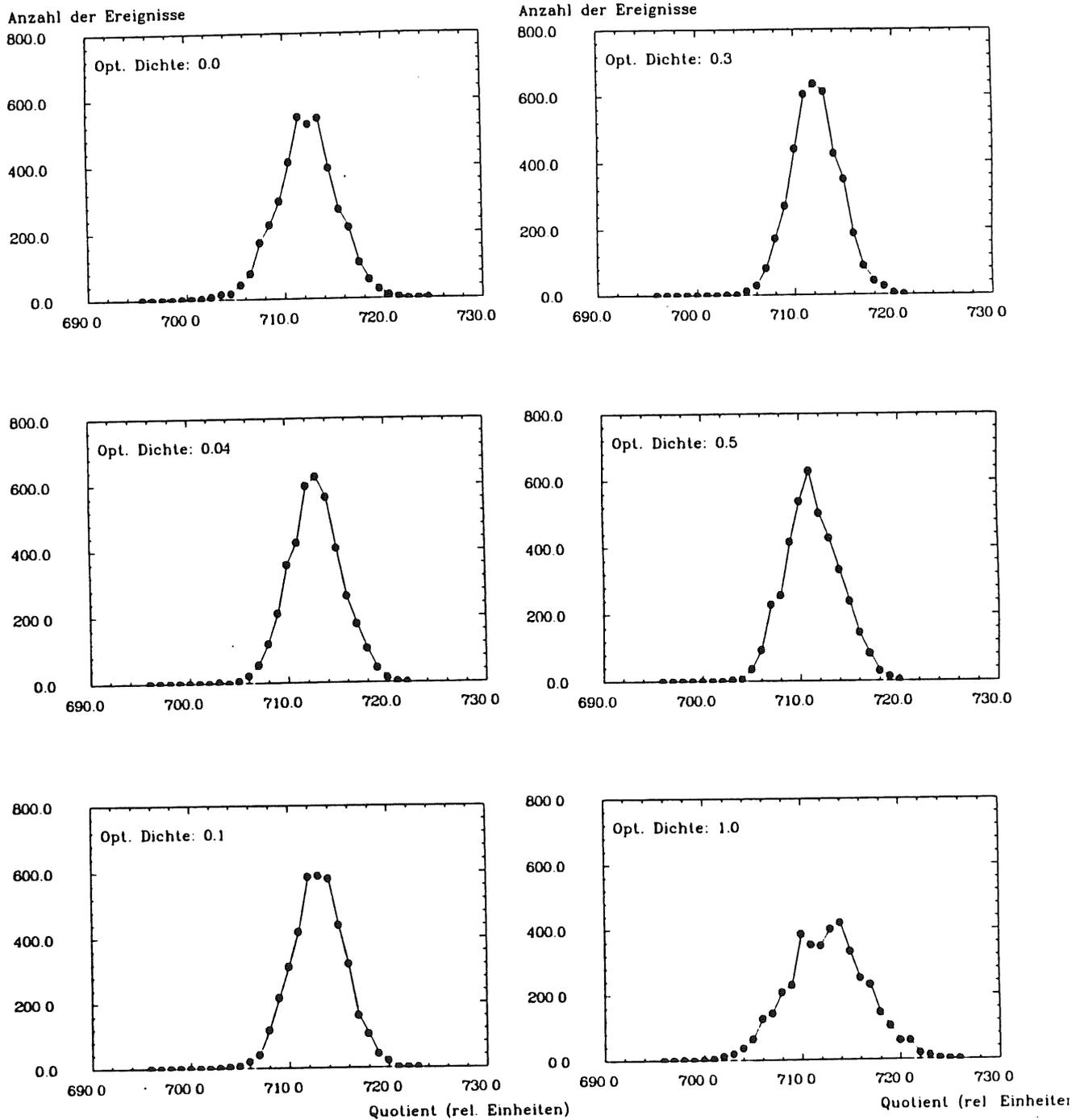


Abbildung 4.2.6 a-f: Quotientenspektren bei unterschiedlichen Intensitäten

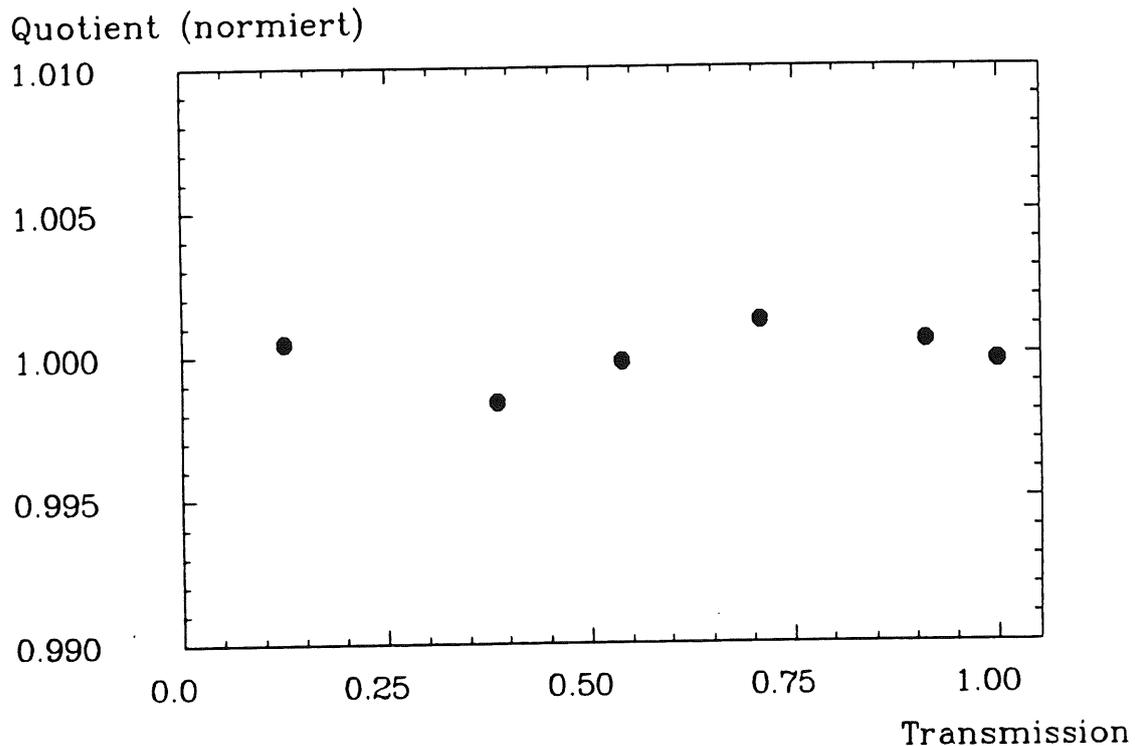


Abbildung 4.2.7: Quotient bei Benutzung verschiedener Filter

4.2.5 Einkopplung in die Primärfaser

Um eventuelle Veränderungen des Strahlverlaufes, die Einfluß auf die Lage des Brennpunktes haben, zu simulieren, wurde bei unverändertem Strahlverlauf der Ort der Einkopplung in die Primärfaser mit einer xyz-Verschiebeeinheit variiert.

Eine Verschiebung des Einkopplungsortes um insgesamt 20 mm entlang der optischen Achse ("z-Richtung") bewirkte keine wesentliche Änderung des Quotienten, obwohl diese Verschiebung schon einen deutlichen Bruchteil der Brennweite ausmacht (Bikonvexlinse zur Fokussierung hat $f = 200 \text{ mm}$). Das Verhältnis änderte sich in den Extrempositionen nur um weniger als 0.5 % im Vergleich zum Quotienten im Brennpunkt ($z = 0.0 \text{ mm}$).

Bei Verschiebungen quer zur optischen Achse in der Brennebene (vertikal: y ; horizontal: x) sind die Bereiche sehr viel kleiner, in denen keine markante Änderung des Quotienten auftritt, denn der Durchmesser der optisch aktiven Fläche der Primärfaser (1 mm) und die Fläche des "Brennfleckes" haben eine ähnliche Größenordnung. Hier macht sich die elliptische Form des Strahlquerschnittes bemerkbar (vgl. Abbildung 4.2.9): In der Vertikalen ist ein Plateau über 0.8 mm erkennbar, in der Horizontalen geht das Plateau über einen Bereich von 1.1 mm. Am Rand des Brennfleckes ist in beiden Fällen eine abrupte Änderung des Quotienten

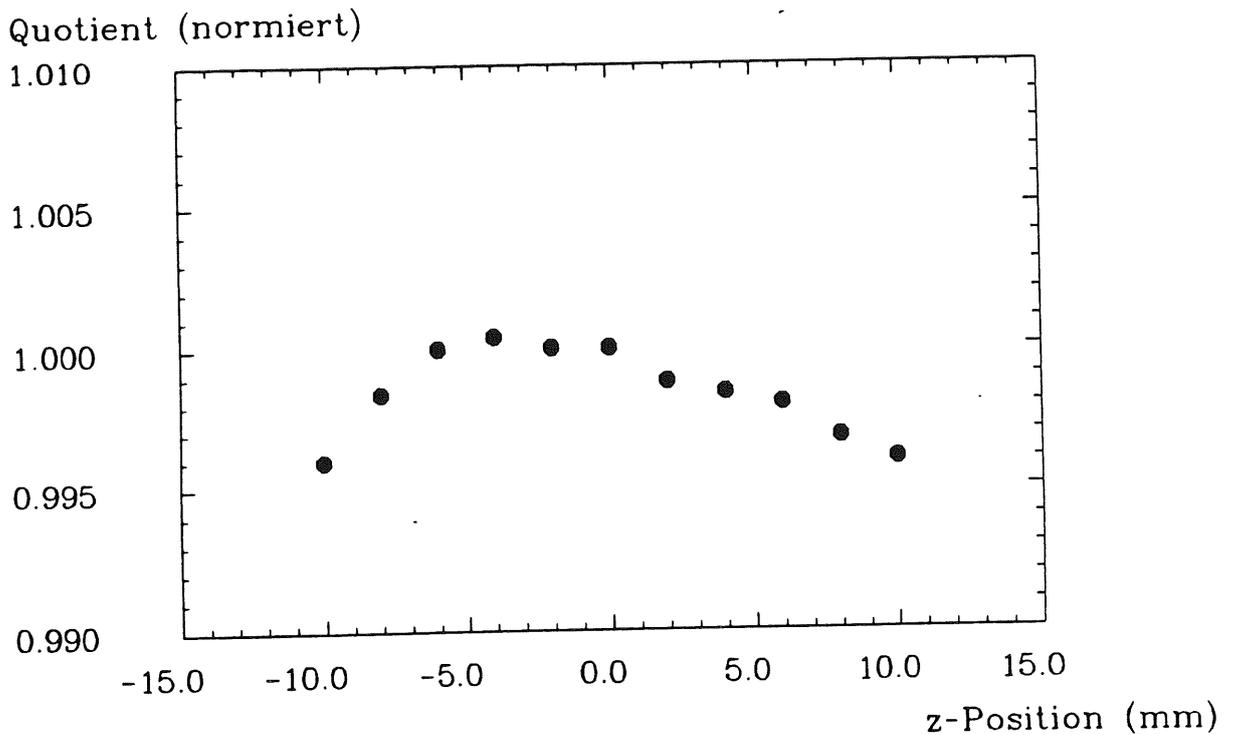


Abbildung 4.2.8: Quotient bei Verschiebung des Einkopplungsortes entlang der optischen Achse

erkennbar, obwohl die Signalhöhe noch ausgereicht hätte, den Quotienten ohne großen Fehler zu bestimmen. Offensichtlich macht eine stark inhomogene Ausleuchtung der Faserstirnfläche sich auch mischerseitig in der Verteilung bemerkbar. Die Existenz eines Plateaus bei beiden transversalen Verschiebungen ermöglicht es - bei einer leicht erreichbaren Genauigkeit von 0.1 mm - , die Primärfaser ohne große Probleme neu zu justieren.

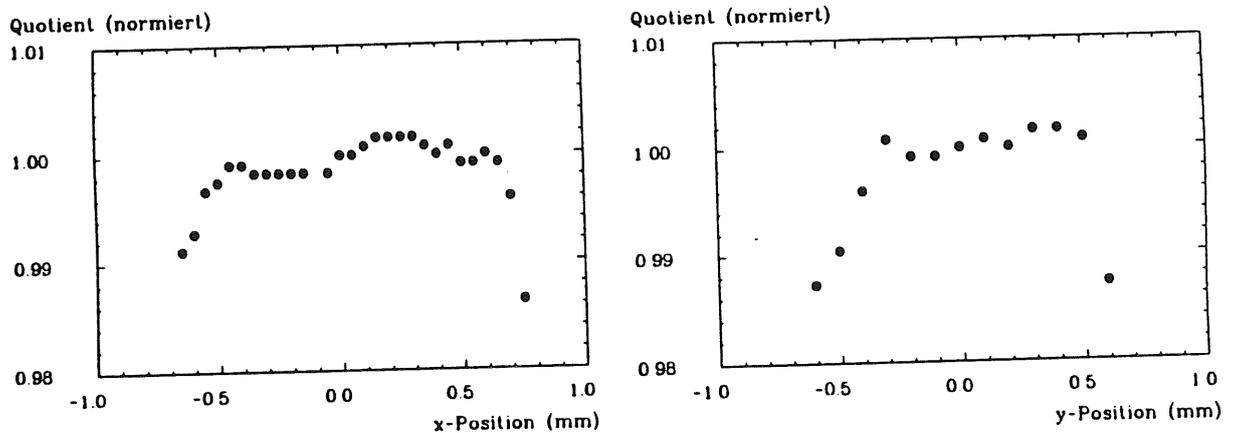


Abbildung 4.2.9: Quotient bei Verschiebung quer zur optischen Achse:
 a: (links) horizontale Verschiebung des Einkopplungsortes
 b: (rechts) vertikale Verschiebung des Einkopplungsortes

4.3 Die Primärfaser

Das UV-Licht des Lasers muß, da der Laser außerhalb des Detektors plaziert ist, über eine Strecke von 17 m zum BEMC transportiert werden. Um eine ausreichende Signalhöhe zu gewährleisten, ist eine Faser nötig, die zum einen aufgrund eines großen Kerndurchmessers eine unproblematische Einspeisung großer Intensitäten ermöglicht und zum anderen UV-Licht ohne große Verluste transportiert.

Die Entscheidung fiel zugunsten einer HCN-Faser⁴ mit einem Kerndurchmesser von 1000 μm aus. Sie gehört ihres Aufbaus wegen zur Klasse der HCS-Fasern⁵ und hat beim Vergleich mit anderen Fasertypen im UV-Bereich noch akzeptable Transmissionseigenschaften. (Informationen zu den eingesetzten Fasern und Fasereigenschaften sind im Anhang D zusammengestellt.) Neben den beiden 17 m langen Primärfasern werden zwei weitere Fasern redundant mitverlegt.

Bei Zugrundelegung einer Abschwächlänge von 5.7 m (gemessene Abschwächlänge einer HCN-Faser mit 200 μm Kerndurchmesser bei $\lambda = 337 \text{ nm}$ [Sch 89]), wird - abgesehen von den Verlusten bei Ein- und Auskopplung - nur ca. 5.1 % des UV-Lichtes von der 17 m langen Faser transmittiert. Ein Test an den kalibrierten Modulen des BEMC wird Auskunft geben, ob die Signalhöhe trotz dieser Abschwächung noch ausreicht, den gesamten Meßbereich der Module zu überprüfen (siehe Kapitel 6).

4.3.1 Konfektionierung der Primärfasern

Zur Bearbeitung werden die Fasern in eine Messinghülse eingebracht. Dabei sind die Fasern auf zwei unterschiedliche Weisen in der Hülse befestigt worden: Durch Crimpen (Anpressen der Hülse an die Faser) und durch Kleben. Anschließend wurde das kleine herausragende Ende der Faser mit einer Diamantsäge abgetrennt. Zur Politur wurde die Messinghülse dann in einen Messingblock mit passender Bohrung eingeführt, damit die Oberfläche orthogonal zur Faserachse steht. In mehreren Poliervorgängen wurden immer feinere Poliermittel verwendet. Der letzte Poliervorgang erfolgte mit in Wasser vermengtem Ceroxid (CeO_2) auf einer Glasplatte.

Abbildung 4.3.1 a zeigt die polierte Oberfläche der Faser, die in der Messinghülse eingecrimpt wurde. Am Rand des Quarzglaskernes sind deutlich Absplitterungen zu erkennen. Die Ursache liegt wohl darin, daß die Faser trotz Crimpung zu viel Spiel im Politurbereich hatte.

In Abbildung 4.3.1 b ist die polierte Oberfläche der eingeklebten Faser zu erkennen. Es sind dort keine Absplitterungen am Rand des Kernes zu erkennen, weil auch im Bereich der zu polierenden Oberfläche die Klebung für ausreichende Fixierung sorgte. Die Konfektionierung der im H1-Detektor zu verlegenden Primärfasern sollte also bei eingeklebten Fasern vorgenommen werden.

Diese konfektionierten Fasern konnten nun in ihren Hülse in eine Halterung eingeführt werden, die auf einer optischen Schiene montiert auch transversal zur optischen Achse verschiebbar ist.

⁴ Hard - Clad - Short - Haul; Aufbau der Faser entsprechend Abbildung 4.5.1.

⁵ Hard - Clad - Silica - Fiber Hersteller: Ensign-Bickford-Optics-Company

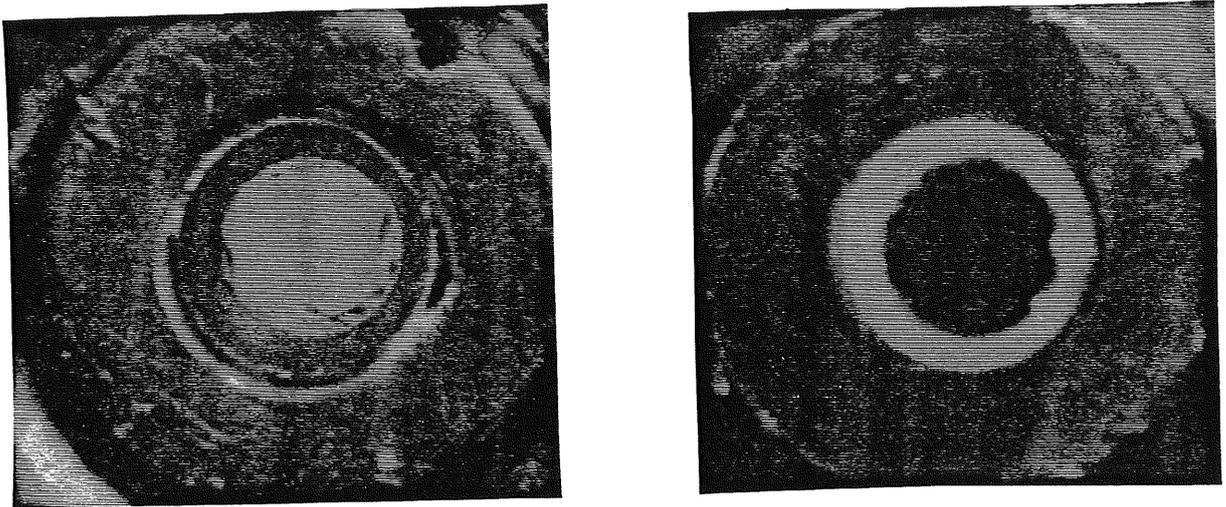


Abbildung 4.3.1: Polierte Faseroberflächen: a: (links) Faser, in die Hülse gecrimpt. b: (rechts) Faser, in die Hülse geklebt.

4.3.2 Krümmungsverhalten der Primärfasern

Erste Tests mit einer Primärfaser haben gezeigt, daß es zu nicht reproduzierbaren Veränderung des Quotienten kommen kann, wenn die Faser in der Nähe der Kopplungsorte nicht fixiert ist. Um solche Veränderungen auszuschließen, wurde bei allen Messungen die Primärfaser über eine Strecke von jeweils 40 cm hinter der laserseitigen Einkopplung und der verteilerseitigen Auskopplung befestigt. Dadurch wurde einer Veränderung der Einspeisungs- und Abstrahlcharakteristik vorgebeugt.

Die Messung zur Radienabhängigkeit wurde immer an zwei Windungen der Primärfaser vorgenommen, die sich in möglichst großer Entfernung von den Kopplungsorten befanden. Während sich ein Intensitätsverlust bei Radien kleiner als 12,5 cm deutlich bemerkbar macht (Abbildung 4.3.2 a), sind beim Quotienten keine wesentlichen Abweichungen erkennbar (Abbildung 4.3.2 b). Der Verlust an Intensität bei einem Radius von 5 cm ist mit 5% zwar relativ gering, jedoch befindet sich die Faser schon in einem kritischen Bereich, was die Bruchgefahr anbelangt.

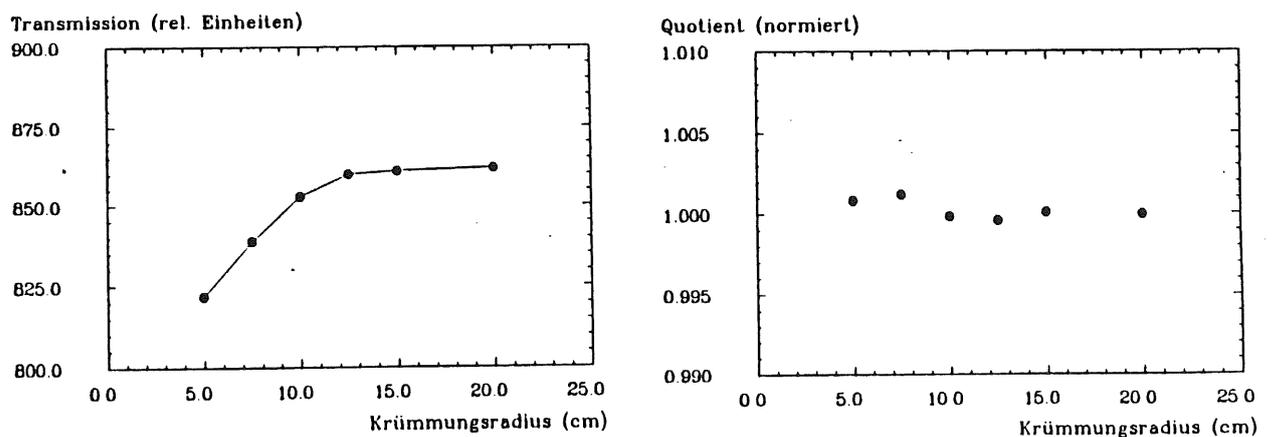


Abbildung 4.3.2: Radienabhängigkeiten:

a: (links) Intensität
b: (rechts) Quotient

Da die Lebensdauer einer Faser von der Spannung abhängt, die bei der Verlegung auftritt, sollten kleine Verlegungsradien vermieden werden. Nach [Sku 85] gilt für die Lebensdauer T_f :

$$\log T_f = -N \log S + \log K$$

N: Materialkonstante ($N \approx 25$ bei 25°C)
S: Angewandter Druck, Spannung
K: Einheitenabhängige Konstante

Ferner ist der Zusammenhang zwischen Druck und Radius im Grenzbereich der (fatalen) Belastung:

$$S = \frac{E \cdot r}{R + r + d}$$

E: Elastizitätsmodul von Quarzglas
 $\approx 7,6 \cdot 10^{10} \text{ Nm}^{-2}$ aus [Ger 82]
r: Kerndurchmesser
R: Verlegeradius
d: Dicke von *Cladding* und *Buffer*

Damit errechnet sich eine Lebensdauer in Abhängigkeit des Radius:

$$T_f = K \left(\frac{R+d+r}{E \cdot r} \right)^N \approx K \left(\frac{R}{E \cdot r} \right)^N \quad \text{für } R \gg r, d$$

Die Lebensdauer der Faser ist also empfindlich vom Verlegeradius abhängig (siehe Tabelle D1 in Anhang D). Im Fall der HCS-Faser mit $1000 \mu\text{m}$ Kerndurchmesser wird für eine Lebensdauer von 20 Jahren eine Verlegung mit einem minimalen Radius von 20 cm empfohlen. Bei kleineren Radien können sich entsprechend früher Brüche ereignen. Der Sicherheit und Zuverlässigkeit wegen sollte deshalb bei der Verlegung der Primärfasern (und ebenso auch der Referenzfasern) unbedingt auf die Vermeidung kleiner Radien geachtet werden.

4.3.3 Kopplungseigenschaften

Beim Aufbau des Lasermonitorsystemes muß - wie schon in Abschnitt 3.2.1 angesprochen - eine Abkopplung der Primärfasern vorgenommen werden können. Deshalb werden hier die Eigenschaften vorgestellt, die für den Ab- und Wiederaufbau vor dem Hintergrund der Erhaltung der Eichinformation von entscheidender Bedeutung sind.

Zunächst zu den Drehungseigenschaften: Bei Rotation der Primärfaser im Halter am laserseitigen Kopplungsort ist eine markante Abhängigkeit des Quotienten vom Winkel festzustellen (Abbildung 4.3.3). Zunächst wurde die Faser von der 0-Grad-Position in positive Richtung gedreht (durchgezogener Polygonzug). Bei Rotation um $+360 \text{ Grad}$ wurde ein Quotient gemessen der nur um $0,1 \%$ vom Quotienten der 0-Grad-Position abweicht. Der gepunktete Polygonzug beschreibt den Rückweg von $+360 \text{ Grad}$ zur 0-Grad-Position. Wird die Faser weiter in negative Richtung gedreht, zeigt der Quotient das gleiche Verhalten wie beim jeweiligen Winkel plus 360 Grad , also: $Q(\alpha) = Q(\alpha \pm 2\pi)$. Auch hier zeigt der Rückweg (wieder gepunkteter Polygonzug) dasselbe Verhalten. Daß die Kurven nicht direkt übereinander verlaufen, liegt an dem relativ großen Fehler beim Einstellen des Winkels: Er konnte nur auf $\pm 5 \text{ Grad}$ eingestellt werden.

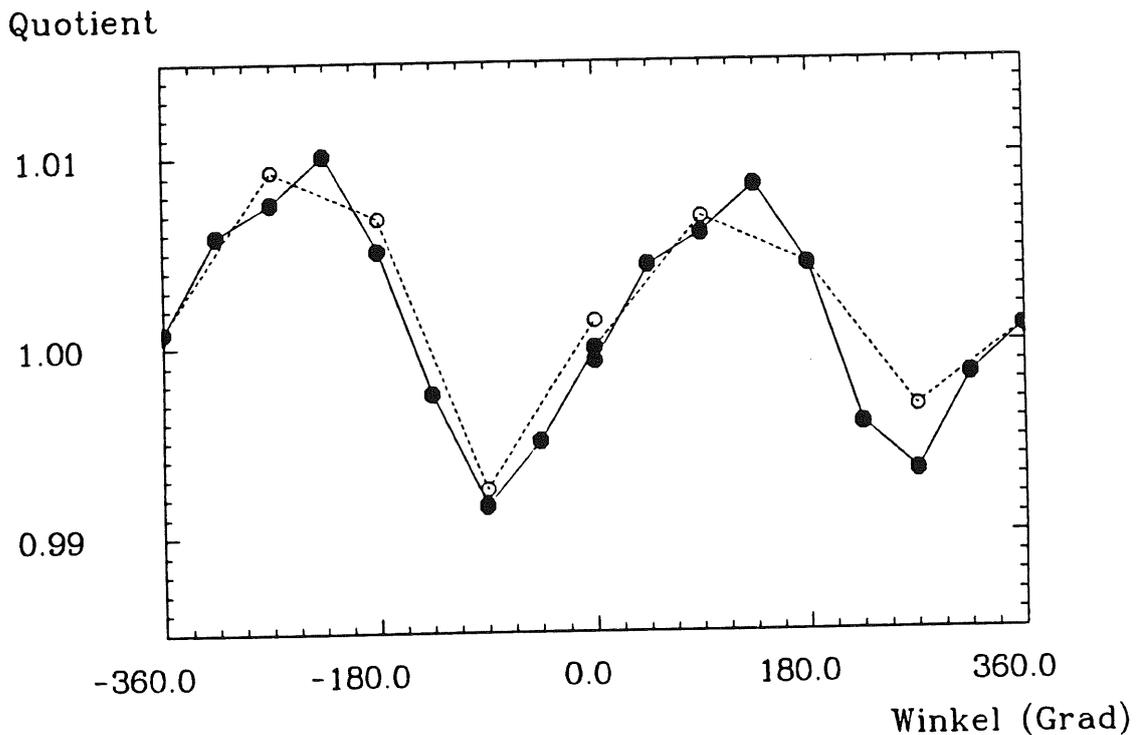


Abbildung 4.3.3: Quotient bei laserseitiger Drehung der (geklebten) Primärfaser

Die Gründe für diesen Einfluß auf den Quotienten liegen an einer Struktur der polierten Oberfläche. Da auch die Intensitätsverteilung des Laserstrahles im Brennpunkt - am Kopplungsort - eine Struktur hat (horizontal breiter als vertikal, siehe Abschnitt 4.2.5), ist eine Verdrehung dieser beiden Strukturen zueinander mit einer Veränderung der Einstrahlcharakteristik verbunden. Als Beweis für diese These kann angeführt werden, daß dieser Drehungseffekt bei den gecrimpten Fasern stärker bemerkbar war. Bei diesen Faseroberflächen waren die Ränder des Quarzglas-kernes deutlich mehr gesplittert und hatten so eine sehr viel markantere Struktur. Der Quotient variierte dort um 3%, also mehr als bei den eingeklebten Fasern (Variation um 2%).

Das Fazit aus dieser Untersuchung ist, daß bei eventuell nötigen Ab- und Wiederankopplungen auf den Winkel geachtet werden muß. Nur eine winkeltreue Ankopplung ermöglicht die Erhaltung der Eichinformation. Um das zu verifizieren, wurden Kopplungstests durchgeführt.

Die laserseitige Kopplung erwies sich als unkritisch. Die bei winkeltreuer Ankopplung auftretende Schwankung war deutlich geringer als 0.5%. Die Standardabweichung bei dieser Kopplung ist 0.073%.

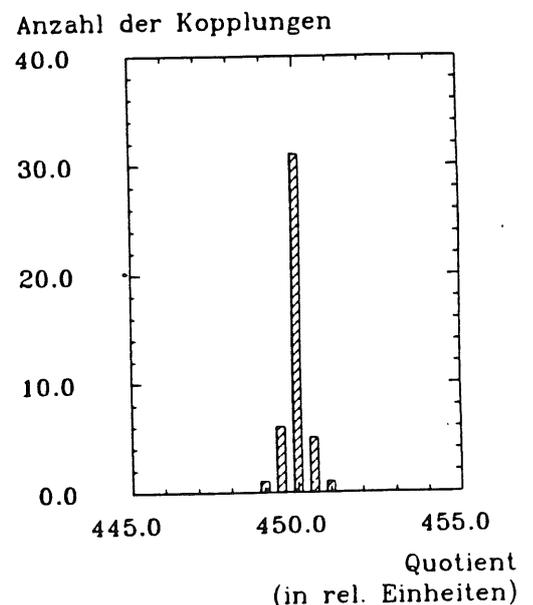


Abbildung 4.3.4: Statistik bei wiederholter laserseitiger Ankopplung

Auch verteilerseitig wurden solche Kopplungstests durchgeführt. Dabei wurde in der ersten Testserie nur auf winkeltreue Ankopplung der Primärfaser geachtet. In der zweiten Serie wurde darüber hinaus die Faser in dieselbe Position gebracht und sorgfältig über die letzten 40 cm fixiert; zusätzlich wurde die Meßgenauigkeit erhöht (*double precision*). Die Standardabweichung hat sich dadurch von 0.148 % (Abbildung 4.3.5 a) auf 0.096 % (Abbildung 4.3.5 b) verbessert. Sie ist aber doch größer als bei der laserseitigen Kopplung. Für den Einsatz im H1-Detektor hat das die Konsequenz, daß mit größter Sorgfalt die verteilerseitige Kopplung in Bezug auf Winkeltreue und Fixierung der Primärfaser vorgenommen werden muß.

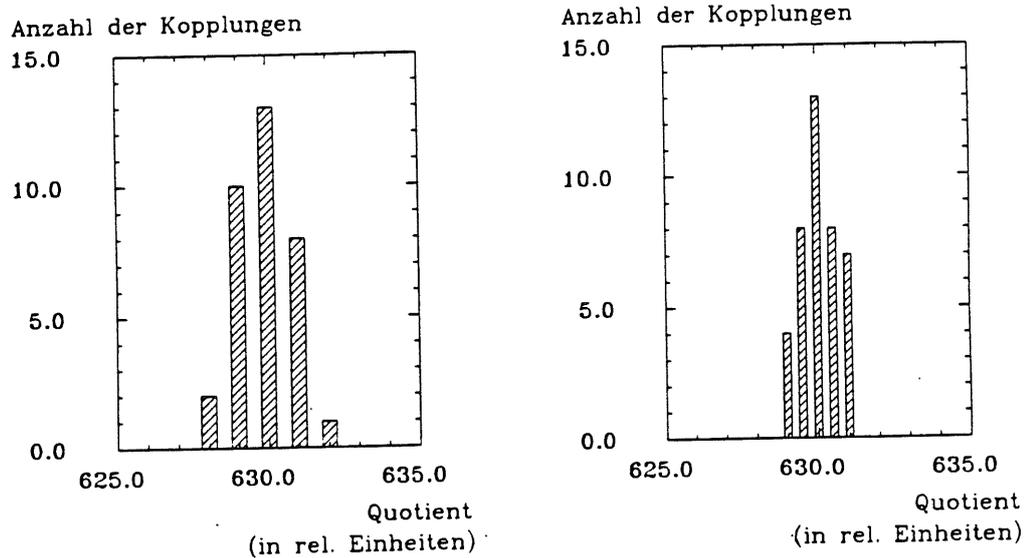


Abbildung 4.3.5: Statistik bei den verteilerseitigen Kopplungstests

- a) (links) Ohne Fixierung der Primärfaser
- b) (rechts) Bei Fixierung der Primärfaser über die letzten 40 cm vor dem Verteiler

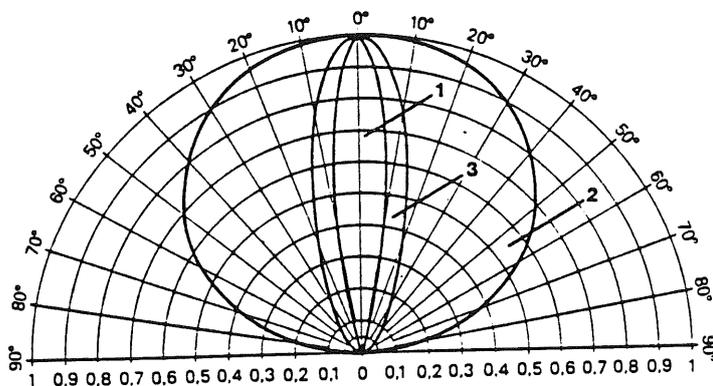
4.4 Der Verteiler

Damit allen 88 Modulen des BEMC ein Monitorsignal zugeführt werden kann, muß das UV-Licht aus der Primärfaser auf entsprechend viele Sekundärfasern verteilt werden. Diese Verteilung soll unter Beibehaltung der Wellenlänge geschehen, damit scheiden Szintillatoren für die Verteilung aus.

4.4.1 Das Verfahren zur Homogenisierung der Ausleuchtung am Verteilerausgang

Ausgehend vom vorhandenen Platz oberhalb des letzten Trägers (siehe Abbildung C 4) ist der Verteiler in einer länglichen Form konzipiert worden. Bei der Auswahl und Dimensionierung der Quarzglasoptik ist auf Erfahrungen anderer Kollaborationen zurückgegriffen worden, insbesondere was den Einsatz eines Quarzglasstabes angeht (z.B. Crystal Barrel [Käm 89], L3-BGO [Ruc 88], SAPHIR in Genf [Wie 86] und [Pei 87]). In diesen Verteilungssystemen werden Glasstäbe einer Länge, die typischer Weise das Zehnfache der Querdimension sind, eingesetzt.

Das Konzept der Lichtverteilung sieht vor, das UV-Licht aus der Primärfaser mit einer starken Bikonkavlinse ($f = -20 \text{ mm}$) zu zerstreuen und dann mit einer Bikonvexlinse ($f = 40 \text{ mm}$) wieder nahezu zu parallelisieren. So trifft es entweder direkt auf einen Quarzglasstab oder durchquert vorher noch eine Oberflächenstreuungsscheibe aus Quarzglas (Körnung ca. $10 \mu\text{m}$), die für eine homogene Ausleuchtung der Eintrittsfläche des Quarzglasstabes sorgt.



1. Oberflächenstreuungsscheibe aus Quarzglas
2. Volumenstreuungsscheiben
3. Überfangstreuungsscheiben

Abbildung 4.4.1: Polardiagramm der Lichtverteilungen an verschiedenen Streuscheiben aus [Spi 87]

Das Ziel war es, die optischen Komponenten so anzuordnen, daß am Ende des Quarzglasstabes, wo ein Faserbündel mit einer optisch aktiven Fläche von ca. 6 mm^2 angekoppelt werden soll, eine möglichst homogene Ausleuchtung besteht.

4.4.2 Optimierung der Ausleuchtung

Für Vortests standen zwei 100 mm lange Quarzglasstäbe⁶ zur Verfügung: Der eine hat einen Durchmesser von 7 mm , der andere 10 mm . Die Oberflächen sind jeweils poliert, die Mantelflächen sind feuerpoliert.

Erste Tests haben gezeigt, daß die Lichtverteilung bei Verwendung der Quarzglasstäbe ein Plateau hat. Beim Quarzglasstab mit 10 mm Durchmesser reicht das Plateau über einen breiteren Bereich. Deshalb kommt in allen folgenden Messungen nur dieser Quarzglasstab zum Einsatz.

Es wurden zur Bestimmung der Intensitätsverteilung am Ausgang des Quarzglasstabes drei Meßreihen mit verschiedenen Aufbauten (siehe Abbildung 4.4.2) durchgeführt. In jeder der drei Meßreihen wird der Abstand zwischen den beiden Linsen (d) variiert:

- 1) Bikonkavlinse in Abstand d zur Bikonvexlinse, keine Streuscheibe, Abstand der Bikonvexlinse zum Quarzglasstab: $a = 6.5 \text{ mm}$.
- 2) Bikonkavlinse in Abstand d zur Bikonvexlinse, mit Streuscheibe in $s = 12 \text{ mm}$ Entfernung zum Quarzglasstab
- 3) Bikonkavlinse in Abstand d zur Bikonvexlinse, mit Streuscheibe in $s = 6.5 \text{ mm}$ Entfernung zum Quarzglasstab

⁶ Hersteller: Westdeutsche Quarzschmelze, Geesthacht

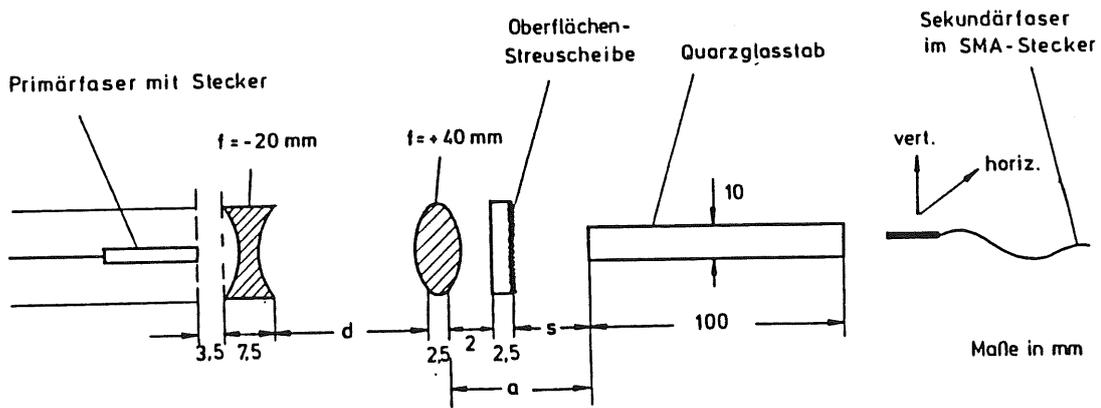


Abbildung 4.4.2: Aufbau der verteilerseitigen Optik

Zu jedem d wurde ein horizontaler *Scan* am Ausgang des Quarzglasstabes vorgenommen. Der Genauigkeit wegen wurden die Messungen unter Zuhilfenahme des Strahlteilungsverhältnisses durchgeführt, d.h. die am Verteiler gemessene Signalthöhe wurde durch die Signalthöhe des anderen Lichtweges dividiert.

Die Intensität im Maximum der Lichtverteilung ist in Abbildung 4.4.3 dargestellt. Man erkennt, daß im Aufbau ohne Streuscheibe die Intensität um ein Vielfaches größer ist als in den Aufbauten mit Streuscheibe. Mit zunehmendem Abstand der Linsen wird die Intensität kleiner, was mit einer homogener werdenden Ausleuchtung verbunden ist.

Intensität (rel. Einheiten)

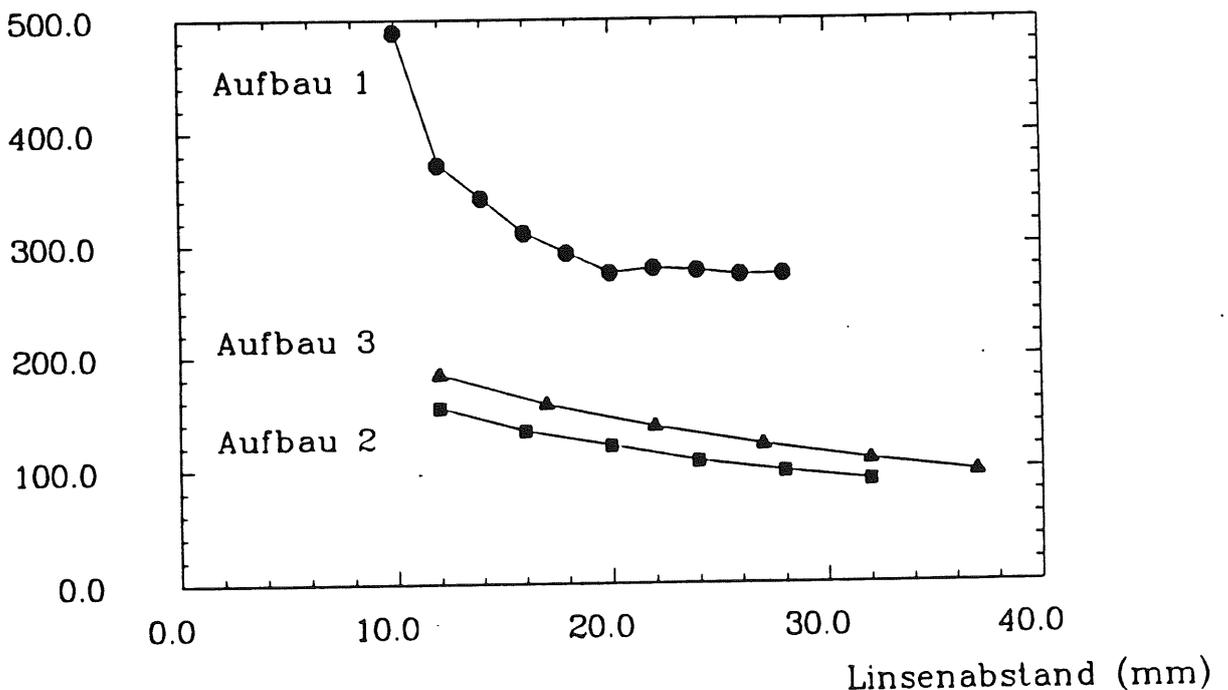


Abbildung 4.4.3: Maximale Intensität in Abhängigkeit des Linsenabstandes

Um Aufschluß über die Homogenität der Verteilungen zu bekommen, sind in Tabelle 4.5 die Breiten der Bereiche aufgelistet, in denen die Intensitäten mehr als 80%, 90% und 95% der maximalen Intensität sind.

Beim Aufbau ohne Streuscheibe gibt es zwar eine sehr viel höhere Intensität im Maximum; das geht dort allerdings zu Lasten der Homogenität. Die Verteilungen zeigen kein breites Plateau und haben außerdem noch eine Struktur, die zum einen vom Strahlengang und zum anderen von der strukturierten Primärfaser-Oberfläche herrührt. Ist d größer als 20 mm macht sich die Struktur deutlich bemerkbar (siehe Tabelle 4.5), sie ist aber auch schon für $d \leq 20$ mm vorhanden.

Die Aufbauten mit Streuscheibe haben angenehmere Eigenschaften: Die Intensitätsverteilungen haben ein deutliches Plateau von ausreichender Breite. Die Breite der Plateaus ist nahezu unabhängig von der Entfernung der Streuscheibe zum Quarzglasstab. Da aber die Intensität bei der nahen Position zum Quarzglasstab (Aufbau 3) höher ausfällt, ist diese Anordnung zu bevorzugen.

Aufbau Nr.	Linsenabstand (mm)	Intensität im Maximum (rel. Einheiten)	Breite des 80%-Bereiches (mm)	Breite des 90%-Bereiches (mm)	Breite des 95%-Bereiches (mm)
1	10	489	3.4	1.8	1.0
1	12	372	5.4	3.9	2.5
1	14	342	5.7	3.3	2.4
1	16	311	6.2	3.6	2.6
1	18	293	6.0	4.4	3.0
1	20	275	5.8	4.6	3.6
1	22	279	6.0	3.9	1.2
1	24	277	5.7	3.9	1.0
1	26	273	5.6	4.0	1.6
1	28	274	5.3	3.6	1.6
2	12	161	5.5	3.6	2.4
2	16	140	5.9	4.1	2.9
2	20	126	6.0	4.3	2.6
2	24	112	7.0	4.8	3.4
2	28	103	7.0	5.0	3.5
2	32	94	7.1	4.9	3.3
3	12	192	5.9	4.0	2.9
3	17	164	6.5	4.4	3.0
3	22	143	6.9	4.8	3.4
3	27	127	7.0	4.9	3.6
3	32	113	7.0	5.1	3.7
3	37	102	6.9	4.8	3.5

Tabelle 4.5: Breite der "Homogenitätsbereiche" am Verteilerausgang

Der Aufbau 3 (mit Streuscheibe) zeigt bei einem Abstand zwischen den Linsen von $d = 32$ mm das ausgeprägteste Plateau. Für diese Konstellation wurde die Intensitätsverteilung am Ende des Quarzglasstabes in horizontaler und vertikaler Richtung vermessen. Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 4.4.4 zweidimensional dargestellt, die Meßwerte sind in Tabelle 4.6 eingetragen.

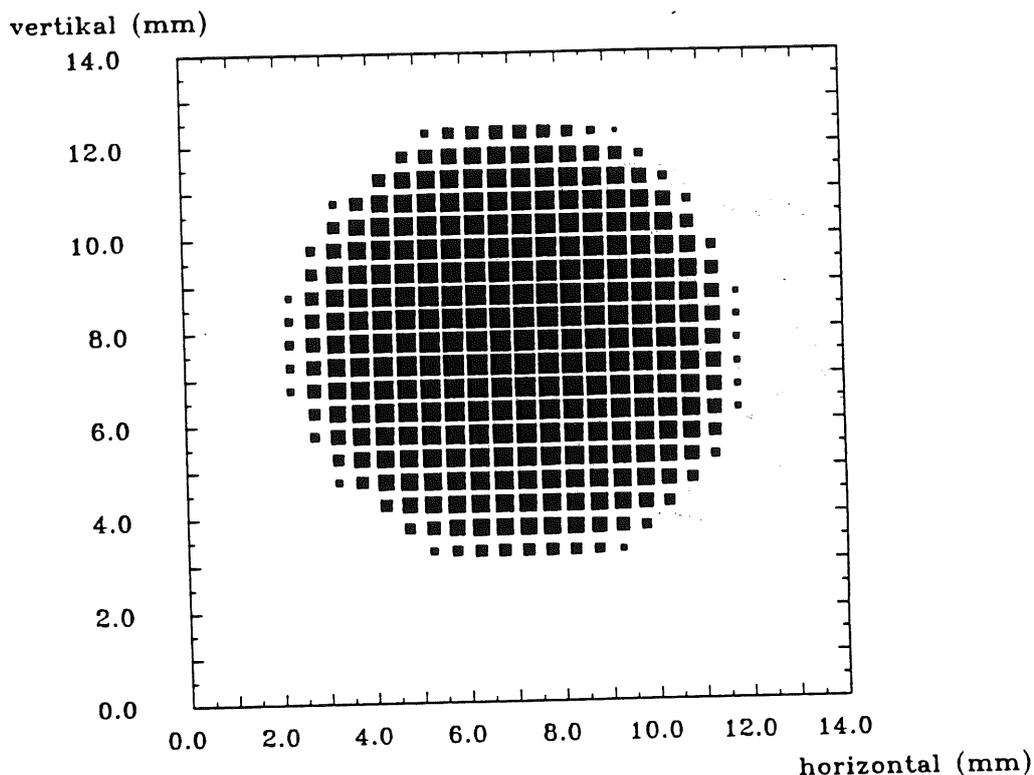


Abbildung 4.4.4: Intensitätsverteilung am Verteilerausgang (optimierter Verteileraufbau)

Vertikale (Skt.)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.	10.5	11.	11.5				
12.0						87	198	284	316	318	295	214	96											
11.5						226	354	448	524	561	567	554	507	422	319	105								
11.0						291	446	566	606	637	644	648	649	638	614	547	390	123						
10.5					83	293	496	591	635	661	683	693	698	689	669	644	563	381	115					
10.0					243	470	603	640	676	706	726	731	731	732	720	698	674	645	545	294				
9.5					138	366	547	629	670	714	739	749	752	756	752	735	706	665	625	455	134			
9.0					233	488	592	650	702	737	751	776	781	775	785	769	757	728	696	656	559	288		
8.5					62	295	541	614	667	718	748	772	784	764	799	798	779	756	734	702	664	603	354	42
8.0					103	347	554	622	674	719	752	785	793	800	798	801	784	765	743	706	667	616	388	57
7.5					118	363	552	620	668	716	751	757	785	794	793	775	762	754	730	703	661	608	392	57
7.0					104	344	539	612	659	706	734	768	773	779	778	786	763	729	722	679	645	601	384	56
6.5					72	296	518	597	646	689	722	737	756	751	760	749	758	722	704	666	639	587	365	52
6.0					219	469	570	621	661	692	708	734	727	729	727	719	706	675	642	605	558	335	51	
5.5					146	373	529	586	624	650	687	700	708	702	693	682	668	642	611	575	497	254		
5.0					216	441	542	581	617	638	652	670	671	661	644	631	611	574	525	367	111			
4.5					94	254	455	535	576	595	611	619	624	612	607	586	565	523	389	194				
4.0					249	420	513	543	557	564	568	563	549	538	500	367	194							
3.5					192	320	433	482	494	494	484	457	412	294	148									
3.0					91	174	226	249	254	246	193	152	57											

Tabelle 4.6: Intensitätsverteilung am Verteilerausgang (optimierter Verteileraufbau) (Intensität in rel. Einheiten, 1 Skt. entspricht 1 mm)

4.5 Die Sekundärfasern

Als Sekundärfasern werden im Endaufbau am BEMC HCS-Fasern des Typs HCR⁷ mit einem Kerndurchmesser von 200 μm eingesetzt. Für Vortests standen HCS-Fasern des Typs HCN zur Verfügung (Faserdaten im Anhang D). Diese HCN-Fasern haben denselben Aufbau (siehe Abbildung 4.5.1), dasselbe *Cladding* und somit auch dieselbe numerische Apertur wie die HCR-Fasern.

Der Unterschied zwischen den beiden Fasertypen liegt in der Dotierung des Quarzglas-kernes mit OH^- -Ionen und Chlor: In der HCR-Faser ist die OH^- -Konzentration klein (2 *ppm*) und die Chlorkonzentration hoch (7000 *ppm*), während sich bei der HCN-Faser die Konzentrationen auf mittlerem Niveau befinden (OH^- : 500 *ppm*, Cl: 1200 *ppm*).

Diese verschiedenen Dotierungen zeigen unterschiedliche Auswirkungen auf das Transmissionsverhalten und auf die Strahlenresistenz: HCR-Fasern haben günstigere Eigenschaften in Bezug auf Strahlenschäden und die Erholung davon [Sku 88]. Diese bessere Strahlenresistenz war von entscheidender Bedeutung für Auswahl und Einsatz der HCR-Faser.

Allerdings hat die HCR-Faser bei einer Wellenlänge von 337.1 *nm* eine kürzere Abschwächlänge. Sie liegt mit ca. 3 *m* deutlich unter der der HCN-Faser (5.7 *m*) [Dos 89]. Das ist aber beim Einsatz am BEMC von untergeordneter Bedeutung, da die HCR-Faser als Sekundärfaser nur 2.8 *m* lang ist und auf dieser Strecke der Verlust an Intensität noch erträglich ist.

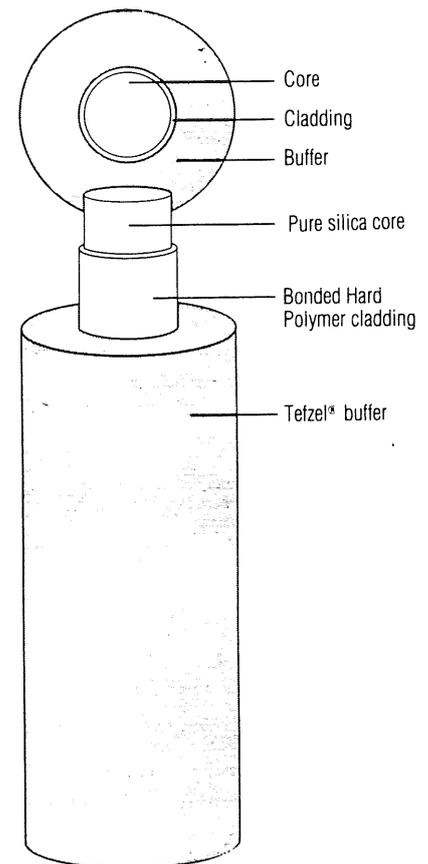


Abbildung 4.5.1: Aufbau einer HCS-Faser; aus [Ens 89]

4.5.1 Krümmungseigenschaften der Sekundärfasern

Für den Einsatz im Monitorsystem ist es wichtig, die Eigenschaften der Sekundärfasern zu kennen, die relevant für die Verlegung - bei Montage und Demontage - sind.

Die notwendigen Messungen wurden an den HCN-Fasern vorgenommen, die - abgesehen von der Transmission - wegen des identischen Aufbaus vergleichbare Krümmungseigenschaften haben.

⁷ Hard - Clad - Radiation - Resistant

Für die Messung dieser Eigenschaften wurde ein Aufbau gewählt, der in Abbildung 4.5.2 dargestellt ist. Dieser Aufbau hat den Vorteil, ohne große Umbauten den nötigen Längenausgleich vornehmen zu können. Für diese Messungen wurde die 4.9 m lange HCN-Faser ("SF1") $N + 1/2$ mal auf verschieden große Trommeln gewickelt ($N = 0 \dots 10$, je nach Radius der Windungen). Die Lage der zweiten Sekundärfaser ("SF2") blieb unverändert, so daß über eine Quotientenmessung SF1:SF2 die Transmission in Abhängigkeit des Verlegeradius und der Anzahl der Windungen bestimmt werden konnte.

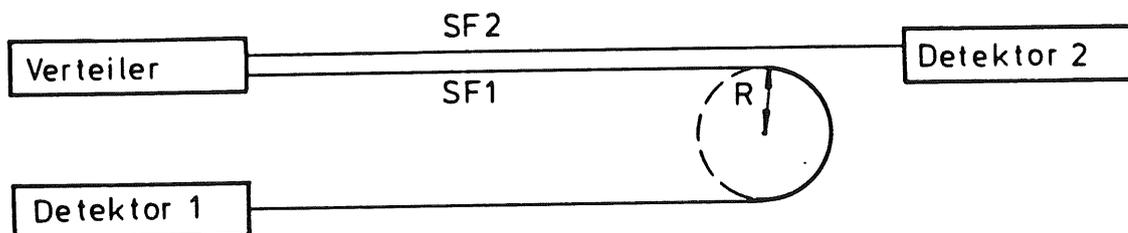


Abbildung 4.5.2: Aufbau zur Messung des Krümmungsverhaltens

Dabei stellt sich heraus, daß selbst große Verlegeradien die Transmission beeinflussen. Je kleiner der Radius, desto größer ist die Dämpfung. Außerdem zeigt sich, daß die durch Krümmungen verursachte Abschwächung linear mit der Anzahl der Windungen wächst - und nicht exponentiell, wie sich ja die Abschwächung mit zunehmender Faserlänge verhält.

Transmission (normiert)

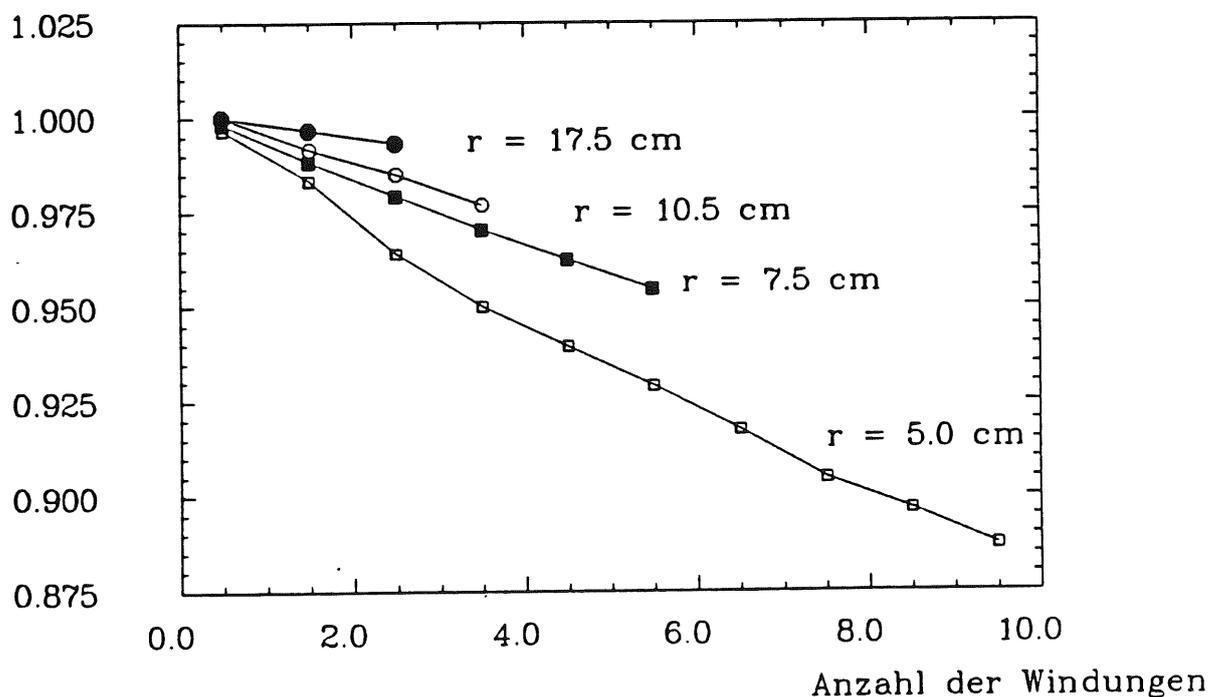


Abbildung 4.5.3: Krümmungsverhalten der Sekundärfasern

Um das Verhalten noch genauer kennenzulernen, wurde daraufhin nur eine Windung der Sekundärfaser bei unterschiedlichen Radien vermessen. Die Abnahme der Transmission mit kleiner werdendem Radius ist in Abbildung 4.5.4 dargestellt.

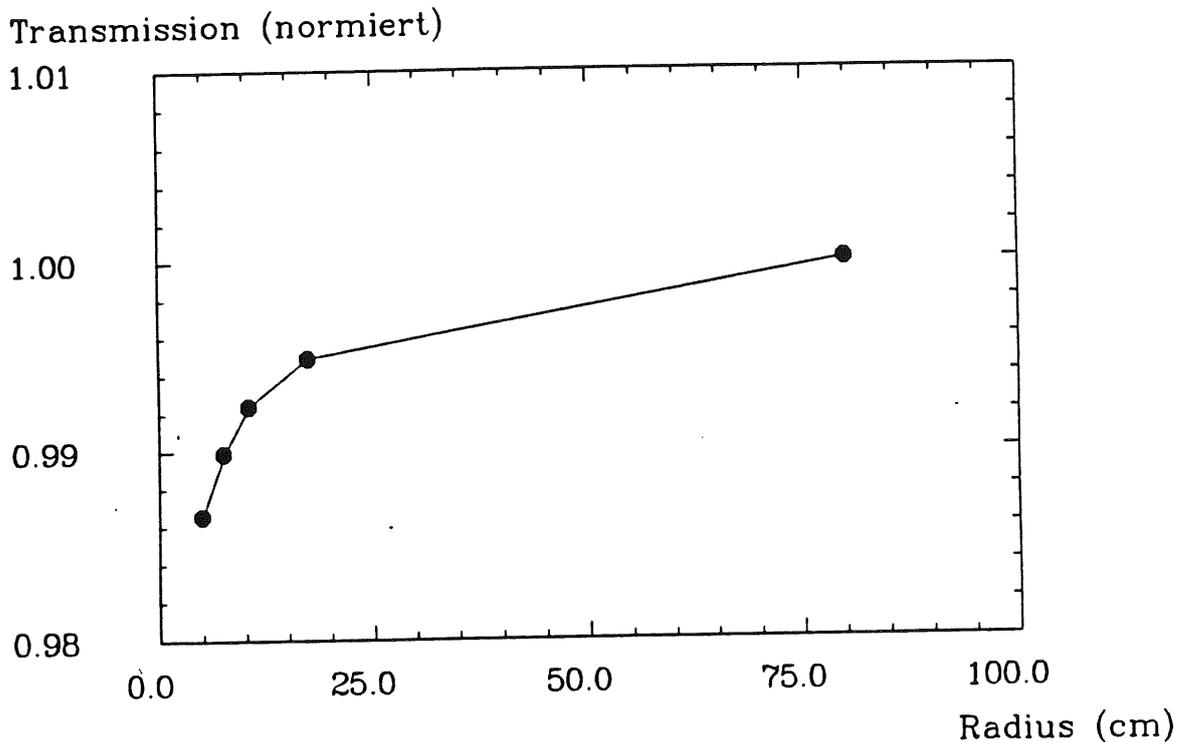


Abbildung 4.5.4: Transmission bei einer Windung

Die Krümmungseigenschaften können von Nutzen sein, wenn es darum geht, Transmissionsunterschiede zwischen Sekundärfasern eines Faserbündels auszugleichen.

Diese Eigenschaften bergen aber auch die Gefahr, daß die Eichinformation für ein Modul verlorengeht, wenn sich der Radius bei einer einzelnen Faser verändert, da dann die Signalhöhe nicht mehr im gleichen Verhältnis zu den Signalen aus anderen Fasern steht.

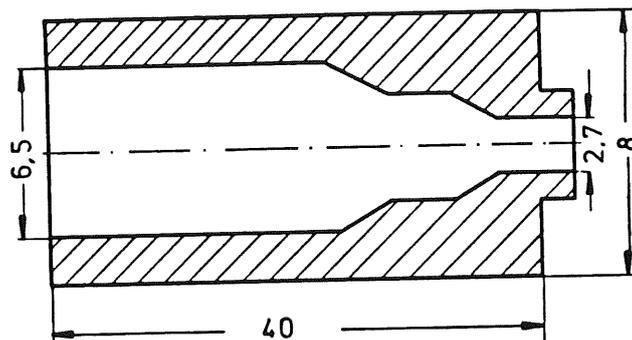
Eine Veränderung des Radius im eingebauten Zustand ist aber nicht zu erwarten, weil am BEMC die Fasern zunächst auf fest montierten Trommeln längenmäßig ausgeglichen werden und danach über den größten Teil des Weges zum Einkopplungsort fixiert verlegt werden sollen. Nur innerhalb der Elektronikgehäuse der Module sind die Fasern nicht fixiert; dort sorgt aber ein Schrumpfschlauch für die nötige Steifheit.

Im Fall einer Demontage und Wiederankopplung der Fasern sollte auf größte Sorgfalt geachtet werden, damit jede Faser wieder auf demselben Wege verlegt wird. Ist das nicht möglich, kann die alte Eichinformation nicht übernommen werden, und es muß eine Neukalibration des betroffenen Modules geschehen.

4.5.2 Aufbau eines Faserbündels

Für den Aufbau am BEMC wurden zwei Faserbündel aus HCS-Fasern des Types HCR mit einem Kerndurchmesser von $200 \mu\text{m}$ angefertigt. Sie bestehen aus jeweils 115 Fasern. Das gebündelte Ende wurde vom Hersteller⁸ bearbeitet: Die abisolierten Faserenden wurden in eine Metallhülse eingebracht. Das Ziel bei der Herstellung war, die optisch aktive Fläche so klein wie möglich zu gestalten, um so in dem sehr homogenen Bereich des Mischers ankoppeln zu können.

Da sich aber die nackten Faserenden als sehr brüchig erwiesen, wurde eine zweistufige Hülse konstruiert. Bei dieser Form der Hülse haben die äußeren Fasern, die die größte Spannung ertragen müssen, zwei Auflagepunkte.



Maße in [mm]

Abbildung 4.5.5: Hülse des Faserbündels (Skizze ist nicht maßstabsgerecht.)

Der vordere Teil der Hülse im Bereich der abisolierten Fasern wurde mit einem Epoxy-Kleber, der auf die optischen Eigenschaften der verwendeten Faser abgestimmt ist, geflutet. Nach dem Aushärten wurde der hintere Teil mit einem Kleber gefüllt, der für die mechanische Stabilität der Faser in der Hülse sorgt, aber auf die optischen Eigenschaften keinen Einfluß hat.

Für eine gute Politur ist es vorteilhaft, daß der Durchmesser der Metallhülse im vorderen Bereich so klein wie möglich ist, denn Metallspäne könnten Riefen und Kratzer bei der Politur in die Oberflächen der Quarzglasfasern bringen.

In Abbildung 4.5.6 ist die polierte Oberflächen eines Faserbündels zu sehen. Der Durchmesser der optisch aktiven Fläche ist 2.7 mm .

Die zwei rot beleuchteten Fasern aus dem Zentrum der Fläche sind vom Hersteller mit SMA-Stecker versehen worden und dienen für die Rückleitung des Monitor-signal zum Referenzsystem. Alle übrigen Fasern sind an ihrem anderen Ende unbearbeitet gelassen worden.

Die Konfektionierung dieser Faserenden wurde vor Ort in eigener Regie vorgenommen: Zur Vorbereitung wurde jeder Faser ein Schrumpfschlauch und eine 30 mm lange Metallhülse ("Ferrüle" aus V4A-Stahl⁹, Innendurchmesser 0.59 mm ,

⁸ Feinmechanik - Glasfaseroptik Manske, Wetzlar

⁹ Bezogen über Firma Weingärtner, Hamburg

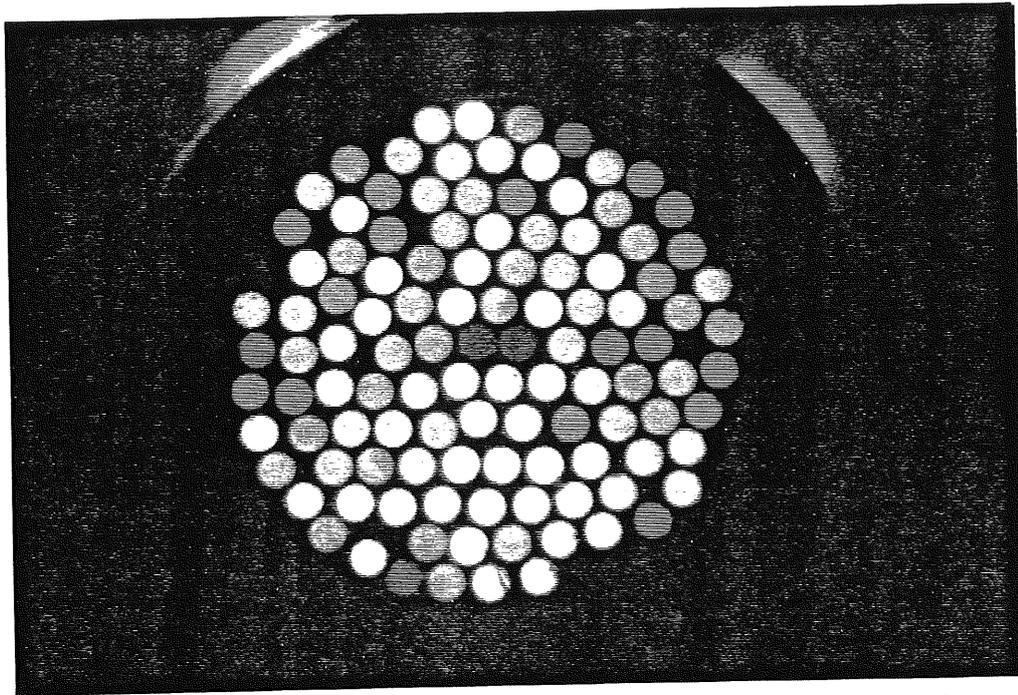


Abbildung 4.5.6: Optisch aktive Fläche eines Faserbündels in 25-facher Vergrößerung. Die Fasern wurden von hinten beleuchtet; Unterschiede in der Helligkeit sind nur auf die ungleichmäßige Beleuchtung zurückzuführen. Am unteren Rand sind Risse in einigen Faseroberflächen zu erkennen. Die beiden rotbeleuchteten Fasern sind mit SMA-Steckern versehen worden und dienen als Referenzfasern.

Außendurchmesser 1.59 mm) übergeschoben, so daß etwa 50 mm der Faser am freien Ende herausschaute. Danach wurde an diesem Ende der Buffer über eine Länge von 30 mm mit einer Abisolierzange¹⁰ abgezogen.

Zum Schneiden der Faser wurde ein Gerät¹¹ eingesetzt, das mit einem Diamanten zuerst die Faser anritzt und dann durch axialen Zug auf die Faser die Bruchstelle aufreißt. Solch ein Bruch hat - wenn sich die Bruchstelle schneller als die Schallgeschwindigkeit fortpflanzt [Ulr 90] - eine gute Oberfläche, die dann nicht mehr poliert werden muß.

Die Ferrüle wird nun von hinten über das Ende der Faser geschoben - bis die Oberfläche der Faser geschützt direkt hinter der Öffnung der Hülse liegt - und dann an zwei Stellen festgecrimpt¹². Die Crimptiefe (5 Skt.) ist so gewählt, daß die Transmission der Faser nicht wesentlich gestört wird (siehe Abbildung 4.5.7), die Ferrüle aber unverrückbar fest auf der Faser sitzt.

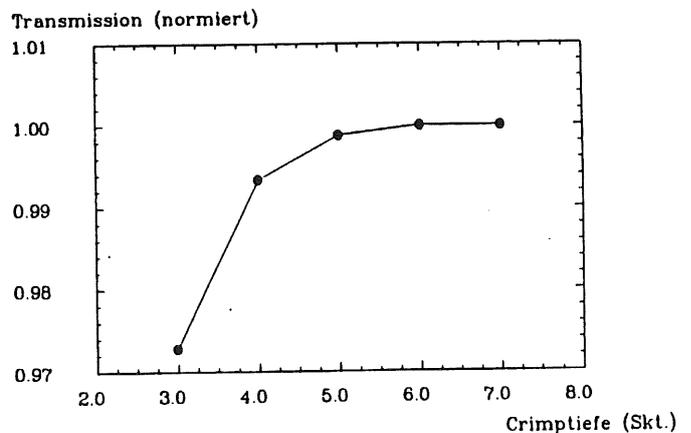


Abbildung 4.5.7: Einfluß der Crimptiefe auf die Transmission

¹⁰ Abisolierzange "Micro Strip", bezogen über Laser-Components, Gröbenzell

¹¹ Faserschneider: Biccotest, Optical Fiber Cutting Tool, T 402

¹² Crimpzange: DMC, Typ AMF 8

Danach wird der Schrumpfschlauch auf die Faser geschrumpft, so daß sie durch diesen Schlauch eine gewisse Steifheit erlangt und bei der Montage an die Module vor Brüchen geschützt ist. Zwei verschiedene Farben der Schläuche (rot und blau) sorgen für eine Unterscheidbarkeit der beiden Faserbündel und damit der Signalwege. Um die Fasern vor Verschmutzung und Verstaubung zu schützen, wurden abnehmbare Kappen über die Ferrülen gesteckt.

Abschließend werden die Ferrülen in einen Messingstecker (siehe auch Anhang C, Abbildungen C5 und C6) eingeklebt, der in die an den Modulen eingebrachten Bohrungen in der Abschlußplatte paßt. Die Länge vom Auflagepunkt des Steckers (Messingklötzchen) bis zur Oberfläche der Faser ist so abgestimmt, daß ein 1 mm langer Zwischenraum zur Szintillatorplatte bleibt. Auf der Oberseite des Messingklötzchens ist eine Nut eingbracht, in die von oben eine Feder zur Befestigung greift. Mit diesem Stecker ist eine reproduzierbare Ankopplung der Fasern möglich, da durch ihn sowohl der Abstand zur Szintillatorplatte als auch der Winkel definiert ist.

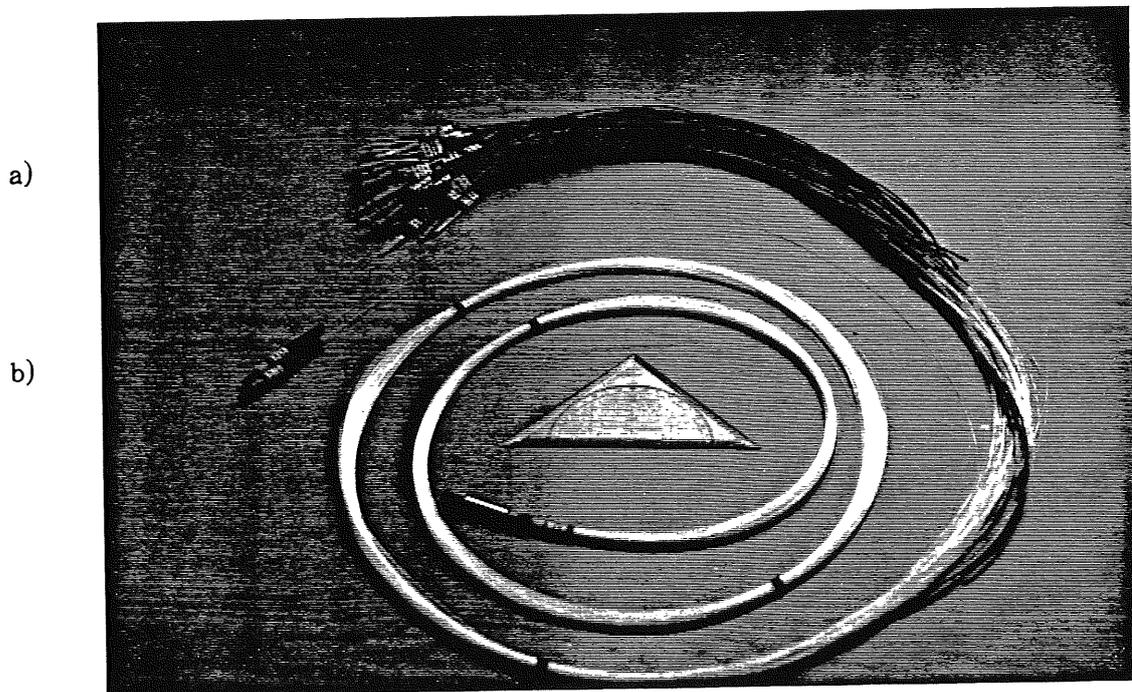


Abbildung 4.5.8: Ein konfektioniertes Faserbündel
 a) nummerierte Fasern, in Ferrülen eingekrimpt
 b) Referenzfasern, mit SMA-Steckern

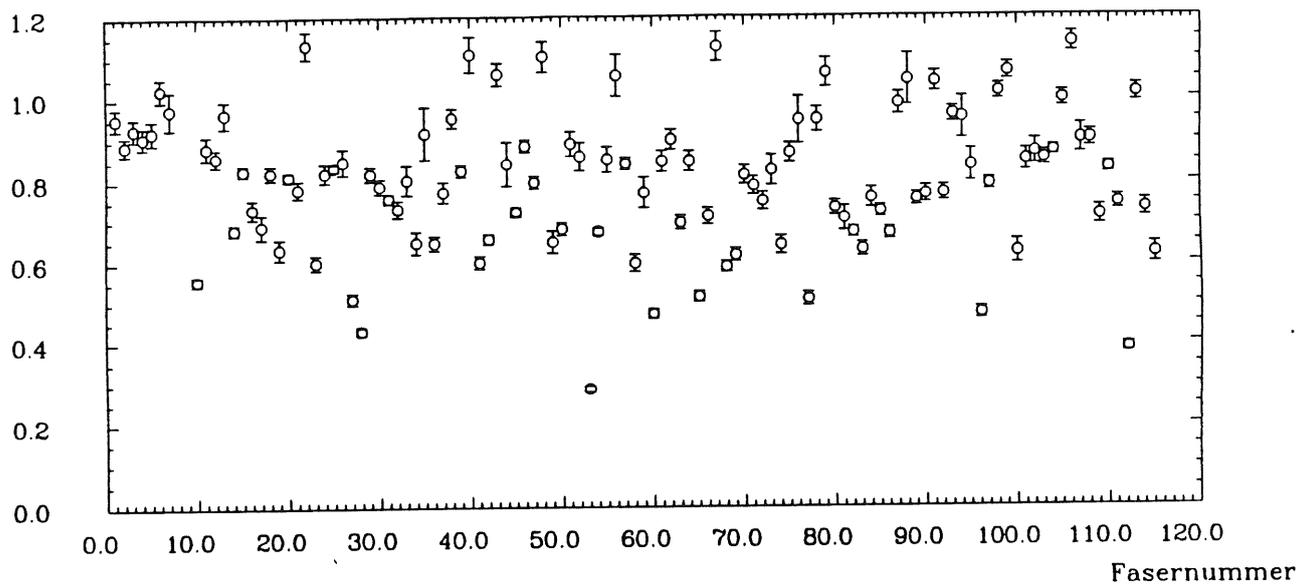
4.5.3 Testmessungen mit einem Faserbündel

Die Messung der Transmission der einzelnen Fasern wurde exemplarisch am blauen Faserbündel durchgeführt. Dazu wurde das Faserbündel am Ausgang des Verteilers montiert. Mit einer Verschiebeeinheit wurde das Faserbündel in vertikaler und horizontaler Richtung so justiert, daß sich die mittlere Faser (Referenzfaser B1) im Maximum der Intensitätsverteilung befindet. Mit dem Wissen, daß die Intensitäten an zwei beliebigen Orten des Verteilerausgangs ein konstantes Verhältnis aufweisen, konnten nun die Fasern nach der Quotientenmethode durchgemessen werden:

Nacheinander wurden alle Fasern an einen Detektor gekoppelt und der Quotient der Signalhöhe zu der aus der Referenzfaser gebildet. Dieser Quotient hat (siehe Abbildung 3.2.6) eine FWHM von weniger als 1% und eine gesamte Breite von 2%.

Da der Ferrüle (und damit der Faser) vor dem Einkleben in die Messingstecker noch keine Orientierung gegeben war, wurde sie am Detektor einmal um die eigene Achse gedreht. Dabei wanderte die Signalhöhe - und damit der Quotient - über einen mehr oder minder großen Bereich. In der Abbildung 4.5.9 a ist dieser Bereich mit Fehlerbalken angedeutet; das Symbol markiert den Mittelwert von maximaler und minimaler Signalhöhe.

Transmission (normiert auf Referenzfaser 1)



Schwankung der Signalhöhe (%)

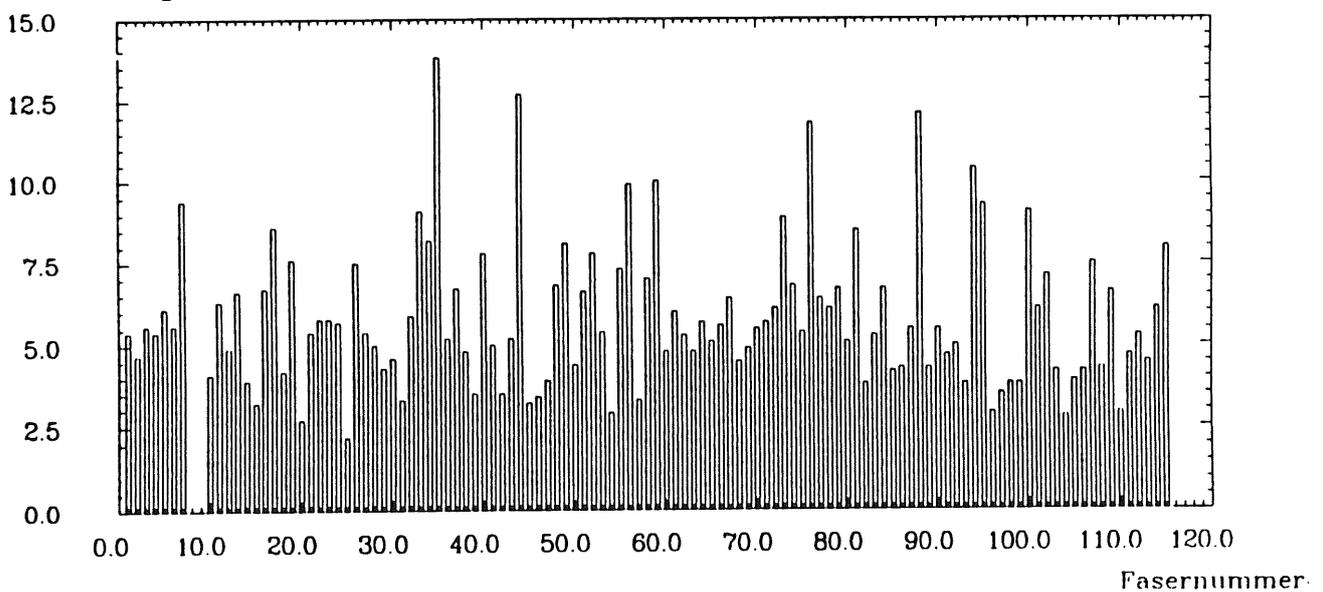


Abbildung 4.5.9 a: (oben) Transmission der Fasern des "blauen" Faserbündels
4.5.9 b: (unten) Signalhöhensbereich in Prozent der mittleren Signalhöhe

Daß es diesen Signalhöhensbereich gibt, hat geometrische Gründe: Bei einer idealen Oberfläche würde das aus der Faser austretende Licht genau mittig und orthogonal auf die 33 mm entfernte Szintillatorplatte treffen. Eine Rotation der Faser würde die Signalhöhe nicht beeinflussen (z.B. Faser 25). Ist die Oberfläche aber nicht ideal wie in Abbildung 4.5.10 angedeutet, trifft das Licht nicht mittig auf die Szintillatorplatte, sondern der Einstrahlungsort wandert mit dem Drehwinkel. Da der Prozeß der Szintillation isotrop geschieht (r^{-2} -Gesetz) wird nun je nach Entfernung des Einstrahlungsortes zum WLS mehr oder weniger Licht in den WLS eingekoppelt.

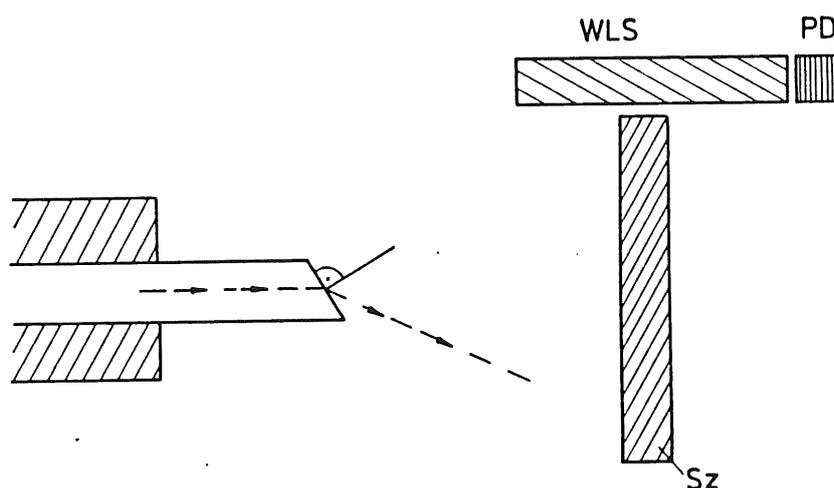


Abbildung 4.5.10: Abstrahlcharakteristik einer schlecht konfektionierten Faser

Um diese These zu verifizieren, wurden stichprobenhaft zwei Fasern an einem umgebauten Detektor vermessen: Dort war die Szintillatorplatte nur 6 mm von der Faseroberfläche angebracht. Die Signalhöhe veränderte sich wesentlich weniger bei Rotation und kommt dem Grenzwert der vollen Breite des Quotienten - den 2% - schon sehr nahe.

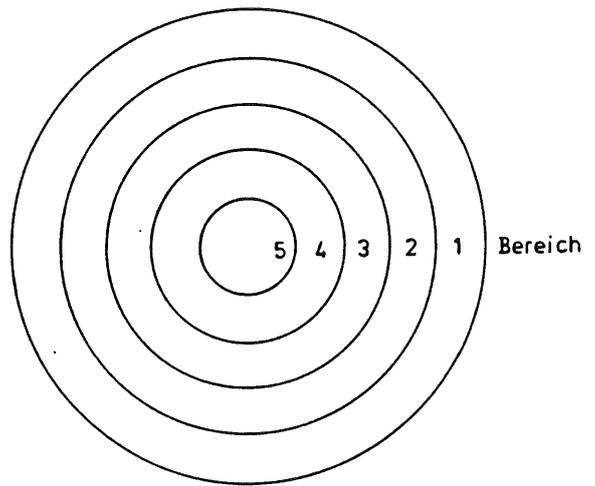
Nummer der Faser	Quotientenbereich bei Rotation um 2π	
	Detektor 2: 33 mm Abstand	Detektor 1: 6 mm Abstand
76	13.0 %	4.0 %
42	4.5 %	2.4 %

Tabelle 4.7: Einfluß des Abstandes zwischen Faseroberfläche und Szintillatorplatte

Da im Modul bei der Einkopplung der Fasern nur ein Abstand von 1 mm zur Szintillatorplatte vorgesehen ist, werden Rotationsabhängigkeiten beim ohnehin fixierten Stecker nicht zu erwarten sein.

In Abbildung 4.5.9 sind erhebliche Unterschiede der Transmissionen zu erkennen, die deutlich größer ausfielen, als es die Intensitätsverteilung am Mischerausgang erwarten ließ.

Um eine Erklärung für diese unerwartet große Streuung zu finden, wurde die Position jeder Faser auf der polierten Faserbündeloberfläche bestimmt. Dafür wurde eine Einteilung dieser Fläche in fünf Bereiche - wie in Abbildung 4.5.11 angedeutet - vorgenommen.



Diese Zuordnung erwies sich als Schlüssel zur Erklärung der unterschiedlichen Transmissionen. In den Abbildungen 4.5.12 a - e erkennt man, daß jeweils die Fasern eines Bereiches sehr ähnliche Transmissionseigenschaften haben.

Abbildung 4.5.11: Bereiche der Oberfläche ($\Delta r \approx 0.27 \text{ mm}$)

Die jeweiligen Mittelwerte und Standardabweichungen sind in Tabelle 4.7 eingetragen. Als Kriterium für eine gute - nicht defekte - Faser wurde angenommen, daß deren mittlere Signalthöhe um nicht mehr als 2σ vom Mittelwert abweicht. Für die verbleibenden Fasern wurden erneut Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet. Sie sollen als Grundlage für die folgende Diskussion dienen.

Bereich	Anzahl der Fasern	Durchschnittliche Transmission (norm.)	Standardabweichung	Anzahl der guten Fasern	Durchschnittliche Transmission (norm.)	Standardabweichung
1	40	0.650	0.123 18.9%	38	0.667	0.102 15.3%
2	36	0.787	0.086 10.8%	35	0.797	0.063 7.93%
3	20	0.908	0.038 4.20%	20	0.908	0.038 4.20%
4	10	1.031	0.028 2.69%	10	1.031	0.028 2.69%
5	7	1.086	0.060 5.50%	6	1.108	0.031 2.80%

Tabelle 4.8: Das "blaue" Faserbündel im Überblick

Je weiter eine Faser am Rand liegt, desto schlechter ist die Transmission. Die Durchschnittstransmission von Fasern aus Bereich 1 ist nur 60% der Fasern aus dem Innenbereich (Bereich 5). Die Streuung nimmt nach außen hin zu.

Um von vornherein den Einfluß des Verteilers einschätzen zu können, wurde das Faserbündel mit einer Verschiebeeinheit so positioniert, daß sich eine durchschnittliche Faser des Randbereiches genau im Intensitätsmaximum der Verteilung am Mischer befindet. Dabei erhöhte sich die Transmission dieser Faser nur sehr geringfügig um knapp 2%. Das bedeutet, daß der Verteiler keinen wesentlichen Einfluß auf die transmittierte Signalthöhe hat.

Die Erklärung für die schlechtere Transmission der Fasern im Randbereich ist also eindeutig bei Konstruktion und Aufbau der Faserbündelung zu suchen. Drei Aspekte können dabei eine Rolle spielen:

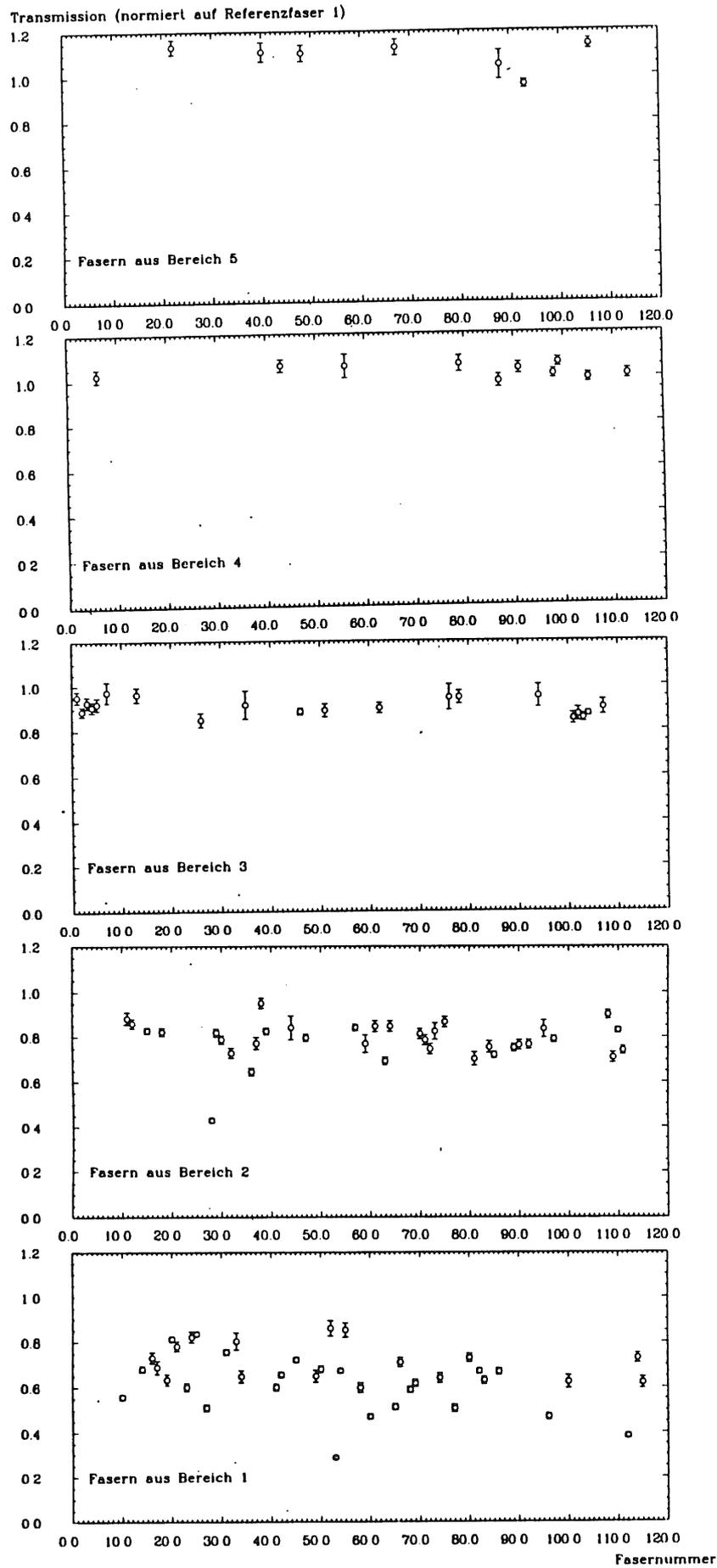


Abbildung 4.5.12 a - e: Transmissionen der Fasern des "blauen" Faserbündels, sortiert nach den Bereichen auf der Oberfläche

a) Einkopplungsverluste:

Eine HCS-Faser hat im UV-Bereich einen Grenzwinkel α_{\max} von ca. 10 Grad (siehe dazu Tabelle D1 aus Anhang D). Läuft die Faserachse an der polierten Oberfläche nicht parallel zur optischen Achse (Faserachse einer Faser in zentraler Position), so sind Einbußen bei der Einkopplung des Lichtes zu erwarten, insbesondere dann, wenn der Winkel in der Größenordnung des Grenzwinkels der Faser ist. Eine Abschätzung des Winkels α unter Beachtung der in Abbildung 4.5.5 skizzierten Geometrie der Hülse des Faserbündels ergab ca. 4 Grad für eine Faser des Randbereiches. Der Winkel α wird mit zunehmendem Abstand vom Zentrum größer, so daß auch der Einfluß auf die Transmission der Faser zunimmt. Das könnte den Trend zur niedrigeren Transmission der Fasern des Randbereiches erklären.

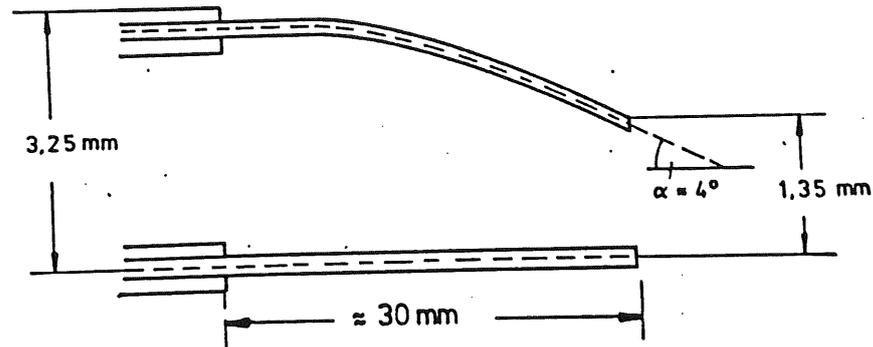


Abbildung 4.5.13: Fasern des Randbereiches in nicht optimaler Position

b) Krümmungsverluste:

Ist die Faser im Randbereich optimal verlegt, muß das eingestrahlte Licht einen s-förmigen Weg zurücklegen. Nach einer Abschätzung ist aber der Krümmungsradius mit ca. 120 mm zu groß und die gekrümmte Strecke zu kurz, um die Größe des Effektes im Randbereich erklären zu können.

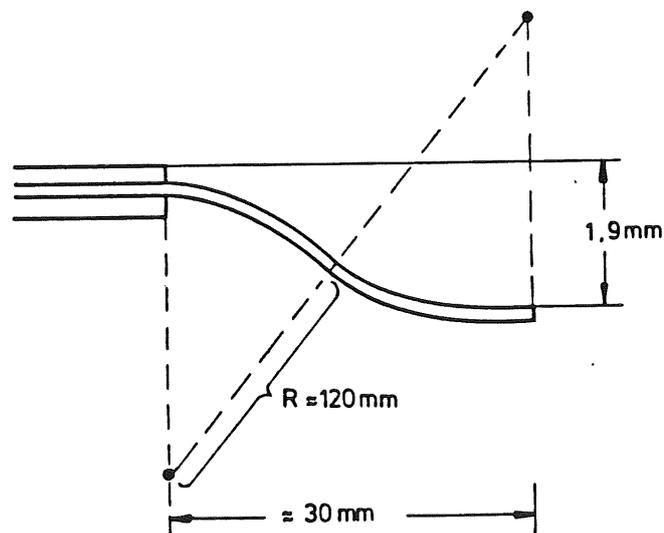


Abbildung 4.5.14: Fasern des Randbereiches, optimal verlegt

c) Beschädigungen:

Sie treten bevorzugt im Randbereich auf, da einmal Metallspäne bei der Politur eher im Randbereich Schaden anrichten und zum anderen der Quarzglaskern bei der Engführung in der Metallhülse leicht Kratzer erleiden kann. Gerade diese unkontrollierbaren Beschädigungen (siehe dazu auch Abbildung 4.5.6) können der Grund für die zum Randbereich größer werdenden Streuungen der Transmissionen sein.

Die Oberflächenbeschaffenheiten an den Enden der einzelnen Fasern werden die Transmissionseigenschaften nur unwesentlich beeinflussen, da die Auskopplung aus einer Faser unkritisch ist. Diese Beschaffenheiten sind außerdem statistisch über alle Fasern verteilt; eine Korrelation zwischen fehlerhaft oder schlecht konfektionierten Fasern und der Position dieser Fasern in der Hülse ist auszuschließen.

Mit Kenntnis der Transmission einer Faser lassen sich die Unterschiede bei der Verlegung und Zuordnung ausgleichen. Da alle Fasern gleich lang sind (2800 mm), muß ein Längenausgleich sowieso vorgenommen werden. Fasern mit geringer Transmission sollten über lange, gerade Strecken verlegt werden, weil dann die Signale nur wenig abgeschwächt werden. Fasern mit großer Transmission sollten zur Versorgung der näheren Module eingesetzt werden, da beim Längenausgleich durch Aufwickeln eine entsprechend große Abschwächung verursacht wird.

Außerdem werden die verschiedenen Modulkonfigurationen unterschiedlich große Intensitäten benötigen, so daß auch über die Zuordnung ein Ausgleich geschaffen werden könnte. Das Ziel dieses Ausgleiches sollte sein, jedem Modul ein Signal einzuspeisen, das von allen Modulen als gleich großes Energiesignal ausgelesen wird.

Daß mit diesen Methoden ein Transmissionsunterschied von 40% aber vollständig ausgeglichen werden kann, um beispielsweise die Transmission der Fasern aus Bereich 5 denen der Fasern aus dem Bereich 1 anzugleichen, ist wohl nicht realistisch. Die Länge der Fasern ist mit 2800 mm relativ kurz, so daß die erforderlichen Verlegungsradien wesentlich kleiner als 50 mm sein müssten. Das wiederum verlangt allergrößte Sorgfalt bei der diffizilen Verlegung und birgt die Gefahr von Langzeiteffekten (siehe Abschnitt 5.3). Ein Abgleich der Sekundärfasern für alle 88 Module des BEMC ist so mit Problemen behaftet, daß es sinnvoll erscheint, unter gewissen Zugeständnissen bei der Geometrie der Hülse des Faserbündels (Verlängerung der Hülse, Vergrößerung der optisch aktiven Fläche) eine Neuherstellung des Faserbündels vorzunehmen. Dabei sollte unbedingt auf die in Punkt a. angesprochene Parallelität der Fasern im Politurbereich geachtet werden.

4.6 Die Referenzfasern

Um kurz-, mittel- und langfristige Schwankungen der Monitorsignale zu erkennen, sind Referenzsysteme nötig. Sie sind an zwei verschiedenen Orten aufgebaut: Das Hauptreferenzsystem befindet sich außerhalb des H1-Detektors, das Nebenreferenzsystem direkt am BEMC. Da die Lichtverteilung am Ausgang des Mischers als konstant angenommen werden kann (siehe dazu auch Kapitel 5), werden die Signale für die Referenzsysteme vom Verteiler mit einigen Fasern abgezweigt.

4.6.1 Die Konfektionierung der Referenzfasern

Jeweils zwei Fasern eines Faserbündels sind mit SMA-Steckern versehen worden. Sie werden über einen Adapter an HCR-Fasern mit einem Kerndurchmesser von $600 \mu\text{m}$ gekoppelt, die das Monitor-signal wieder über 17 m nach außen zum Hauptreferenzsystem transportieren. Dazu müssen auch diese Quarzglasfasern mit SMA-Steckern¹³ versehen werden.

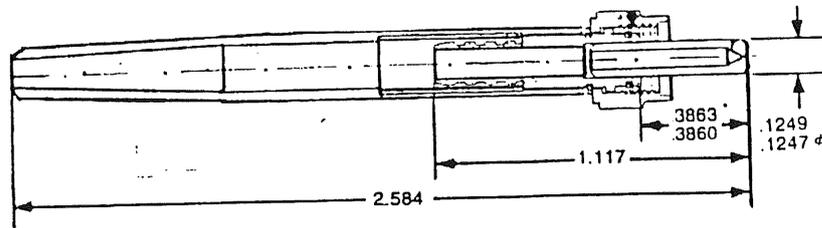


Abbildung 4.6.1: Ein SMA-Stecker vom Typ 905 (Maße in *inch*); aus [Oft 87]

Solch eine Konfektionierung wurde probeweise vorgenommen. Dazu wurde zunächst der *Buffer* der Referenzfaser über eine Strecke von 30 mm entfernt. Anschließend wurde das nun freiliegende *Cladding* der Faser und auch das letzte Ende des *Buffers* mit einem Epoxy-Kleber¹⁴ benetzt und in den SMA-Stecker eingeführt. Ein Heißluftföhn sorgte für ein rasches Aushärten des Klebers.

Mit einem Saphir-Schneider wurde die Faser in der Nähe der zu polierenden Stelle angeritzt, so daß das überstehende Faserende abgebrochen werden konnte. Der Stecker wurde dann in einen Halter, der bei der Politur für eine orthogonale Ausrichtung der Faseroberfläche sorgte, eingeschraubt. Mit 1000er Schmirgelpapier wurde eine erste, grobe Politur durchgeführt. Es folgten dann noch drei feinere Polituren auf nassem Papier mit $9 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$ und $0.3 \mu\text{m}$ Körnung. Das Ergebnis dieser Politur ist in Abbildung 4.6.2 zu sehen.

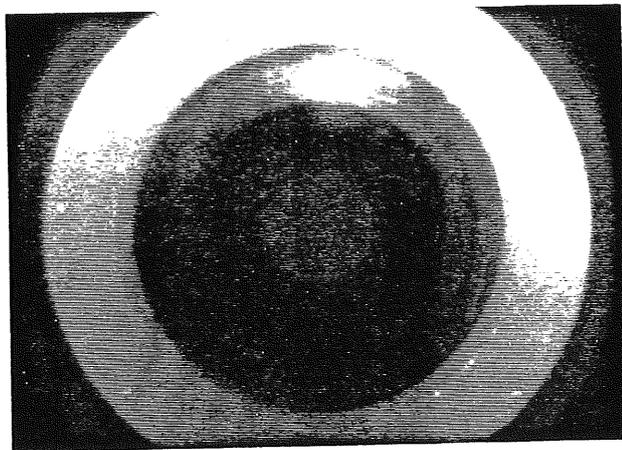


Abbildung 4.6.2: Polierte Oberfläche im SMA-Stecker
(Quarzglasfaser mit $600 \mu\text{m}$ Kerndurchmesser)

¹³ Hersteller: OFTI; bezogen über Polytec, Waldbronn

¹⁴ EPO - TEK 353 ND; bezogen über Polytec, Waldbronn

4.6.2 Die Faser-Faser-Kopplung

Eine Faser-Faser-Kopplung ist - was die Reproduzierbarkeit bei der auftretenden Dämpfung angeht - eine diffizile Angelegenheit, auch bei der hier untersuchten Kopplung von einer dünneren Fasern mit einem Kerndurchmesser von $200\ \mu\text{m}$ auf eine dickere Faser mit einem Kerndurchmesser von $600\ \mu\text{m}$.

Es kommt sowohl auf den Winkel als auch auf den Abstand zwischen den beiden SMA-Steckern an. Deshalb sollten die Stecker beim Aufbau am BEMC eine Markierung bekommen, um eine winkeltreue Ankopplung zu ermöglichen; außerdem sollten die Überwurfmutter mit bekanntem Drehmoment in den Adapter geschraubt werden. Nur unter diesen Bedingungen ist der Kopplungstest erfolgreich gewesen. Die Standardabweichung bei den 50 Kopplungen betrug unter diesen Voraussetzungen 0.4%.

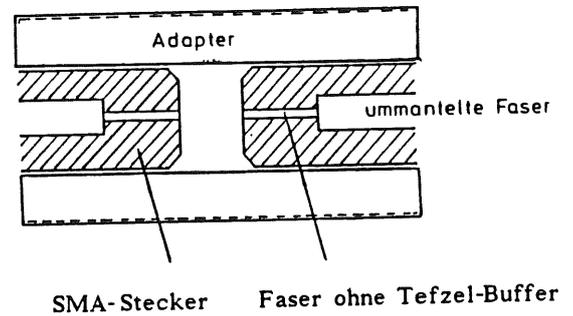


Abbildung 4.6.3: Prinzip einer Faser-Faser-Kopplung

Anzahl der Kopplungen

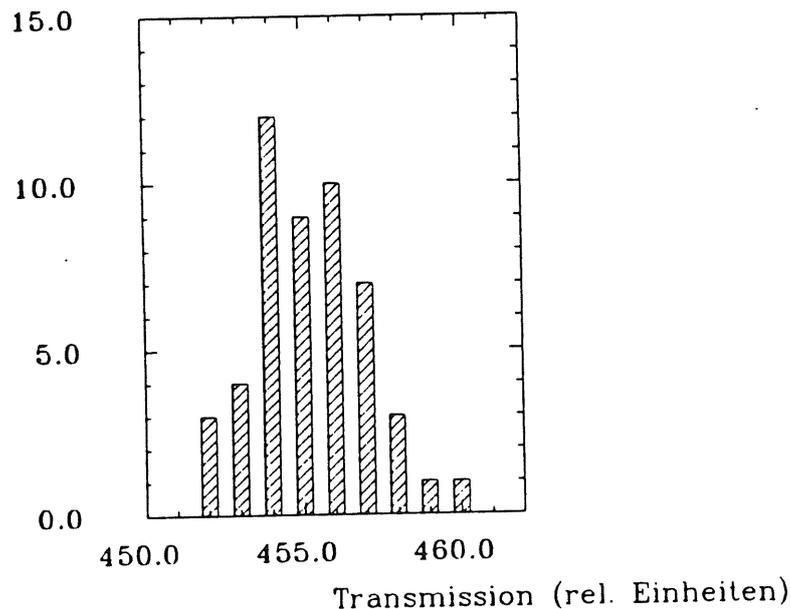


Abbildung 4.6.4: Statistik bei dem Test der Faser-Faser-Kopplung
Kopplung einer Faser mit $200\ \mu\text{m}$ Kerndurchmesser an eine Faser mit $600\ \mu\text{m}$ Kerndurchmesser

Die Kopplung der konfektionierten Referenzfasern an die "Detektoren" der Referenzsysteme ist unproblematisch, wenn dafür gesorgt wird, daß der Abstand zum Szintillator klein gehalten wird und so wegen des nahezu isotropen Szintillationslichtes die Abstrahlcharakteristik der Faser vernachlässigt werden kann.

4.6.3 Ankopplungstest der Referenzfaser an einen Referenzphotomultiplier

In einem frühen Versuchsstadium wurde, um erste Erfahrungen mit der Anpassung der Lasermonitorsignale an einen Referenz-Photomultiplier zu sammeln, eine provisorische Ankopplung einer Referenzfaser über einen CsJ-Kristall vorgenommen. Hier soll nur ein kleiner Einblick in die Problematik gegeben werden. Die ausführliche Diskussion über Anpassung, Auswertung und Stabilität ist bei [Gri 90] zu finden.

Das Signalhöhenspektrum des Lasers und das Signal einer γ -Quelle (^{22}Na mit $E_\gamma = 1275 \text{ keV}$) - deponiert in einem CsJ-Kristall - wurden von einem Photomultiplier ausgelesen. Trotz einer, in dem frühen Versuchsstadium noch provisorischen Sekundärfaser-Referenzfaser-Kopplung, bei der unkalkulierbare Verluste auftraten, mußte die Laserintensität mit einem Filter der optischen Dichte 2.13 abgeschwächt werden.

Der Photopeak im CsJ-Kristall hatte eine FWHM von 8.2%, das Signalhöhenspektrum des Lasers eine FWHM von 9.6%. Eine anschließende Messung ohne Benutzung von Filtern mit einem Detektor unter Verwendung von Photodioden (siehe Abbildung 4.0.2) ergab - aufgrund der besseren Auflösung bei großen Signalen - eine Breite des Lasersignalhöhenspektrums von nur 5.0%.

Für Aufbau und Betrieb des Gesamtsystemes ergeben sich damit folgende Konsequenzen:

- Damit die Lasermonitorsignale in der gleichen Größenordnung wie der Photopeak sind (beim Aufbau mit Photomultipliern), muß eine gezielte Abschwächung der Lasermonitorsignale vor Einkopplung in den CsJ-Kristall vorgenommen werden.
- Die während eines Monitorlaufes nötige Quotientenbildung (siehe Abschnitt 2.2) sollte über die Signale von Photodioden erfolgen, ohne daß eine Abschwächung der Lasermonitorsignale durch Filter vorgenommen wird.
- Durch den Vergleich der aufgezeichneten Spektren von Photomultipliern und Photodioden kann dann die Absoluteichung vorgenommen werden.

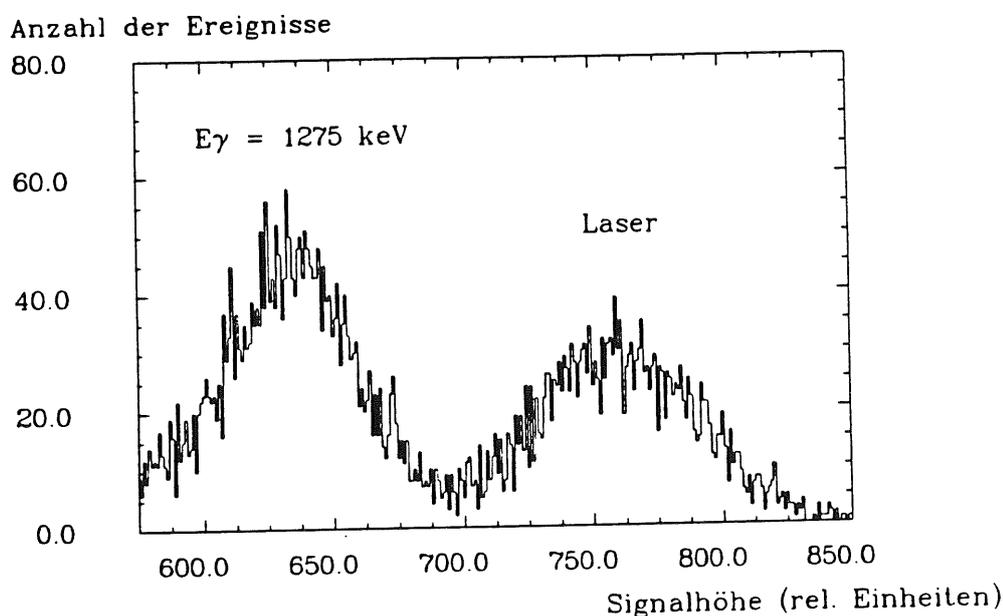


Abbildung 4.6.5: Signalhöhenspektrum eines Photomultipliers unter Verwendung eines CsJ-Kristalls

Kapitel 5

Stabilitätsverhalten

Für den Einsatz des Lasermonitorsystemes am BEMC ist es von herausragender Bedeutung, ob das System auch über lange Zeit Stabilität zeigt. Im Rahmen dieser Arbeit sind die Untersuchungen im Hinblick auf die Stabilität der Verteilung der Monitorsignale durchgeführt worden, denn nur wenn der Lichtverteilungsmechanismus als stabil angenommen werden kann, ist ein Einsatz des Systemes zur Interkalibration und Absoluteichung sinnvoll.

Alle Untersuchungen, die die Stabilität der Referenzsysteme betreffen, werden bei [Gri 90] zu finden sein.

Bei den im folgenden dargestellten Tests wurden die Messungen jeweils nach der Quotientenmethode vorgenommen: Die Signale zweier am Verteiler angekoppelter Sekundärfasern wurden dividiert. Um den Einfluß eines Offsets der ADCs vernachlässigen zu können, erfolgte die Messung immer bei maximaler Intensität, also am oberen Ende des Meßbereiches, denn im Fall großer Signale hat ein kleiner Offset bei Schwankungen der Elektronik keinen wesentlichen Einfluß auf das Ergebnis der an die Signalerfassung anschließenden Kalkulation.

5.1 Kurzzeitstabilität

Um die Stabilität zu überprüfen, wurden Testläufe mit unterschiedlicher Zeitdauer aufgenommen.

In einem Kurzzeitstabilitätstest wurde der Laser über eine Dauer von 90 Minuten nicht abgeschaltet. Er lief mit einer Frequenz von 10 Hz. Jeweils nach 50 Sekunden - also nach 500 Monitorsignalen - wurde der Quotient abgelesen und eine neue Messung gestartet.

In Abbildung 5.1.1 sieht man, daß der Quotient zwar kleine statistische Schwankungen aufweist, es aber keinen generellen Trend gibt. Die Standardabweichung von dem normierten Mittelwert ist mit 0.064% sehr klein; während des gesamten Tests zur Kurzzeitstabilität gibt es keine Messung, die mehr als 0.2% vom Mittelwert abweicht.

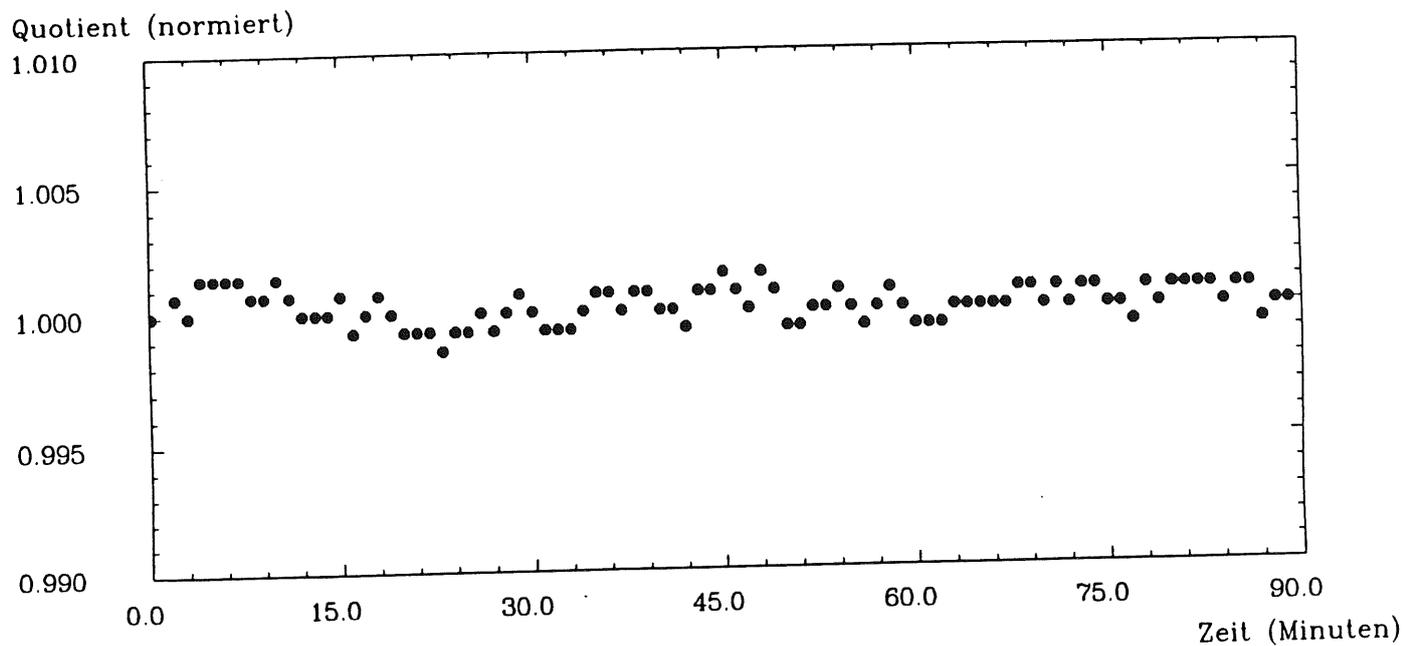


Abbildung 5.1.1: Der Quotient während des ersten Tests zur Kurzzeitstabilität
(In diesem ersten Testlauf dienten 500 Ereignisse zur Bestimmung eines Meßpunktes.)

Die Schwankungen des in Abbildung 5.1.1 dargestellten Tests sind die Folge der kurzen Meßdauer, denn die kleine Anzahl der verarbeiteten Signale bedingt eine Ablesungenauigkeit. Bei einer Anzahl von 500 Einträgen, einer Breite des Quotientenspektrums von 1% (FWHM) und einer statistischen Sicherheit von 99% kann das Maximum des Quotientenspektrums nur mit 0.1% Genauigkeit bestimmt werden.

Bei einem zweitem Kurzzeitstabilitätstest (siehe Abbildung 5.1.2), bei dem 200 Sekunden lange Messungen durchgeführt und somit für einen Messwert 2000 Einträge berücksichtigt wurden, ist der Meßfehler aufgrund der Vervielfachung der Einträge um die Hälfte kleiner. Auch in diesem Test ist kein Trend beim Verhalten des Quotienten bemerkbar, die statistischen Schwankungen sind nahezu verschwunden.

Beide Tests erlauben die Aussage, daß über den Zeitraum von einigen Stunden keine Schwankungen des Quotienten zu erwarten sind. Das Lasermonitor-system arbeitet kurzzeitig stabil.

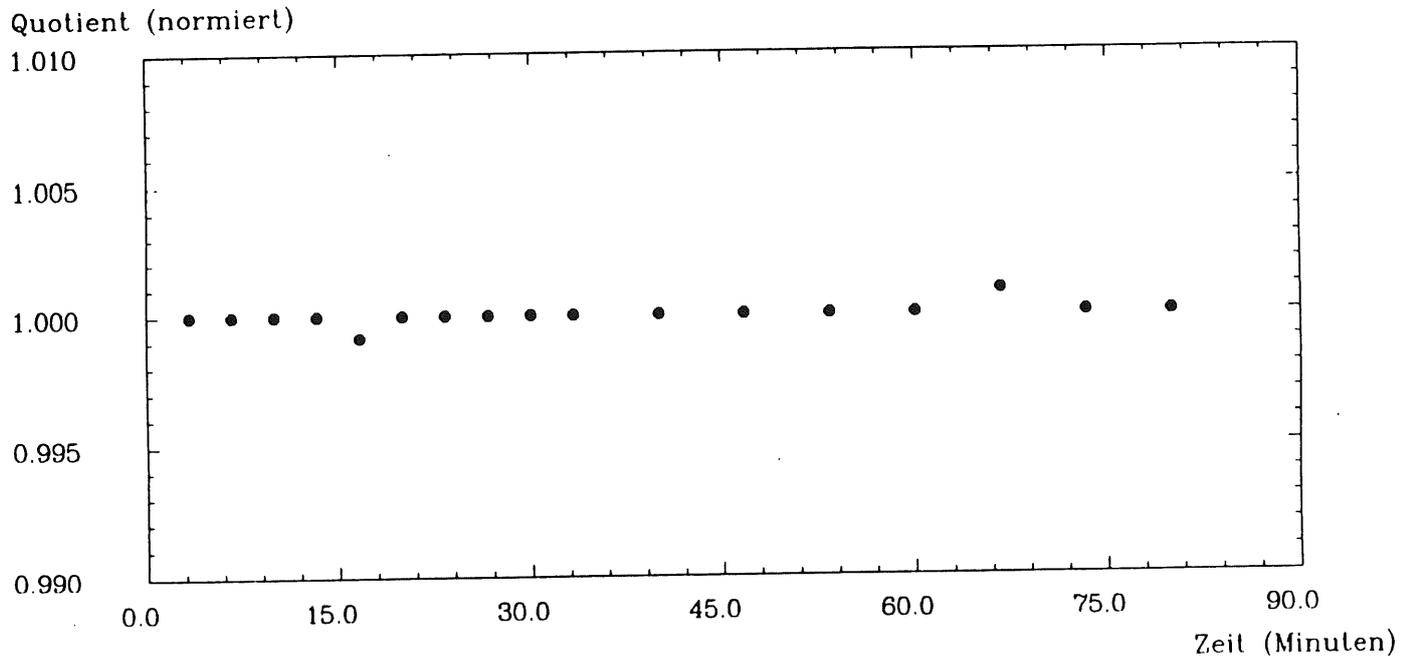


Abbildung 5.1.2: Zweiter Test zur Kurzzeitstabilität
(Hier dienten 2000 Ereignisse zur Bestimmung eines Meßwertes.)

5.2 Verhalten bei Wiederinbetriebnahme

Nachdem die Tests zur Kurzzeitstabilität gezeigt haben, daß der Quotient über einem Zeitraum von einigen Stunden keine Veränderungen zeigt, soll nun geklärt werden, ob auch bei wiederholter Inbetriebnahme des Lasers der Quotient unbeeinflußt bleibt.

Um wieder - wie beim Kurzzeitstabilitätstest - möglichen langfristigen Veränderungen vorzubeugen, wurde dieser Stabilitätstest innerhalb von zwei Stunden durchgeführt. Eine Messung dauerte jeweils 100 Sekunden, so daß bei einer Frequenz von 10 Hz 1000 Monitorsignale digitalisiert und nach der Quotientenmethode verarbeitet wurden. Nach der Messung wurde der Laser für 30 Sekunden ausgeschaltet und dann zur nächsten Messung wieder angeschaltet. Jeweils nach 10 Messungen wurde auch der Stickstoffzufluß für kurze Zeit unterbrochen.

Auch in diesem Stabilitätstest zeigt der Quotient keine wesentlichen Veränderungen. Die Streuungen waren eher statistischer Natur, da die 1000 Ereignisse nur eine Genauigkeit von 0.07 % bei Bestimmung des Quotienten zuließen.

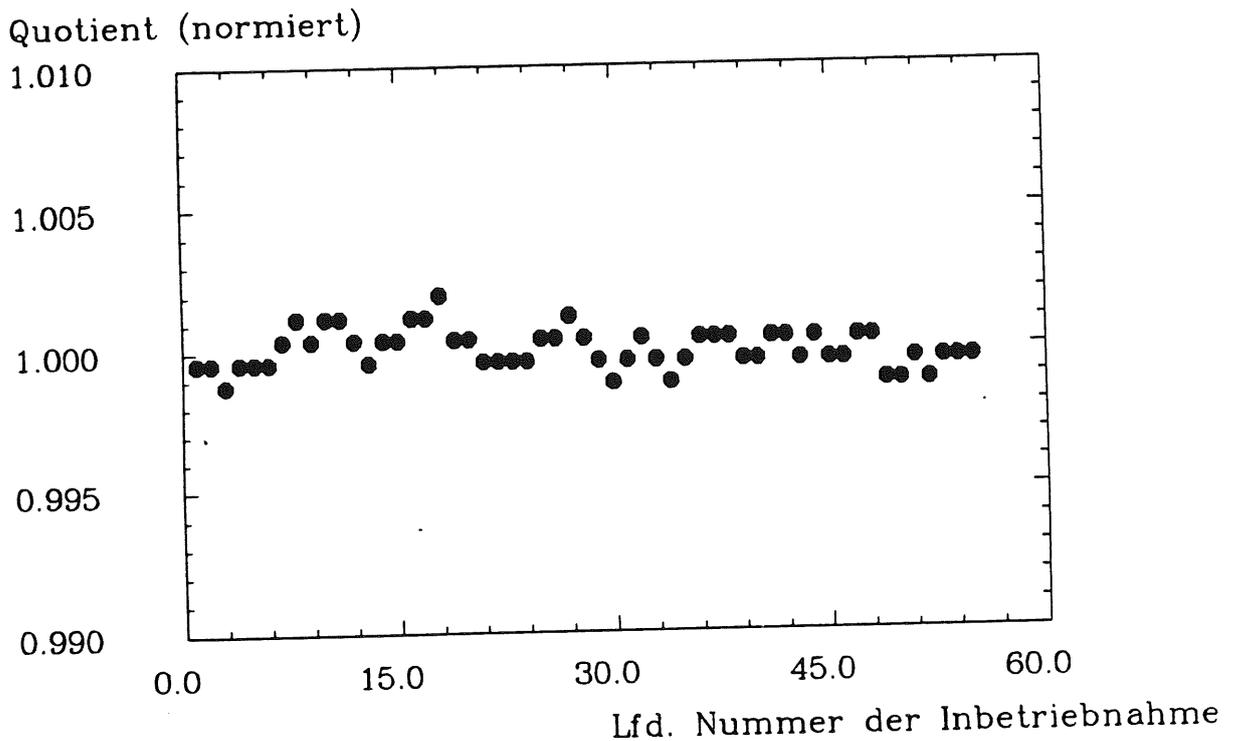


Abbildung 5.2.1: Stabilitätsverhalten bei Wiederinbetriebnahme des Lasers

5.3 Langzeitverhalten

Nach Auswertung der beiden Vortests kann nun davon ausgegangen werden, daß:

- a) sich der Quotient während einer Messung, die kürzer als eine Stunde ist, nicht verändert
- b) die Wiederinbetriebnahme des Lasers keine Auswirkungen auf den Quotienten hat.

Darüber hinaus hat auch die Reinigung und Nejustierung des Lasers keinen Einfluß auf den Quotienten (siehe dazu Abschnitt 4.1).

Nun wurden Messungen vorgenommen, die sich über mehrere Tage hinstreckten. Beim Aufbau dieser Langzeittests ist darauf geachtet worden, daß alle optischen Komponenten fixiert wurden, um so unkontrollierten Veränderungen vorzubeugen. Der Laser wurde bei jeder Messung für ca. 10 Minuten in Betrieb genommen. Bei diesen Messungen wurden jeweils 6000 Ereignisse aufgezeichnet; so spielt die Ableseungenauigkeit keine wesentliche Rolle mehr (dieser Fehler ist bei Berücksichtigung von 6000 Ereignissen entsprechend den im Abschnitt 5.1 genannten Bedingungen kleiner als 0.5‰).

5.3.1 Langzeittest I: Überdehnung von Sekundärfasern

Ein erster Langzeittest zeigt den ersten drei Messungen zufolge eine vorzügliche Stabilität. Allerdings ereignete sich am dritten Tag aufgrund einer Unachtsamkeit ein Unfall: Eine Sekundärfaser vom Typ HCN wurde für kurze Zeit stark überdehnt, ohne jedoch zu reißen. Auf die Faser wirkte eine Zugkraft von 8.83 N, also bezogen auf die Querschnittsfläche der HCN-Faser von 0.2 mm^2 eine Zugspannung von $4.5 \cdot 10^7 \text{ Pa}$.

Es zeigte sich bei der direkt nach der Überdehnung durchgeführten Messung, daß die Transmission dieser Faser um ca. 5% nachgelassen hatte mit der Auswirkung, daß sich der Quotient ebenfalls um 5% änderte.

Die Messungen in den nächsten Tagen zeigten eine gewisse Erholung der Faser. Allerdings wurde die ursprüngliche Transmission nicht wieder erreicht; sie pendelte sich auf einem mittleren Niveau ein.

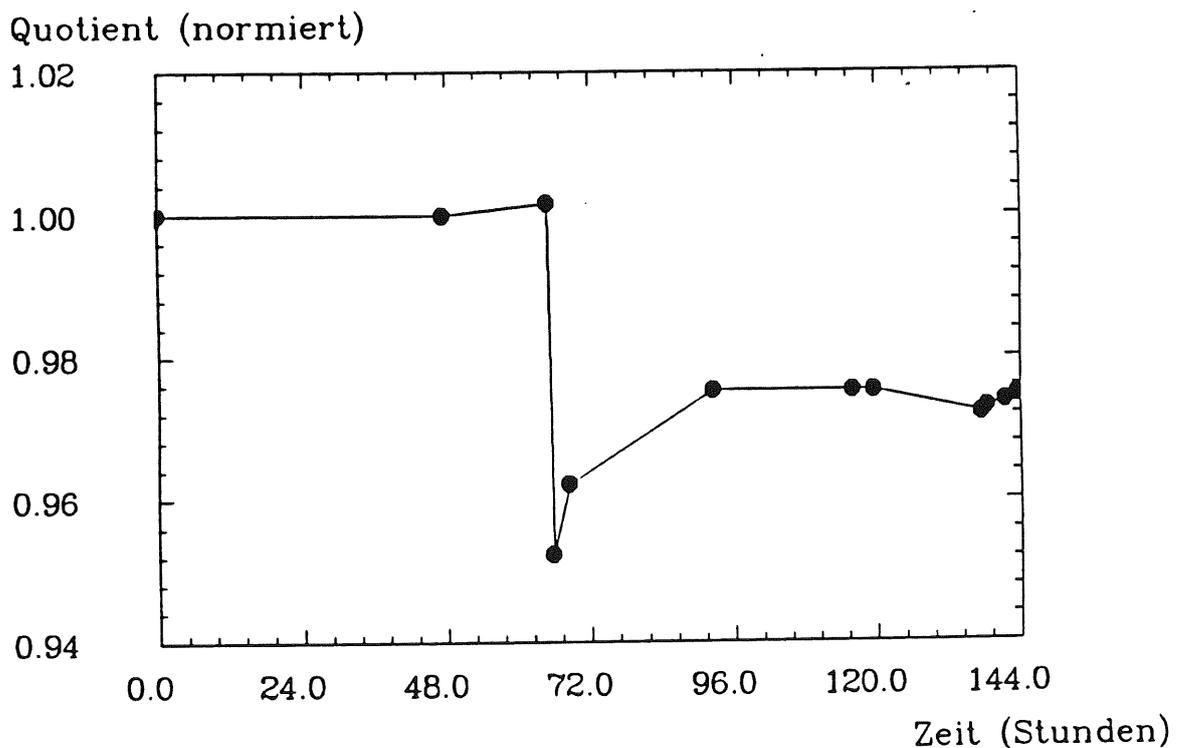


Abbildung 5.3.1: Langzeittest I (Unfall am 3. Tag)

5.3.2 Langzeittest II: Verlegung unter Spannung

Bei einem weiteren Langzeittest sollte der Einfluß von Spannung bei der Verlegung untersucht werden. Dazu wurde eine Faser kurz vor dem Detektor mehrmals um die eigene Achse gedreht.

Diese Spannung beeinflusste die Transmission: In der folgenden Woche wuchs die Transmission um 1.8 %, blieb dann aber konstant auf diesem hohen Niveau. Allerdings reagierte die so verlegte Faser sehr empfindlich auf die kleinste Bewegung. Diese Empfindlichkeit machte sich auch in der Neigung zur Streuung der Meßwerte bemerkbar.

Quotient (normiert)

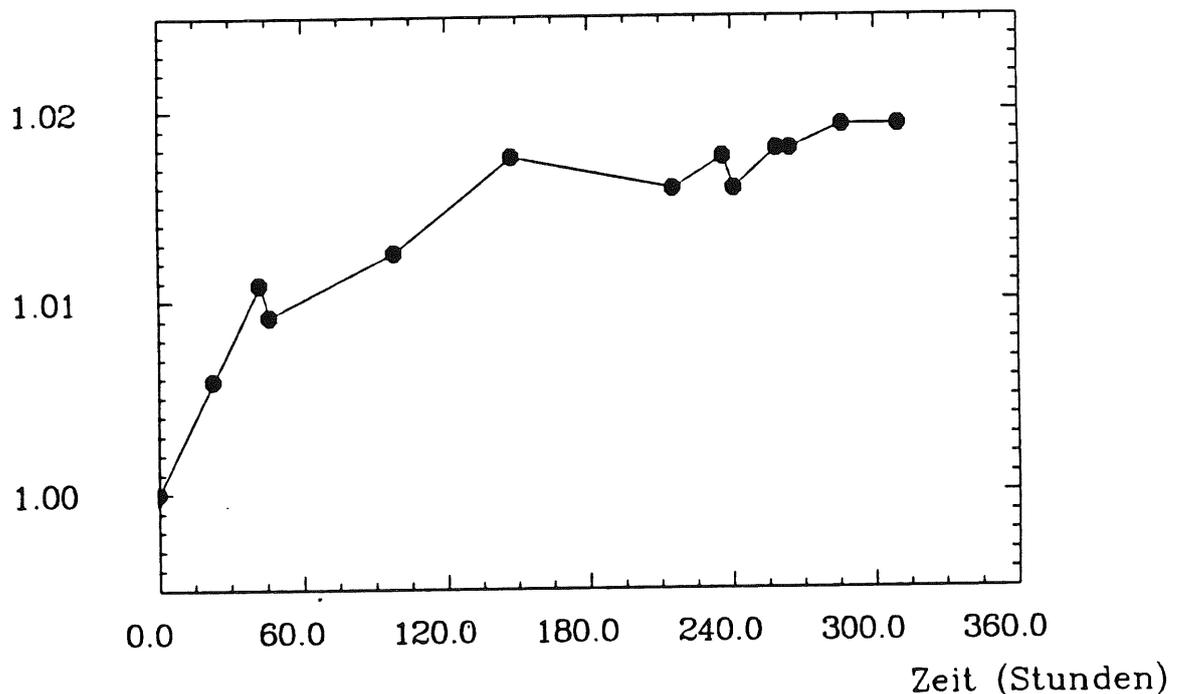


Abbildung 5.3.2: Langzeittest II: Langfristiges Verhalten bei Verlegung unter Spannung

Für die Installation am BEMC bedeutet dies zum einen, daß die bei Verlegung auftretenden Spannungen nach einigen Tagen keine Veränderung der Transmission einer Faser bewirken, weil es einen Sättigungseffekt gibt; andererseits wird aber eine vorher unter Spannung verlegte und dann abgekoppelte Faser bei der Wiederankopplung ein anderes Transmissionsverhalten zeigen, was einen Verlust der Eichinformation bedeutet. Deshalb sollte bei der Verlegung der Sekundärfasern nach Möglichkeit große Spannungen (also: kleine Radien, Torsionen der Faser etc.) vermieden werden. Darüber hinaus sollte auch eine Fixierung aller Fasern vorgenommen werden, um unkontrollierbare Lageveränderungen der Fasern zu verhindern.

5.3.3 Langzeittests III und IV

Bei den weiteren Langzeittests wurde der Aufbau entsprechend den oben genannten Sicherheitsmaßnahmen vorgenommen: Die Primärfaser wurde auf der gesamten Länge vom laserseitigen Einkopplungsort bis zum Verteiler fixiert. Außerdem wurden beide Sekundärfasern in möglichst großen Radien jeweils in einer Kabeltrommel fixiert verlegt, so daß aufgrund der Erfahrungen aus den ersten Langzeittests keine spannungs-bedingten Schwankungen auftreten dürften.

Für jeden Meßpunkt wurden mehrere Quotientenmessungen durchgeführt, um so den statistischen Fehler zu verkleinern. Der verbleibende Fehler ist im Durchschnitt mit 0.04 % so klein, daß in der Abbildung die Fehlerbalken auf dem Symbol liegen würden.

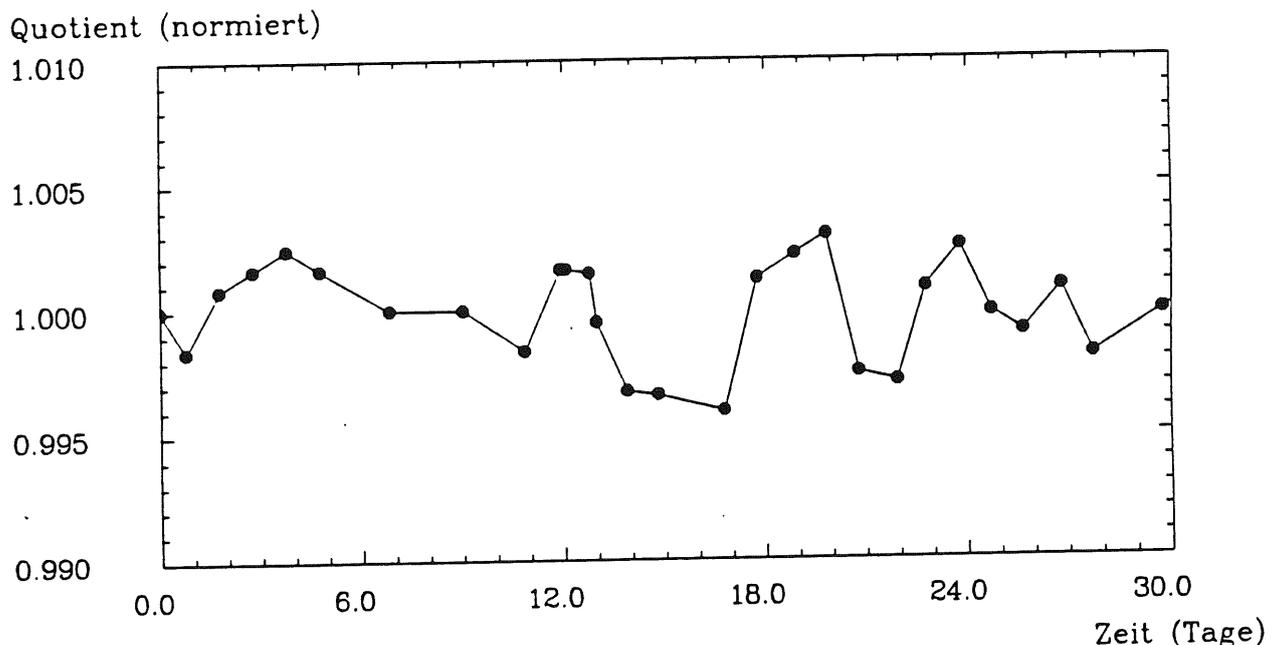


Abbildung 5.3.3: Langzeittest III (über einen Monat)

In Abbildung 5.3.3 sind trotz aller Vorkehrungen noch markante Schwankungen zu erkennen. Die Meßwerte weichen aber allesamt weniger als 0.5 % vom Mittelwert ab. Bis auf eine einzige Korrektur des Offsets eines ADCs am 23. Tag (Messungen mit einem elektrischen Pulser zeigten eine deutliche Veränderung an) wurde während des gesamten einmonatigen Langzeittests nicht die Einstellung der Elektronik verändert.

Auffällig an diesem Langzeittest III ist, daß die Schwankungen mit einer Periodizität aufzutreten scheinen: Am 13. Tag und 20. Tag sackte der Quotient deutlich ab. Auch der Quotient vom 6. und vom 27. Tag liegt jeweils tiefer als die Messung davor. Diese Schwankungen geschahen immer an einem Freitag. Die Periodizität könnte ein Anzeichen dafür sein, daß es sich nicht unbedingt um eine Schwankung des Quotienten, sondern sich eher um Schwankungen der Elektronik handelt, die infolge unterschiedlicher Belastungen des Stromnetzes auftreten.

Trotz der auftretenden Strukturen bleibt festzuhalten, daß sich der Quotient auch über den Zeitraum eines Monats als stabil erweist, und daß das Lasermonitor-system der Forderung entspricht, genauer als 1% zu arbeiten. Somit ist ein Einsatz dieses Systemes am BEMC möglich.

Um aber über letzte Zweifel erhaben zu sein, ist der Langzeittest IV durchgeführt worden, bei dem regelmäßig vor jeder Messung ein elektronischer Pulser eingesetzt wurde, der die beiden Vorverstärker gleichzeitig mit Testpulsen versorgte. So konnten die Offsets der ADCs kontrolliert und ggf. neu eingestellt werden. Außerdem wurde eine Kontrolle dieser Einstellung und der Linearität der ADCs über eine Quotientenbildung der Testpulssignale vorgenommen. Anschließend wurden dann die Messungen der Monitorsignale durchgeführt.

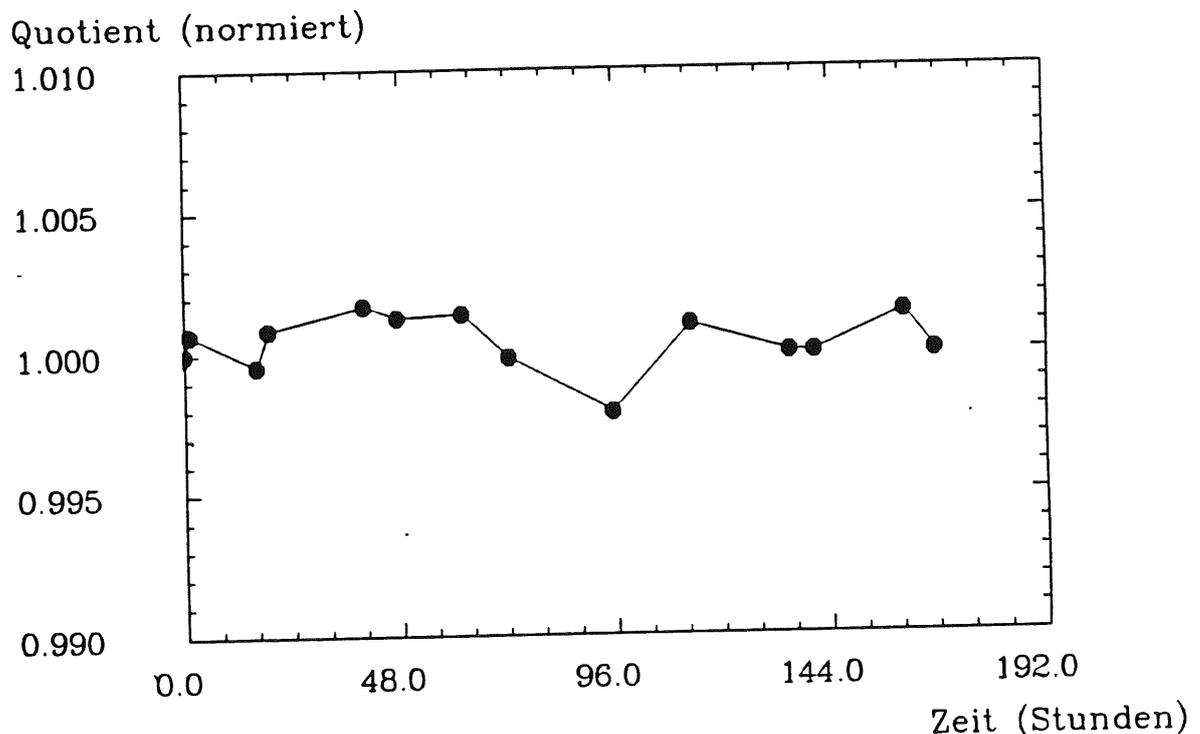


Abbildung 5.3.4 Langzeittest IV

In diesem einwöchigen Langzeittest zeigt der Quotient keine auffälligen Veränderungen mehr. Die Abweichungen vom Mittelwert sind aufgrund der Korrekturen an der Elektronik allesamt kleiner als 0.2%. Auch der Einbruch des Quotienten an einem Freitag (Messwert bei 100 Stunden) fiel sehr viel schwächer aus.

Die Schwankungen im Langzeittest III sind aufgrund dieses Ergebnisses aller Wahrscheinlichkeit nach nicht auf Veränderungen des Monitorsystemes zurückzuführen, sondern auf Veränderungen in der Elektronik.

Somit ist der Beweis erbracht, daß unter Voraussetzung eines sorgfältigen Aufbaus (Fixierung der Fasern, spannungsfreie Verlegung) das Lasermonitorsystem auch über große Zeiträume hinreichend stabil arbeitet.

Kapitel 6

Probelauf am DESY-Teststrahl

Im Juni 1990 wurden die quadratischen Module des BEMC mit Hilfe des DESY-Teststrahls 22 kalibriert. Für diese Kalibration konnten Elektronen mit einer Energie bis zu 6 GeV verwendet werden. Die Datenacquisition wurde unter Verwendung eines OS 9-Systemes vorgenommen, das auch beim Aufbau im H1-Detektor benutzt wird. Bei jeder Kalibrationsmessung wurden die Signale aus sechs Modulen von 5000 Ereignissen aufgezeichnet. Das zu kalibrierende Modul befand sich immer in Position 5 (siehe Abbildung 6.1).

Mit diesem Aufbau der Kalorimetermodule wurde ein erster Test des Lasermonitorsystemes vorgenommen. Der laserseitige Aufbau entsprach dem Laboraufbau (siehe Abbildung 4.2.1). Eine Primärfaser (HCN 1000, 5 m lang) diente für den Transport der Monitorsignale zum Verteiler. Eine weitere Faser wurde in der zweiten Position hinter dem Strahlteiler angebracht. Die Signale aus dieser Faser dienten als Triggersignale für das Datenacquisitionssystem. Der Verteiler war in optimaler Weise aufgebaut - wie in Abschnitt 4.4.2 beschrieben. Am Verteilerausgang war das blaue Faserbündel angekoppelt. Eine Faser des Faserbündels wurde am Modul der Position 5 angekoppelt, wie in Abbildung C 5 skizziert.

Dieser erste Einsatz des Lasermonitorsystemes an einem Modul des BEMC wurde im Hinblick auf folgende Fragen durchgeführt:

- 1.) Ist eine Einkopplung von Monitorsignalen möglich?
- 2.) Reicht die Intensität des verwendeten Stickstofflasers aus, den gesamten Meßbereich der Kalorimetermodule zu überwachen? (Linearitätstest!)
- 3.) Wie sehen die Spektren der 6 Kanäle aus?
- 4.) Ist das Verhältnis der Diodensignale zueinander konstant? (Diodenabgleich!)
- 5.) Arbeitet der modifizierte Laser (siehe Anhang A) ohne Störungen zu verursachen?

Im folgenden soll kurz von den ersten Erfahrungen berichtet werden, die bei diesem Probelauf gesammelt wurden. Eine ausführlichere Analyse wird bei [SSc 91] zu finden sein.

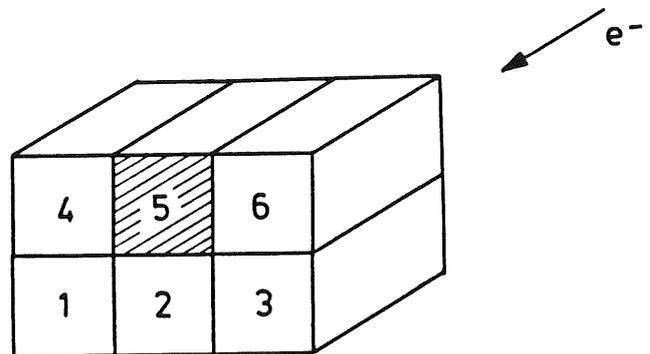


Abbildung 6.1: Positionierung der Module bei den Kalibrationsmessungen. (Alle Module wurden zur Kalibration in Position 5 eingebaut.)

Die Einkopplung von Monitorsignalen wurde erfolgreich mit verschiedenen Fasern an beiden Kopplungsstellen der quadratischen Module (siehe Abbildung 3.2.4) vorgenommen. Die aufgezeichneten Spektren sind in Abbildung 6.2 dargestellt.

Bei Abschwächung der Laserintensität unter Verwendung eines Filters mit einer Transmission von 0.74 % (Optische Dichte: 2.13) wurde in der einen Szintillatorplatte, in die das Monitorsignal eingekoppelt wurde, ein ähnlich großes Signal erzeugt, das bei einem Ereignis eines 5 GeV-Elektrons zu messen ist.

Beim Aufbau im H1-Detektor ist aber eine längere Primärfaser nötig: Durch die Verlängerung der Primärfaser von 5 m auf 17 m verringert sich die Transmission um schätzungsweise 88 % (bei Zugrundelegung einer Abschwächlänge von 5.7 m - siehe dazu Abschnitt 4.3). Die verbleibenden 12 % der Intensität (bezogen auf die 5 m lange Testfaser) sind aber immer noch voll ausreichend, den gesamten Meßbereich eines Moduls (bis ca. 60 GeV) zu überprüfen.

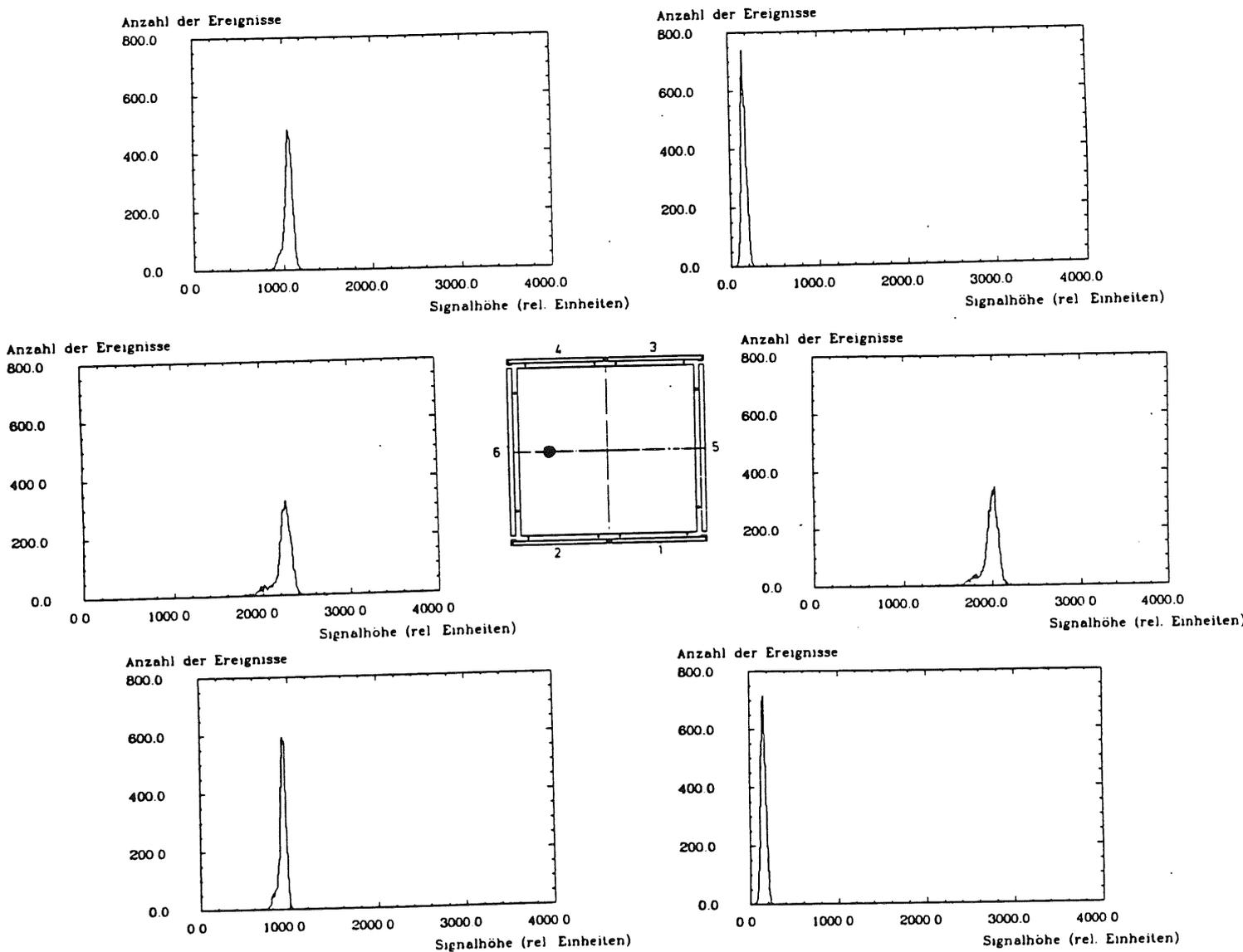


Abbildung 6.2: Signalhöehenspektren eines Monitorlaufes mit optischer Dichte 2.13
 (Die abgebildeten Spektren sind entsprechend der mittleren Skizze den Dioden zuzuordnen. Die Einkopplungsstelle ist mit dem Punkt markiert.)

Die Dioden, die die langen ("elektromagnetischen") Wellenlängenschieber auf der Seite der Einkopplung auslesen, sehen ein um ein Vielfaches größeres Signal als die Dioden, die die beiden anderen entfernteren Wellenlängenschieber auslesen. Der Grund für diesen großen Unterschied liegt an den verschiedenen Raumwinkeln bei der Lichtsammlung.

Bei den "hadronischen" Kanälen (kurze, breite Wellenlängenschieber) fällt dieser Unterschied nicht so drastisch aus, weil für beide hadronischen Wellenlängenschieber die Raumwinkel ähnlich groß sind.

Die Monitorsignale sind in den hadronischen Kanälen doppelt so groß wie die großen Signale der elektromagnetischen Kanäle. Der Grund liegt darin, daß die hadronischen Wellenlängenschieber jeweils mit zwei Dioden ausgelesen werden, deren Signale summiert werden. Diese Kanäle können somit durch Monitorsignale leicht in die Sättigung getrieben werden.

In fünf aufeinander folgenden Messungen wurde die Intensität des Lasers mittels der in Abschnitt 4.2.4 vermessenen Filter variiert. Die Mittelwerte der Spektren der elektromagnetischen Kanäle sind in Tabelle 6.1 eingetragen.

Run Nr.	Opt. Dichte (*)	Diode 1	Diode 2	Diode 3	Diode 4	Diode 5	Diode 6
1146	2.0	46.3	294.6	48.5	338.6	638.1	717.8
1148	1.0 + 0.5	186.6	1797.5	198.0	2052.4	3803.5	S
1149	1.0 + 0.3	254.1	2493.5	270.0	2844.3	S	S
1150	1.0 + 0.1	345.1	3298.2	366.7	3753.9	S	S
1147	1.0	541.2	S	573.8	S	S	S
1168	5 GeV-Elektron	78.4	304.5	83.5	356.6	12.2	11.0

Werte der kleinen Verstärkung in rel. Einheiten

Nummerierung der Dioden siehe mittlere Skizze in Abbildung 6.2

(*) nominal: gemessene Werte der einzelnen Filter siehe Tabelle 4.3

S: Sättigung

Tabelle 6.1: Mittelwerte der Diodenspektren von Modul Nr. 10 bei Monitorläufen mit unterschiedlichen Signalthöhen. (Run Nr. 1146 - 1150)

Zum Vergleich die Werte eines Teststrahlexperiments bei Einschub in die Position der Kopplungsstelle. (Run Nr. 1168)

Auffällig ist, daß die Lichtausbeute bei Monitorsignalen andere Verhältnisse zeigt, als bei den Strahlmessungen. Eine Erklärung könnte sein, daß das durch Laserlicht erzeugte Szintillationslicht als Oberflächeneffekt andere Eigenschaften zeigt als ein Teilchenschauer. Ein weiterer Grund könnte der schlecht kalkulierbare Einfluß von Krümmungen der Wellenlängenschieber im Bereich der Einkopplung sein.

Die hadronischen Kanäle sind schon bei geringen Transmissionen in der Sättigung - wie erwartet aufgrund der Summierung der Signale zweier Dioden.

Bei Verwendung vom Filter der optischen Dichte 1.0 sind aber auch schon zwei der elektromagnetischen Kanäle in der Sättigung. Es droht somit also kein Mangel an Intensität bei Betrieb des Lasermonitorsystemes.

Eine erste grobe Analyse zum Diodenabgleich zeigte, daß die Diodensignale zueinander ein konstantes Verhältnis aufweisen. Dazu wurden zunächst für jedes einzelne Ereignis alle Diodensignale der elektromagnetischen Kanäle gemittelt. Dieser Mittelwert wurde dann durch ein einzelnes Diodensignal geteilt. Diese so erzeugten Quotientenspektren sind in Abbildung 6.3 dargestellt.

Bei den Kanälen, die ein hohes Signal liefern - bei denen sich also die Wellenlängenschieber näher zum Einkopplungort befinden -, hat dieser Quotient eine FWHM von ca. 8%. Bei den Kanälen mit kleinem Signal haben die Quotienten eine große FWHM von ca. 36%, die aber mit dem großen Einfluß des Rauschens bei kleinen Signalen begründet werden kann.

Die gewünschte Intrakalibration kann also prinzipiell vorgenommen werden. Allerdings sollte bei jeder Quotientenbildung - ob bei Intrakalibration, Interkalibration oder Absoluteichung durch die Referenzdioden - immer mit großen Signalen gearbeitet werden, so daß das Rauschen keine Rolle mehr spielt.

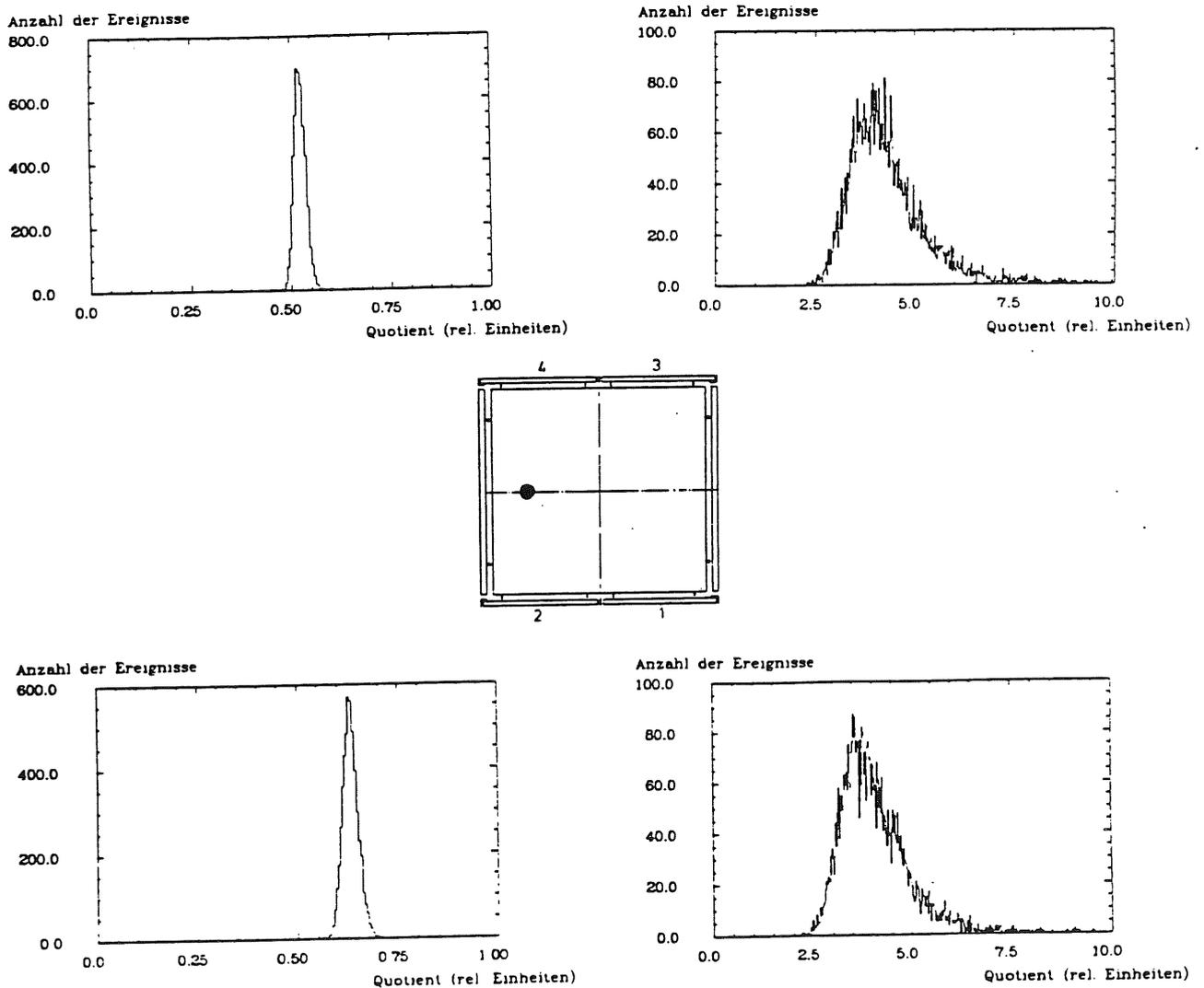


Abbildung 6.3 a - d: Quotientenspektren bei einem Monitorlauf mit optischer Dichte 2.13
Mittelwert : Diode_{1;2;3;4}

Bei der Einkopplung der Lasersignale in das Modul der Position 5 war zunächst ein Überkoppeln in die benachbarten Module festzustellen: Die *Pedestals* in den anderen fünf Modulen lagen deutlich höher. Dieser Effekt war proportional zu den eingekoppelten Monitosignalen in der Größenordnung von 1%.

Es konnte über *Pedestal*-Messungen, die von Lichtpulsen des Lasers getriggert wurden, verifiziert werden, daß keine Störung durch den Laser erfolgte. Durch verschiedene andere Kontrollmessungen stellte sich heraus, daß die Überkopplung über eine gemeinsame Pulserleitung erfolgte. Im Experiment wird aber jedes Kalorimetermodul durch einen separaten Pulser bedient, so daß dann Überkopplungen nur innerhalb eines einzelnen Moduls erfolgen und bei der Messung der Ortsabhängigkeit der Signale berücksichtigt werden.

Damit sind zunächst einmal alle eingangs formulierten Fragen beantwortet. Eine ausführlichere Analyse wird aber noch einen besseren Einblick in das Verhalten der Module bei Monitorläufen geben. Weitergehende Untersuchungen und Analysen, die insbesondere das Verhalten der dreieckigen und trapezförmigen Module betreffen, sind noch nötig, um die für die Installation des Lasermonitorsystemes nötigen und relevanten Informationen zu erlangen.

Kapitel 7

Zusammenfassung

Nach einer kurzen Darstellung des H1-Detektors mit besonderer Berücksichtigung des BEMC und der grundsätzlichen Überlegungen zu Kalibration und *Monitoring* wurden im Kapitel 3 die Möglichkeiten der Überwachung des BEMC erläutert. Mit dem Ziel einer effizienteren Überwachung wurde dort das Konzept für ein auf das BEMC zugeschnittenes Lasermonitorsystem vorgestellt, das unter Verwendung von UV-Licht den gesamten Signalweg (unter Einbeziehung der Szintillation) der Kalorimetermodule überprüfen soll. Ferner soll das System einen Linearitätstest, einen Diodenabgleich ("Intrakalibration") und einer Interkalibration der Module ermöglichen.

Das Monitorsystem basiert auf dem Einsatz eines Stickstofflasers ($\lambda = 337.1 \text{ nm}$) als zentrale Lichtquelle, der außerhalb des H1-Detektors positioniert wird. Vorrichtungen zur Einstellung der Intensität und zur Strahlteilung sind laserseitig vorgesehen. Mit zwei $1000 \mu\text{m}$ dicken, 17 m langen Quarzglasfasern ("Primärfasern") werden die Monitorsignale zwei Verteilern zugeleitet, die direkt am BEMC aufgebaut werden sollen. Mit Hilfe von Quarzglaslinsen, Oberflächenstreuungsscheiben und Quarzglasstäben wird die Verteilung des UV-Lichtes homogenisiert, ehe die Einspeisung in Faserbündel erfolgt. Mit den Quarzglasfasern der beiden Faserbündel ("Sekundärfasern") werden die Monitorsignale auf die einzelnen Module verteilt. Verschiedene - von den Kalorimetermodulen unabhängige - Referenzsysteme am BEMC und außerhalb des H1-Detektors dienen zur Überwachung der Monitorsignale und zur Signalverarbeitung während eines Monitorlaufes.

Die Untersuchungen bzgl. Aufbau, Signalanpassung und Stabilität der Referenzsysteme werden in [Gri 90] dargestellt. Die Darstellung vom Endaufbau des Lasermonitorsystemes, dem Algorithmus zur Durchführung von Monitorläufen und von ersten Erfahrungen bei Inbetriebnahme des Systemes wird bei [SSc 91] erfolgen.

Im Zentrum der vorliegenden Arbeit standen die Untersuchungen von Eigenschaften der Komponenten des Lasermonitorsystemes im Rahmen der Signalerzeugung und -verteilung (Kapitel 4).

Es wurde festgestellt, daß Erzeugung, Transport und Verteilung unter Beibehaltung der Wellenlänge der Monitorsignale in der Weise möglich ist, daß den Modulen des BEMC zwei voneinander unabhängige Signale zugeführt werden können (an die kleinen dreieckigen Module kann aus Platzgründen allerdings nur jeweils eine Faser angekoppelt werden). Diese Redundanz ermöglicht über das Strahlteilungsverhältnis im gewissen Umfang eine Selbstkontrolle des Monitorsystemes.

Bei den Untersuchungen zur Stabilität zeigte sich, daß kleine Veränderungen an der laserseitigen Optik keinen wesentlichen Einfluß auf die Verteilung der Monitorsignale haben.

Vorsicht ist aber beim Umgang mit allen (Quarzglas-) Fasern geboten: Alle Kopplungen müssen winkeltreu vorgenommen werden; alle Fasern, ob Primär-, Sekundär- oder Referenzfasern, müssen fixiert verlegt werden, um Veränderungen der Transmission oder Abstrahlcharakteristik aufgrund von Änderungen bei Krümmung oder Torsion der Fasern vorzubeugen. Nur unter diesen Bedingungen ist die Stabilität der Lichtverteilung gegeben und - wie in Kapitel 5 gezeigt - auch langfristig gewährleistet.

Ein erfolgreicher Einsatz des Lasermonitorsystemes zur Interkalibration und - bei stabilem Referenzsystem - zur Absoluteichung ist nur dann möglich, wenn beim Aufbau des Systemes für eine hinreichende Fixierung aller Fasern gesorgt wird.

Ein erster Test des Lasermonitorsystemes an den quadratischen Modulen des BEMC (Kapitel 6) bestätigte die grundlegenden Erwartungen an das Lasermonitorsystem bezüglich der Signalhöhe (Linearitätstest!) und Intrakalibration der Dioden eines Moduls. Es konnte ferner verifiziert werden, daß der modifizierte Laser keine Störungen mehr verursacht.

An der prinzipiellen Funktionsfähigkeit des hier vorgestellten Lasermonitorsystemes besteht aufgrund der durchgeführten Untersuchungen kein Zweifel mehr. Ein Einsatz des Lasermonitorsystemes am BEMC ist somit möglich und bei Beachtung / Vermeidung der in dieser Arbeit aufgezeigten Risiken erfolgversprechend.

Letztendlich handelt es sich aber nur um ein Monitorsystem und nicht um ein Kalibrationssystem im engeren Sinne, da keine Kontrolle aller Szintillatorplatten und Wellenlängenschieber eines Moduls vorgenommen wird, sondern nur eine Szintillatorplatte und ein kurzer Lichtweg in den Wellenlängenschiebern überprüft wird. Durch Abstimmung der Monitordaten mit den Daten aus Physikereignissen besteht aber doch die Möglichkeit, eine effiziente Kalibration des BEMC vorzunehmen.

Anhang A

Die Physik des Stickstofflasers

Der Stickstofflaser LN 120 C der Firma PRA (Kanada) gehört zu der Klasse der TEA-Laser (*Transversal Exited Atmospheric Pressure*): Der Laserkopf wird mit Stickstoff geflutet und befindet sich unter Atmosphärendruck. [Ber 76]

Die bei einer Entladung zwischen den Elektroden entstehenden freien Elektronen regen im Laserkanal durch Stoßionisation N_2 -Moleküle an.

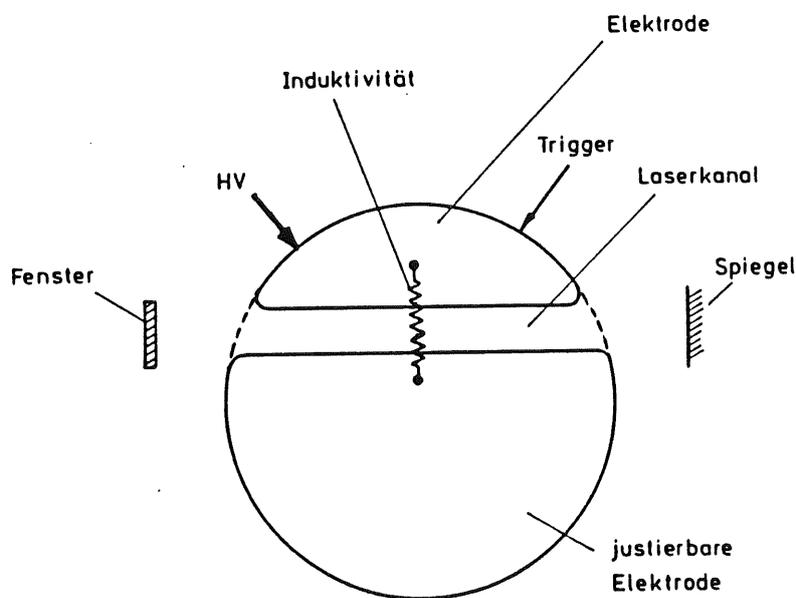
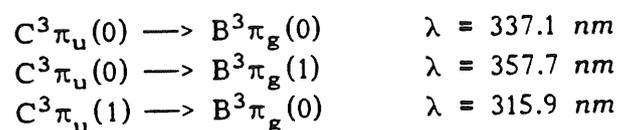


Abbildung A1: Der Laserkopf

Der dabei relevante Laserübergang ist der elektronische Übergang von $C^3\pi_u \rightarrow B^3\pi_g$ [Hea 63]. Die Anregung des $C^3\pi_u$ -Niveaus erfolgt durch Stöße in der Gasentladung. (Erläuterungen zum Niveau-Schema des Stickstofflasers siehe bei Abbildung A2).

Folgende drei Übergänge im UV-Bereich sind möglich:



Der Übergang mit $\lambda = 337.1 \text{ nm}$ ist der dominante Übergang. Er ist um das hundertfache intensiver als einer der beiden anderen. [Pat 72]

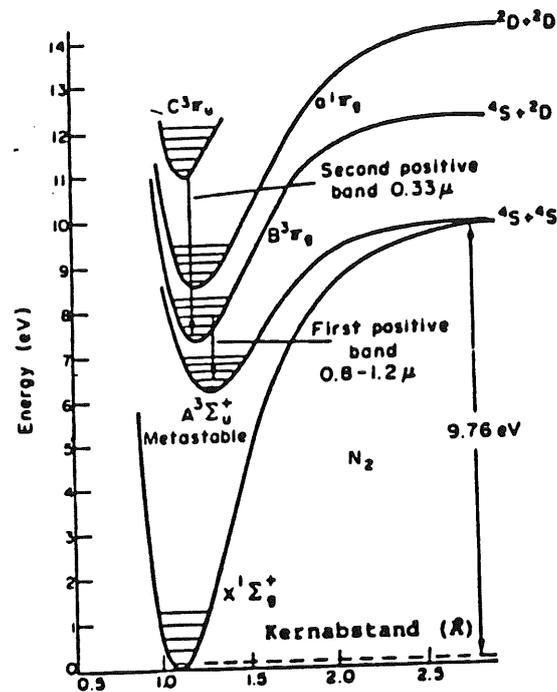


Abbildung A2: Niveauschema des Stickstofflasers; aus [Thi 85]

Durch Elektronenstöße kann ein Übergang aus dem Singulett-Grundzustand $X^1\Sigma_g^+$ des N_2 -Moleküls in den Triplettzustand $C^3\Pi_u$ oder $B^3\Pi_g$ erfolgen. Ist eine Anregung des elektronischen $C^3\Pi_g$ -Zustandes geschehen (bei einer Anregungsenergie $\geq 11 \text{ eV}$), folgt wegen der kurzen Lebensdauer des $C^3\Pi_u$ -Niveaus ein rascher Übergang unter Emission von ultravioletter Strahlung (*second positive band*) in den $B^3\Pi_g$ -Zustand. Der $B^3\Pi_g$ -Zustand zerfällt unter Emission infraroter Strahlung (*first positive band*) in den $A^3\Sigma_u^+$ -Zustand [Mat 63]. Dieser Triplettzustand ist metastabil, da wegen des notwendigen Wechsels der Multiplizität nur ein strahlungsloser Übergang in den Singulett-Grundzustand möglich ist. [Cra 59]

Der hier beschriebene Laser erzeugt sehr kurze Pulse. Das liegt an der kurzen Lebensdauer des oberen Laserniveaus ($\tau = 40 \text{ ns}$; aus [Fit 76]) und an der Superradianz des Lasergases [Pat 72], bei der ein einmaliger Durchlauf der Laserwelle ausreicht, einen intensiven Laserpuls zu erzeugen. Damit liegt die Pulsdauer (300 ps) in der Größenordnung der Lichtlaufzeit durch das Lasergas. Bei einer Länge des Laserkanals von $l = 4 \text{ cm}$, der wegen des Spiegels zweimal durchlaufen wird, ergibt das eine abgeschätzte Pulsdauer von $t = 2 \cdot l / c = 270 \text{ ps}$.

Vorraussetzung aber ist, daß das Pumpen - also die Stoßionisation durch freie Elektronen - schnell genug abläuft: Die zur Entladung notwendige Hochspannung muß also pulsförmig an die Elektroden angelegt werden.

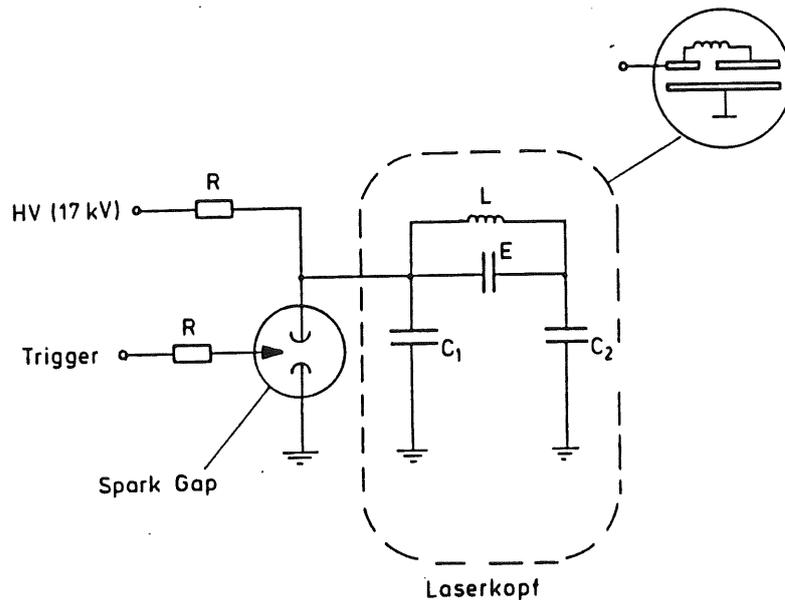


Abbildung A3: Prinzipschaltbild des Lasers

Langsam werden beide Kapazitäten C_1 (kleine Elektrode) und C_2 (große Elektrode), die durch eine kleine Induktivität L verbunden sind, aufgeladen. Beide Elektroden befinden sich auf gleichem Potential.

Durch einen Triggerpuls wird eine Funkenstrecke (*Spark-Gap*) gezündet und C_1 entlädt sich schnell. Da die Induktivität L das schnelle Entladen von C_2 verhindert, baut sich zwischen den beiden Elektroden über den Laserkanal (E) die gewünschte Hochspannung (17 kV) auf, und es kommt nach ca. $1-2\ \mu\text{s}$ zu der Glimmentladung, die den Laserpuls erzeugt.

Dieses Zeit-Jitter bei der Entladung von ca. $1\ \mu\text{s}$ ist letztendlich dafür verantwortlich, daß der Elektronik des Lasers kein schnelles Triggersignal entnommen werden kann, sondern daß die Triggerung der Datenacquisition über den Lichtpuls selbst erfolgen muß.

In der ersten Zeit arbeitete der Laser sehr unzuverlässig und mußte oft repariert werden. Diese Störanfälligkeit konnte auf eine grundlegende Schwäche der Elektronik zurückgeführt werden: Der Entladestrom floß unkontrolliert über das Gehäuse und die Elektronik ab und führte zur übermäßigen Belastung einiger elektronischer Bauteile. Durch eine Korrektur in der Schaltung wurde der Entladestrom so in den "*Pulse-Charger*" zurückgeführt, daß Störeinträge auf die vorher belastete Trigger-Elektronik unterblieben.

Da ferner der Laser in seiner ursprünglichen Form Störpulse in das Netz einspeiste, wurde ein Trenntrafo eingebaut. Auch der Einbau eines Entstörwiderstandes in den Triggerzweig verminderte die vom Laser ausgehende Störung. Letztendlich ist das Gehäuse des Lasers neu konzipiert worden, denn das alte Gehäuse diente wohl nur zur Zierde, aber nicht als Abschirmung (Gehäusedeckel und -boden waren nicht vernünftig geerdet). Nun sind Gehäusedeckel und -boden und andere Gehäuseöffnungen mit Kupferplatten abgedeckt und fest verschraubt worden. Das so umgebaute Gehäuse bietet nun eine hinreichend gute Abschirmung.

In dieser Form arbeitet der Laser seit geraumer Zeit ohne Störungen zu erleiden oder zu verursachen.

Anhang B

Betrieb und Bedienung des Stickstofflasers

Wichtige Parameter für den Betrieb des Lasers sind der Durchfluß und der Druck bei der Stickstoffversorgung und die Puls-Frequenz. Die hierfür relevanten Untersuchungen sollen im folgenden vorgestellt und diskutiert werden ehe am Ende dieses Anhangs Hinweise zur Bedienung des Stickstofflasers gegeben werden.

Der Stickstoff wird an zwei Orten im Laser gebraucht: Im Laserkanal und im Spark-Gap.

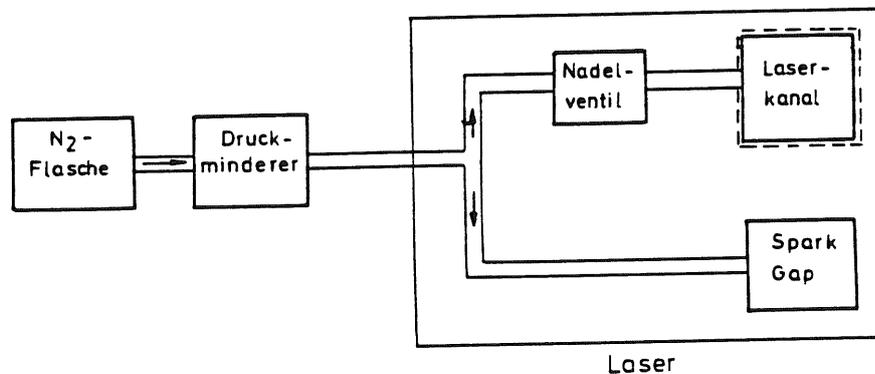


Abbildung B1: Stickstoffversorgung im verwendeten Stickstofflaser
 $P_{\text{Laserkanal}} = \text{Normaldruck}$; $P_{\text{Spark-Gap}} \approx 1.7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

a) Der Laserkanal muß während des Betriebes mit Stickstoff geflutet werden, damit es zu dem durch die Glimmentladung angeregten Laserübergang kommen kann. Da es keine Abdichtung gibt, damit im Laserkopf annähernd Normaldruck herrscht (TEA-Laser), ist es nötig, den Durchfluß so zu regulieren, daß eine gewisse Minimalkonzentration an Stickstoff nicht unterschritten wird. Für die Regulierung des Durchflusses steht ein Nadelventil - angebracht an einer Stirnseite des Lasers - zur Verfügung.

Bei einer Pulsrate von 10 Hz und dem vom Hersteller empfohlenen Druck im Spark-Gap von $1.7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ist die Abhängigkeit der Laserintensität vom Stickstoffdurchfluß gemessen worden. Nachdem ein bestimmter Durchfluß eingestellt war, wurde erst nach 3 Minuten die Messung gestartet, um so Vorsorge zu tragen, daß sich ein Gleichgewicht bei der Stickstoff-Konzentration im Laserkopf einstellen konnte. In Abbildung B2 sind die Maxima der gemessenen Pulshöhenspektren eingetragen; die Fehlerbalken zeigen den gesamten Pulshöhensbereich an.

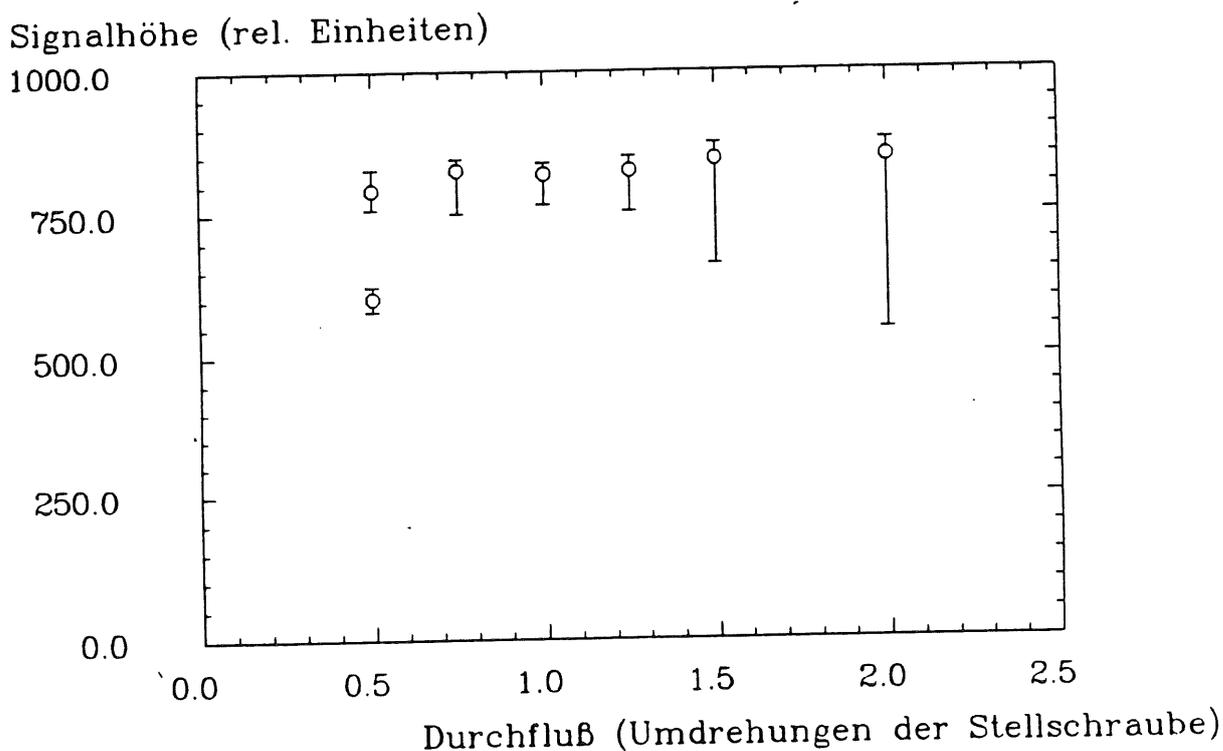


Abbildung B2: Signalhöhe des Lasers in Abhängigkeit vom Stickstoffdurchfluß
(Die Fehlerbalken geben den gesamten Pulshöhenbereich an.)

Bei genau einer Umdrehung der Stellschraube des Nadelventils ist der Pulshöhenbereich minimal und somit ist diese Einstellung optimal. Laut Herstellerangabe ist bei dieser Einstellung der "Verbrauch" an Stickstoff mit ca. 0.1 Liter/min zu veranschlagen. Erhöht man den Durchfluß, kommt es vermehrt zu niederenergetischen Pulsen.

Das Maximum der Pulshöhenpektren bleibt unverändert auf hohem Niveau und auch die FWHM des Spektrums bleibt mit ca. 3.5% konstant. Bei sehr großem Durchfluß (mehr als 2 Umdrehungen der Stellschraube) nehmen dann aber die niederenergetischen Pulse so überhand, daß kein ausgeprägtes Maximum mehr sichtbar ist.

Wird der Durchfluß stark vermindert (1/2 Umdrehung der Stellschraube) stirbt das Lasersignal langsam aus: Es kommt zu einer Ausdünnung der Stickstoffatmosphäre, weil der Verlust an Stickstoff wegen der fehlenden Abdichtung nicht mehr im ausreichenden Maße ausgeglichen wird. Die Signalhöhe, die proportional zu der Anzahl der strahlungsfähigen Stickstoffmoleküle ist, verringerte sich innerhalb von 20 Minuten um 25%.

- b) Im *Spark-Gap* wird durch einen Triggerpuls eine Funkenstrecke gezündet. Für die Funktion als schneller Schalter (zum Kurzschließen der kleinen Elektrode - und damit dem Aufbau der Hochspannung über dem Laserkanal) ist es nützlich, daß im *Spark-Gap* eine Stickstoffatmosphäre herrscht (Prinzip: Blümleingenerator). Der Betrieb und die Funktion des Lasers ist stark abhängig vom Druck im *Spark-Gap*.

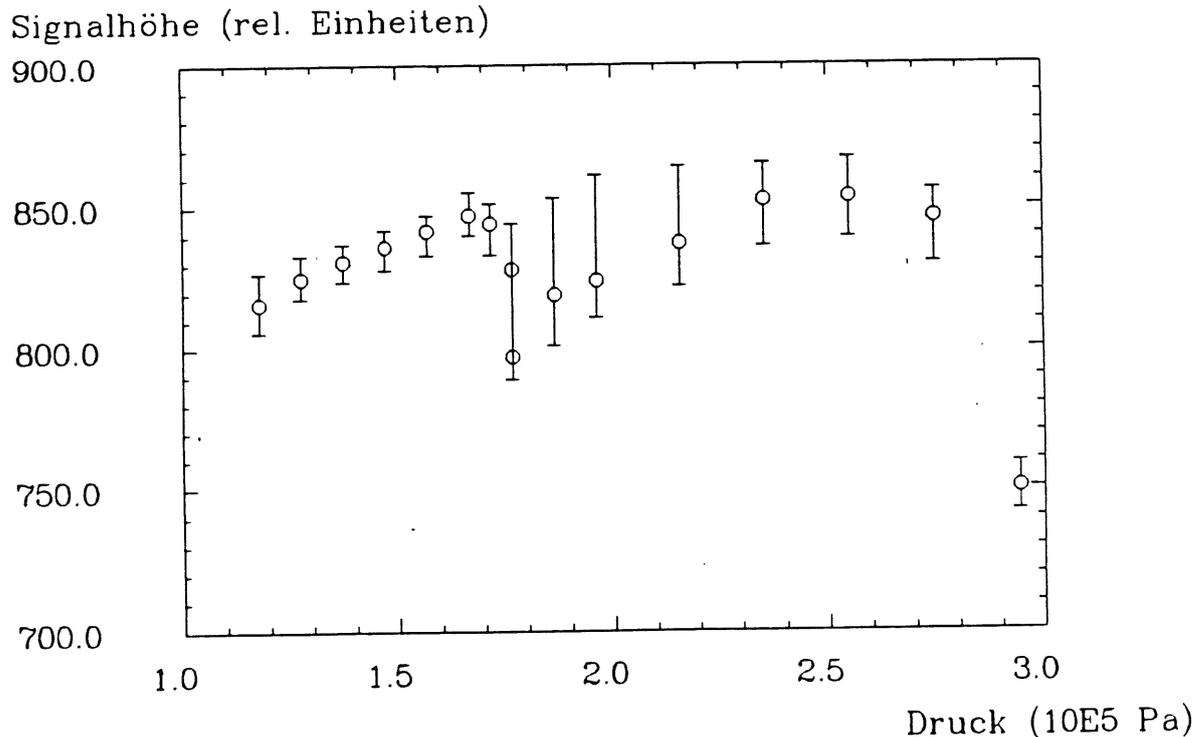


Abbildung B3: Druckabhängigkeit des Lasers
(Die Fehlerbalken zeigen die FWHM der Pulshöhenspektren an.)

In Abbildung B3 ist zu erkennen, daß sich ein Druck von ca. $1.65 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ optimal auf den Betrieb des Lasers auswirkt: Das Signalhöenspektrum ist symmetrisch, und es gibt wenig niederenergetische Pulse.

Bei niedrigeren Drücken im *Spark-Gap* kommt es zu verfrühten Entladungen, weil die freie Weglänge größer geworden ist. Der Laser feuert ehe die optimale Spannung von 17 kV über den Laserkanal anliegt. So nimmt die Leistung des Lasers ab und es kommt vermehrt zu niederenergetischen Pulsen.

Ist andererseits der Druck im *Spark-Gap* zu hoch, werden die Pulshöhenspektren sehr breit. Es kann sogar dazu kommen, daß mehrere Maxima vorhanden sind (siehe Abbildung B3 bei ca. $1.77 \cdot 10^5 \text{ Pa}$). Bei sehr hohem Druck (größer als $2.8 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) feuert der Laser erratisch: Die Entladung kommt entweder sehr spät oder gar nicht. Der Betrieb des Lasers mit hohen Drücken im *Spark-Gap* kann Schäden in der Elektronik und am Laserkopf verursachen und ist deshalb zu vermeiden.

Die Messung der Druckabhängigkeit ist auch vom Zustand aller Elektroden (die des Laserkopfes und die im *Spark-Gap*) abhängig, so daß sich die optimale Einstellung vom Druck von Inbetriebnahme zu Inbetriebnahme unterscheiden kann (um bis zu $0.2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$). Bei Beendigung der einjährigen Versuchsphase nach ca. 15 Millionen Pulsen hat sich diese optimale Einstellung von 1.75 auf $1.6 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ verringert, aller Wahrscheinlichkeit nach aufgrund von Abbrand und Deformation der Elektroden.

Der Laser arbeitet mit optimiertem Druck und Durchfluß bei Pulsraten von 3 bis 20 Hz ohne Probleme. Nur bei sehr niedrigen Pulsraten von kleiner als 3 Hz gehts mit der Intensität bergab bei gleichzeitiger Verbreiterung des Pulshöhenspektrums auf eine FWHM von 30 %. Bei Pulsraten höher als 3 Hz ist nahezu keine Veränderung der Intensität oder Form des Pulshöhenspektrums zu bemerken. Die Breite der Spektren ist immer kleiner als 6 % (FWHM).

Bei höheren Pulsraten (größer als 12 Hz) empfiehlt es sich, den Stickstoffdurchfluß zu erhöhen, um so von vorhergegangenen Glimmentladungen übrig gebliebene Ionen wegzuspülen, die bei Anwesenheit im Laserkanal (auch in geringer Konzentration) die folgende Glimmentladung stören könnten [Fit 76].

Signalhöhe (rel. Einheiten)

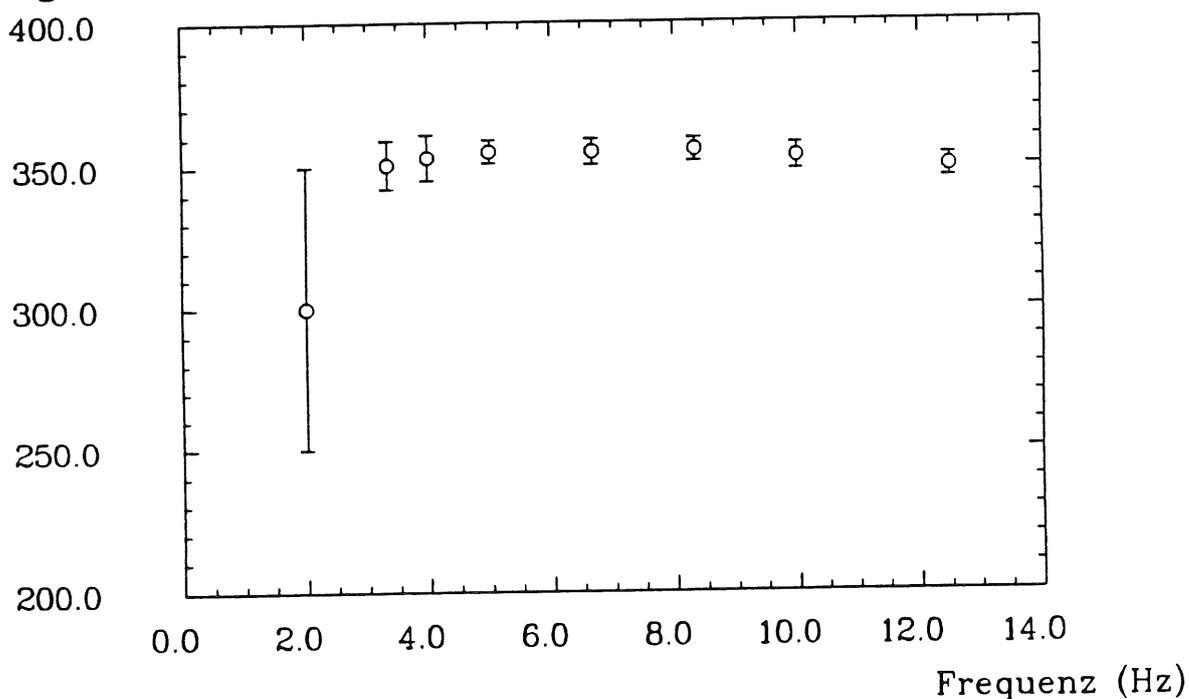


Abbildung B 4: Pulsratenabhängigkeit des Lasers
(Die Fehlerbalken zeigen FWHM der Pulshöhenspektren an.)

Zur Säuberung und Justierung des Lasers:

Wenn man bei geöffnetem Gehäuse die Abdeckplatte des Laserkopfes entfernt, kann man durch eine Szintillatorschicht, die zugleich gegen austretende Laserstrahlung schützt, die Glimmentladung im Laserkanal betrachten.

Für den optimalen Betrieb des Lasers ist es wichtig, daß der Laserkanal homogen ausgeleuchtet ist; die Glimmentladung erscheint dann bläulich.

Wenn vermehrt weiße Lichtblitze im Laserkanal zu sehen sind (sie machen sich als niederenergetische Pulse bemerkbar), ist zunächst der Abstand der Elektroden des Laserkanals mit Hilfe von Stellschrauben zu korrigieren. Wenn aber eine Justierung des Elektrodenabstandes und auch eine geringfügige Nachregelung des Druckes (um bis zu $0.2 \cdot 10^5 Pa$) keinen Erfolg hat, ist der Laserkopf - dort insbesondere der Laserkanal - und das Spark-Gap zu reinigen.

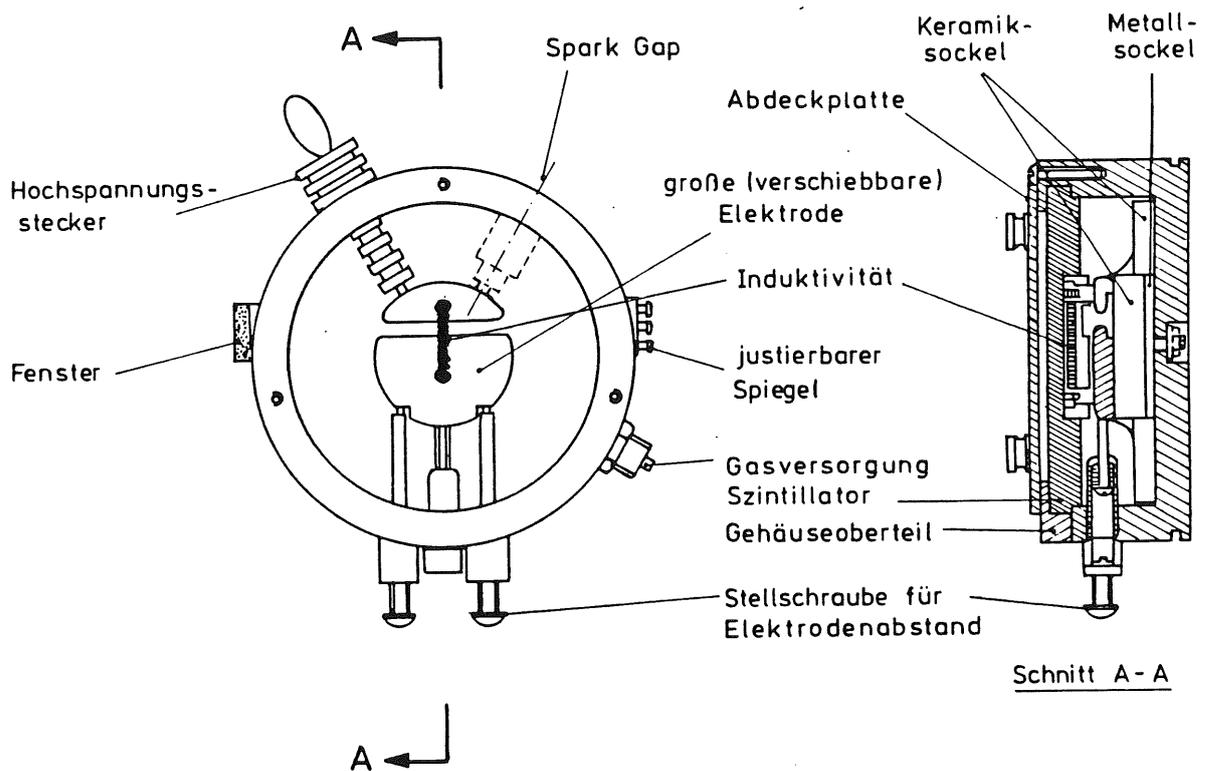


Abbildung B5: Der Aufbau des Laserkopfes; aus [PRA 88]

Zur Reinigung ist der Laser auszuschalten. Dann entfernt man drei Schrauben auf der Oberseite des Laserkopfes und hebt das Oberteil des Laserkopfgehäuses ab. Nun müssen alle Oberflächen innerhalb des Laserkopfes gesäubert werden. Dafür ist die Verwendung von Wattestäbchen zu empfehlen. Als Reinigungsmittel kann Ethanol verwendet werden, da durch Ethanol die Beschichtung des Spiegels nicht angegriffen wird. Wenn bei der Reinigung der Elektroden Ethanol nicht ausreicht, kann man mit Aceton versuchen, die Oxidationsrückstände zu entfernen.

In der Zeit, in der alle Flächen trocknen (müssen), kann man am *Spark-Gap* arbeiten. Zunächst schraubt man die Gaszuleitung ab. Dann läßt sich das gesamte *Spark-Gap* aus dem Laserkopfgehäuse schrauben. Ehe nun das *Spark-Gap*-Gehäuse (bestehend aus Elektrodenteil [1] - [4], Elektrode mit Loch [5] und Trigger-elektrodenteil [6]) zerlegt wird, ist die Position von [5] relativ zu [2] zu markieren. Nach Entfernen von 4 Schrauben [7], können die Teile [5] und [6] vom Elektrodenteil abgezogen werden. Sind alle Oberflächen gereinigt worden, ist die Elektrode [4] durch Verdrehen relativ zu [3] so einzustellen, daß (siehe Abbildung B5) $a - b = 2 \text{ mm}$ ist.

Nach dem Austrocknen ist die Elektrode mit Loch [5] und die Trigger-elektrode [6] wieder auf den Elektrodenteil unter Beachtung der Markierung aufzustecken und mit den 4 Schrauben zu fixieren. Das gesamte *Spark-Gap*-Gehäuse wird dann wieder in den Laserkopf geschraubt und die Gaszuleitung wieder am *Spark-Gap* befestigt. Nun wird der noch offene Laserkopf mit dem Oberteil wieder abgedeckt und verschraubt.

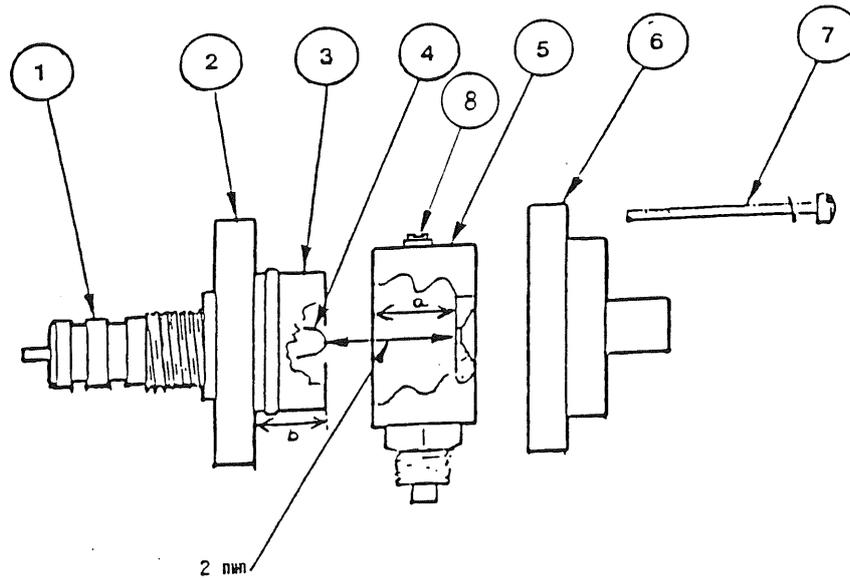


Abbildung B6: Der Aufbau des *Spark-Gaps*; aus [PRA 88]

Ehe der Laser in Betrieb genommen wird müssen Laserkopf und *Spark-Gap* ausgiebig mit Stickstoff gespült werden. Dazu ist auch die Entlüftungsschraube [8] des *Spark-Gaps* zu lösen. Nach Optimierung von Druck und Durchfluß kann der Laser in Betrieb genommen werden. Der Abstand der Elektroden des Laserkanals ist nun mit den seitlich angebrachten Stellschrauben (siehe Abbildung B5) so zu justieren, daß eine gleichmäßige funkenfreie Glimmentladung über dem gesamten Laserkanal stattfindet. Abschließend wird die Abdeckplatte auf dem Laserkopf befestigt und das vorher geöffnete Gehäuse des Lasers mit Kupferplatten verschlossen und verschraubt.

Diese hier beschriebene Reinigung wurde im Mittel nach ca. 300 000 Laserpulsen durchgeführt, mindestens aber einmal im Monat.

Zum Ende der Untersuchungen wurde das *Spark-Gap* in der Werkstatt aufgearbeitet. Insbesondere die Überarbeitung der durch Abbrand schon runzeligen Elektroden hat sich als vorteilhaft erwiesen. Eine Überarbeitung der Elektroden des Laserkanals könnte ebenfalls von Nutzen sein. Da die Elektroden des Laserkanals und das *Spark-Gap* durchaus als "Verschleißteile" eingestuft werden können, sollte im Interesse eines möglichst störungsfreien Betriebes am H1-Detektor eine Auswechslung des gesamten Laserkopfes erwogen werden.

Der Laserspiegel wurde nur einmal bei der allerersten Inbetriebnahme des Lasers eingestellt. Mit dieser Einstellung arbeitete der Laser über die gesamte Zeit dieser Untersuchungen, ohne daß eine wiederholte Justierung nötig wurde.

Anhang C

Zur Installation des Systemes

Der H1-Detektor wird in der Halle Nord aufgebaut. Abbildung C1 zeigt den H1-Detektor in der vorgesehenen Position im HERA-Ring. Rechts neben dem Detektor befindet sich der Elektronik-Trailer. Im Falle eines Umbaus werden Detektor und Trailer immer zusammen bewegt, so daß die Verbindungen in den Detektor, ob Kabel oder auch die Quarzglasfasern des Lasermonitorsystemes, nicht unterbrochen werden müssen.

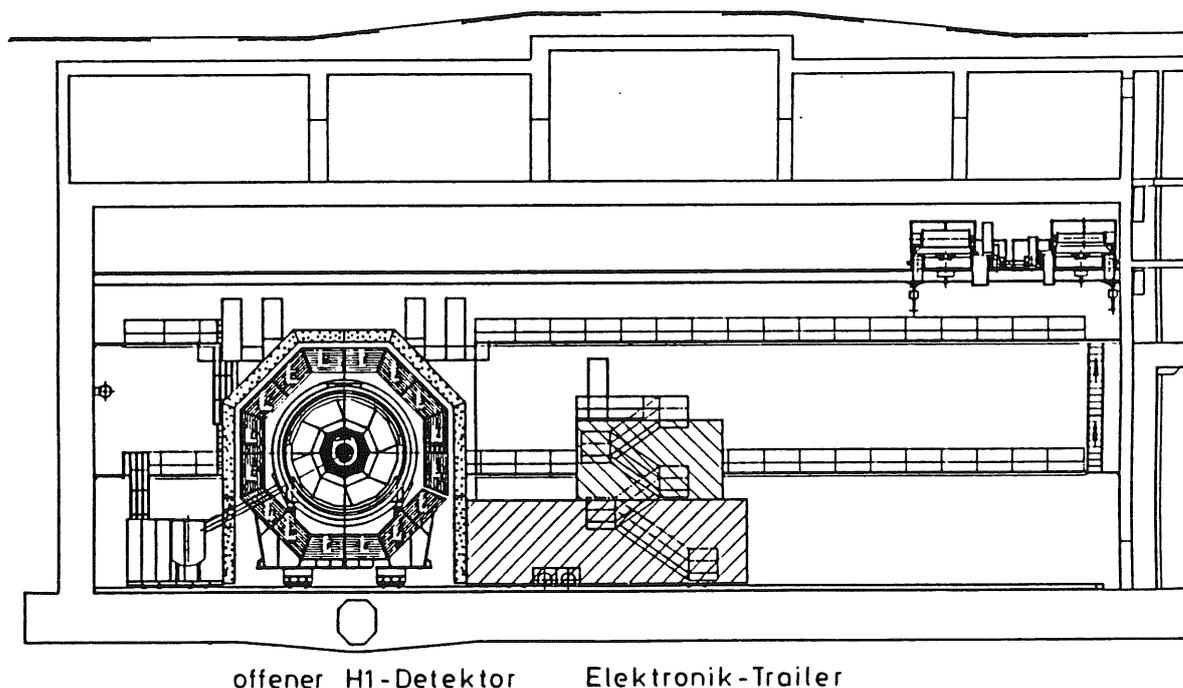


Abbildung C1: Der H1-Detektor in der Strahlposition; aus [TPR 87]

An der Rückseite des Elektronik-Trailers (siehe Abbildung C2) ist Platz für den Aufbau des Lasermonitorsystemes vorgesehen. In einem Gehäuse werden der Laser samt der laserseitigen Optik und die Hauptreferenzsysteme aufgebaut; dieses Gehäuse wird außenseitig an der Rückwand des Trailers befestigt. Direkt unterhalb dieses Gehäuses befindet sich eine Stickstoff-Flasche, aus der der Laser mit Stickstoff versorgt wird.

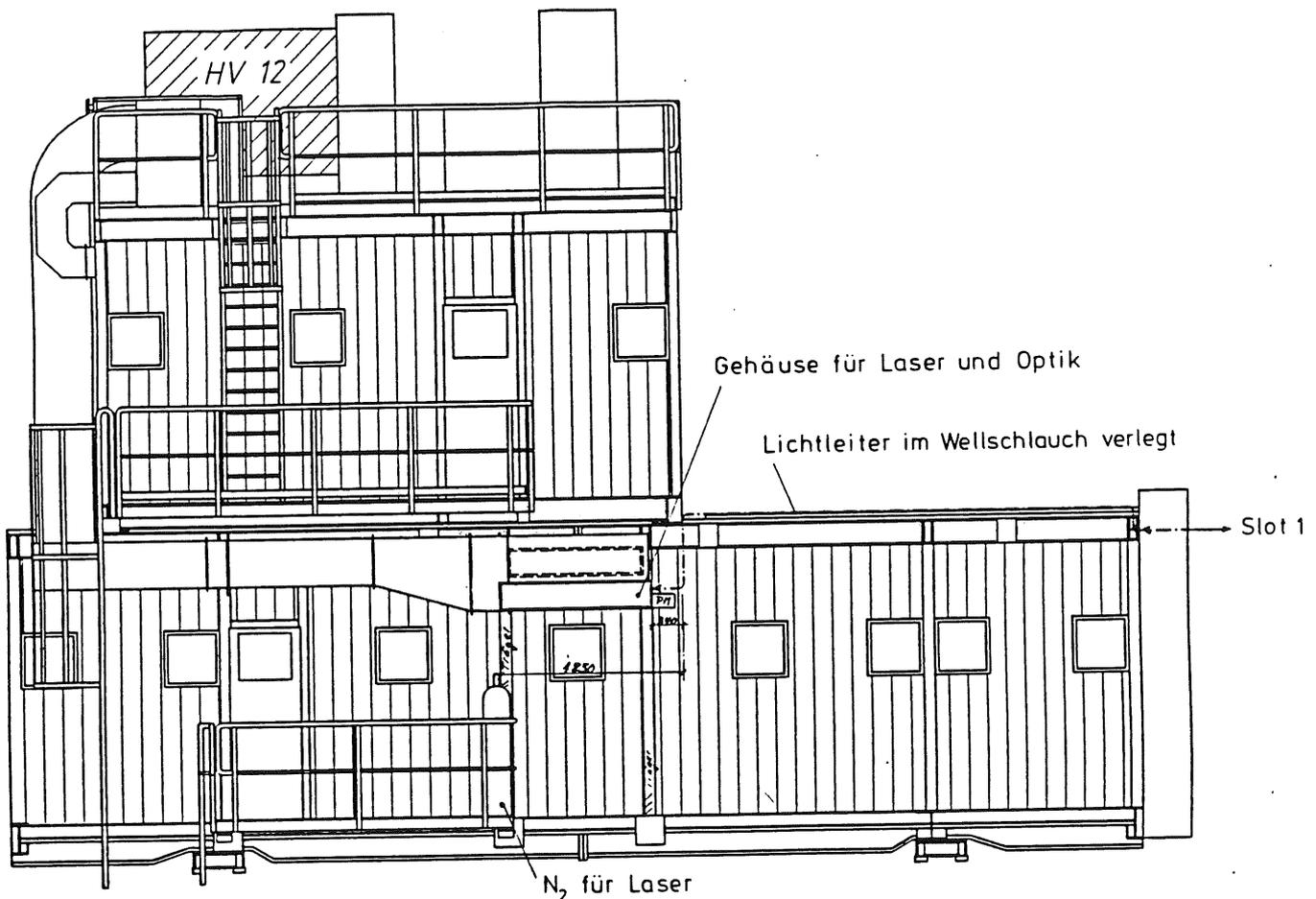


Abbildung C2: Rückwand des Elektronik-Trailers mit dem Gehäuse, in dem der Laser, die laserseitige Optik und die Hauptreferenzsysteme aufgebaut werden sollen. Vom Gehäuse führt der Welschlauch mit den Quarzglasfasern nach rechts zum H1 Detektor.

Von dem Gehäuse aus wird ein Welschlauch in den H1-Detektor verlegt. In diesem 17 m langen Welschlauch befinden sich die 4 Primärfasern und die 4 Referenzfasern. Im Detektor ist die Verlegung im Slot 1 vorgesehen: Das ist ein Kabelkanal, der direkt oberhalb der Tankmittelebene in Protonenrichtung auf der linken Seite in den Detektor verläuft (Abbildung C3).

Der Welschlauch muß auf dem gesamten Weg fixiert sein, um eine unkontrollierte Veränderung der Verlegeradien zu unterbinden. Es sollten zudem bei der Verlegung Radien, die kleiner als 20 cm sind, vermieden werden, da sonst - wie in Abschnitt 4.3.2 angesprochen - die Lebensdauer der Faser stark verkürzt wird.

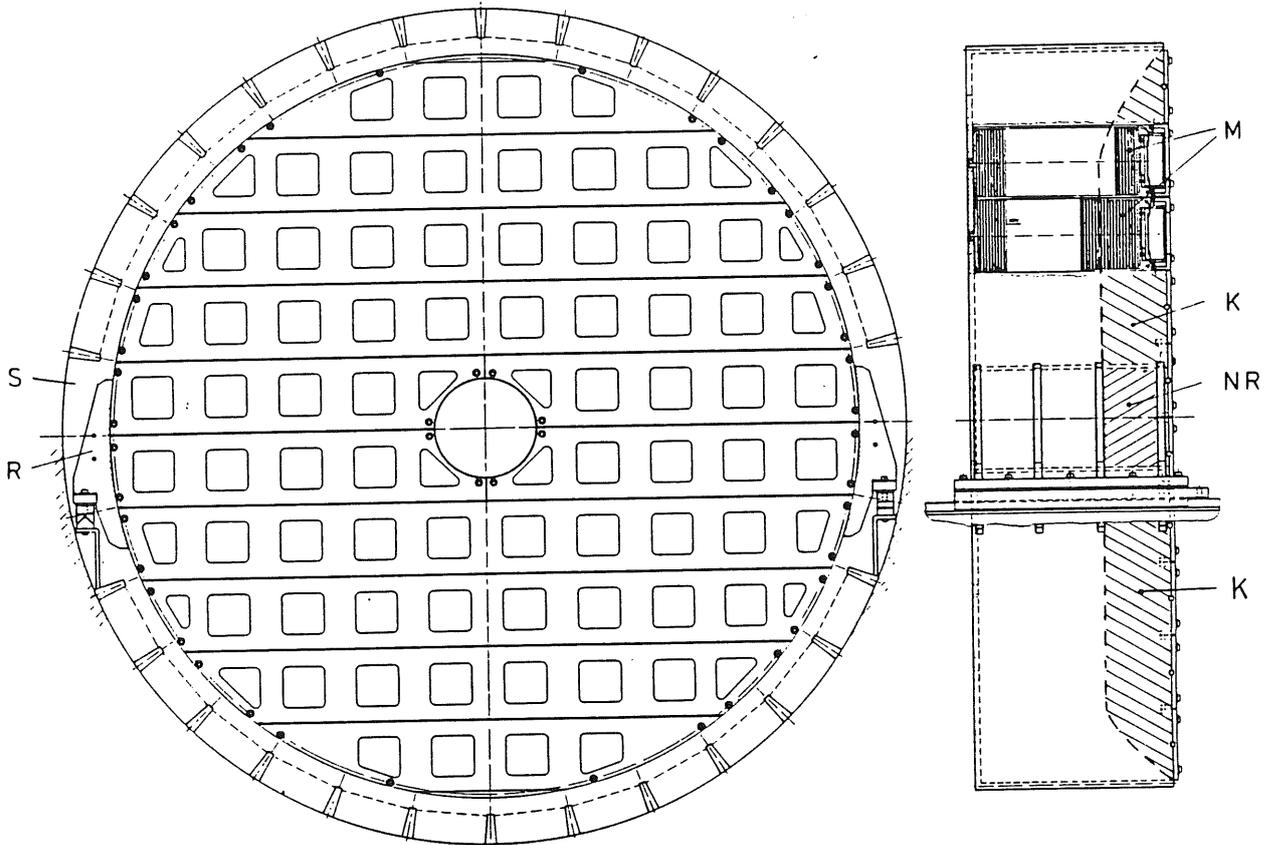


Abbildung C3: Aufbau des BEMC:

Das BEMC wird von zwei seitwärts angebrachten Füßen getragen. Der Verteiler wird auf der mit "R" gekennzeichneten Rippe montiert. Die Zuführung der Primärfasern und Referenzfasern erfolgt im Slot 1 (S). Der Längenausgleich der Sekundärfasern wird mit Kabeltrommeln im schraffierten Bereich (K) vorgenommen. Im mit "NR" bezeichneten Bereich zwischen zwei Rippen wird das Nebenreferenzsystem aufgebaut.

Der Wellenschlauch mit den 8 Quarzglasfasern endet kurz vor der letzten Stützrippe (R4 in Abbildung C4 b) am linken Fuß des BEMC. Die Fläche oberhalb dieser Stützrippe steht für die Montage des Verteilers zur Verfügung. In Abbildung C4 a ist der Verteiler in der vorgesehenen Position an der Stützrippe eingezeichnet.

Bei der Konstruktion des Verteilers muß auch darauf geachtet werden, daß der Aufbau nicht über die Fläche hinausragt und nicht höher als 4.5 cm über die Fläche hinausgeht. Er darf über die Flucht des BEMC nicht verlassen und in andere Bereiche (Veto-Wand, Kabelkanäle) hineinreichen. Dieser zur Verfügung stehende Platz ist in Abbildung C4 b schraffiert und mit "V" gekennzeichnet.

Von oben werden die Primärfasern an die Verteiler und die Referenzfasern an die Adapter gekoppelt. Auf der Strecke zwischen Ende des Wellenschlauches und den Kopplungsstellen müssen die Fasern fixiert werden, denn nur so kann verhindert werden, daß sich die Lichtverteilung am Ausgang des Mischers oder die Transmission der Referenzfasern verändert. Außerdem gewährleistet eine gute Vorrichtung für die Fixierung der Fasern auch eine reproduzierbare Verlegung und damit eine reproduzierbare Wiederankopplung der Fasern.

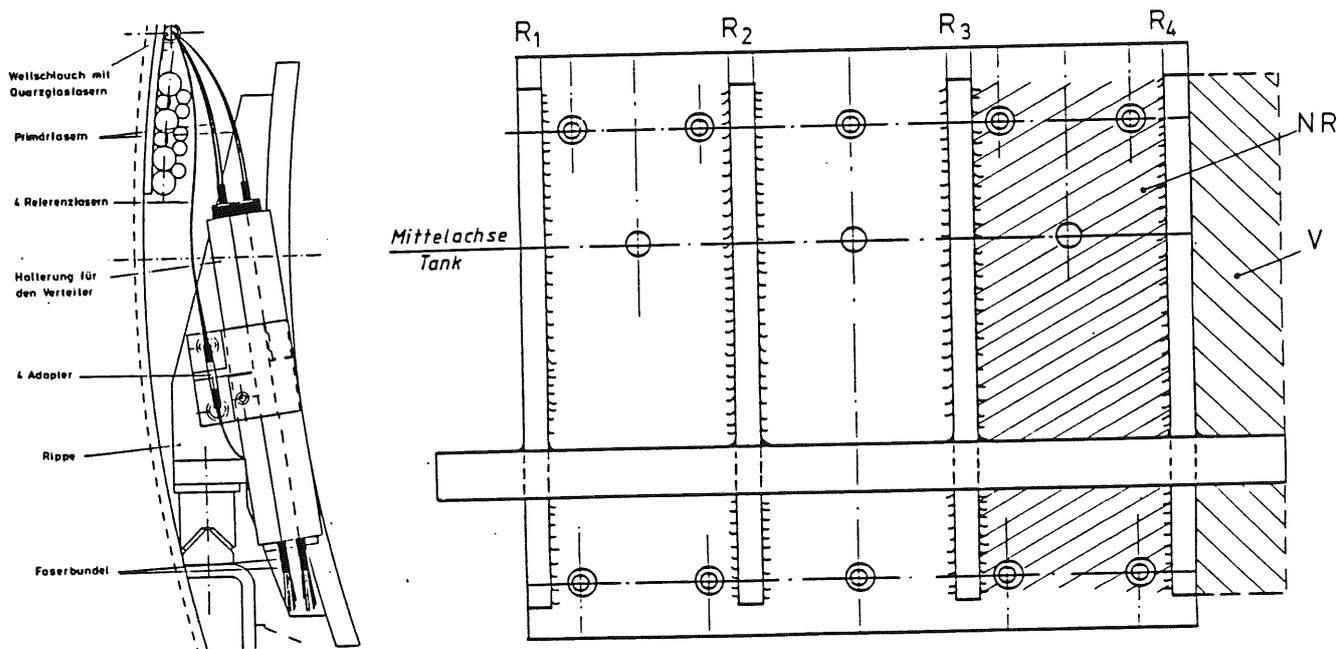


Abbildung C4: Fuß des BEMC mit dem montierten Verteiler

a: (links) Die letzte Stützrippe des BEMC mit dem montierten Verteiler
 b: (rechts) Seitenansicht vom Fuß des BEMC mit Rippen 1 - 4

Um auch von den redundant mitverlegten Primärfasern Nutzen zu haben, sollte Licht aus zwei Primärfasern in einen Verteiler eingestrahlt werden können, ohne daß am BEMC vor Ort eingegriffen werden muß. Dazu sollten unbedingt jeweils zwei Fasern verteilerseitig in einem Stecker konfektioniert werden (was polier-technisch nicht weiter problematisch ist): Eine Faser in optimaler Position und die zweite so nah wie möglich zur optimalen Position. Sollte dann einmal die Faser in der optimalen Position ausfallen, ist über die zweite Faser (die allerdings eine andere Lichtverteilung am Ausgang des Mischers hat) ein weiterer Betrieb des Lasermonitorsystemes möglich. Der Stecker muß für die notwendige winkeltreue Ankopplung eine Markierung besitzen.

Am unteren Ende der Stützrippe (siehe Abbildung C4 a) werden die beiden Faserbündel an die Verteiler angekoppelt. Die Faserbündel sollten - solange die Eichinformationen relevant und erhaltenswürdig sind - nicht abgekoppelt werden, da eine auf 1% genaue Wiederankopplung aller 115 Fasern eines Bündels ausgeschlossen werden kann. Eine Abkopplung der Faserbündel ist aber voraussichtlich auch nicht nötig, da eine ungehinderte Demontage aller Module möglich ist, weil jede einzelne Faser am Modul abgekoppelt werden kann.

Die Fasern der Faserbündel werden zur Verteilung hinter den Träger geführt. Hier sollte man eine Fixierung der Faserbündelstränge vornehmen, um Brüchen und langfristigen Veränderungen vorzubeugen.

Auf der Mantelfläche des Trägerringes (siehe in Abbildung C3 den schraffierten Bereich "K") ist die Montage von flachen "Kabeltrommeln" vorgesehen, um den Längenausgleich bei den Fasern vorzunehmen, der nach Möglichkeit auch zu einem Ausgleich der Transmission führt. Ist das geschehen, sollte dafür gesorgt werden, daß es zu keinen Veränderungen dieser Verlegung kommt. Schon kleine Veränderungen des Verlegeradius haben Auswirkungen auf die Transmission einer Faser (siehe Abschnitt 4.5.1) und somit auf das transportierte Monitorsignal.

Von diesen Kabeltrommeln aus werden die Fasern immer den Modulen einer Reihe zugeführt. Durch kleine Schlitze können die Fasern in die Elektronikgehäuse geführt werden, wo die Einkopplung des Lichtes in die letzte Szintillatorplatte vorgenommen wird.

Die Ankopplung der Sekundärfasern an die Module erfolgt nach dem in Abbildung C5 skizzierten Prinzip. Die Ferrülen, in denen die Sekundärfasern festgecrimpt sind (Beschreibung in Abschnitt 4.5.2), werden in einen Messingstecker geklebt. Dessen Länge ist so auf das in die Abschlußplatte getriebene Aluminiumrohr

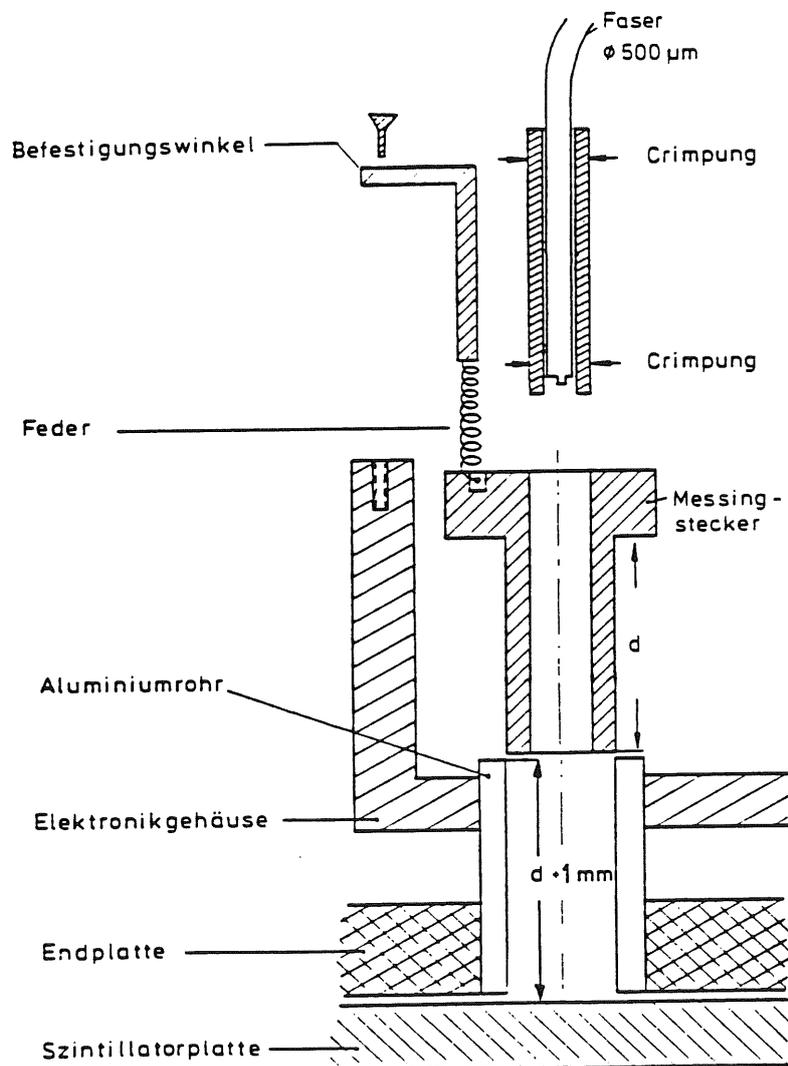


Abbildung C5: Kopplung der Sekundärfasern an die Module des BEMC

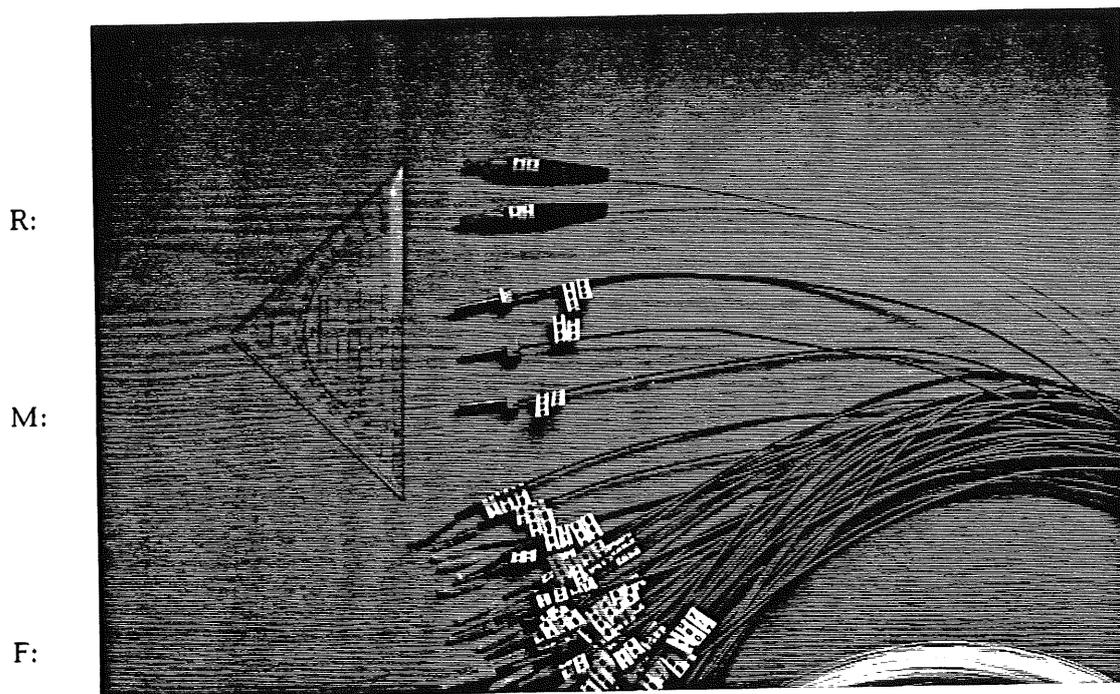


Abbildung C6: Die Stecker des Faserbündels:

- R: SMA-Stecker (Referenzfasern)
- M: Fasern in Ferrülen, eingeklebt in Messingstecker
- F: Fasern, eingecrimpt in Ferrülen

abgestimmt, daß sich das Faserende im montierten Zustand in ca. 1 mm Entfernung von der letzten Szintillatorplatte befindet. In die Nut des Messingsteckers wird von oben eine Metallfeder gesteckt, die am Elektronikgehäuse befestigt wird und für die Fixierung der Stecker im Aluminiumrohr sorgt. Durch die Form der Feder wird außerdem eine Verdrehung der Stecker verhindert.

Zwischen der vorletzten und letzten Stützrippe (R3 und R4 in Abbildung C4 b) wird der Raum "NR" für den Aufbau der Nebenreferenzsysteme genutzt. Da die Fasern zu den Nebenreferenzsystemen nicht abgekoppelt werden sollen, um bei Kopplungen der Referenzfasern renormieren zu können, ist somit deren Unzugänglichkeit bei eingebautem Zustand des BEMC nicht von Nachteil.

Alle anderen Fasern (einzelne Fasern, Primärfasern, Referenzfasern) sind - wie in Abschnitt 3.2.1 gefordert - auch im eingebautem Zustand des BEMC zugänglich und abkoppelbar.

Anhang D

Faseroptik und Faserdaten

Zum Verständnis der Angaben in Tabelle D1 soll hier zunächst eine kurze Einführung in grundlegende Fasereigenschaften gegeben werden:

Bei den im Lasermonitorsystem verwendeten HCS-Fasern¹ handelt es sich ausnahmslos um *Stufenindex-Multimode-Fasern* aus Quarzglas.

Die Fasern sind aus drei koaxialen Schichten aufgebaut (siehe auch Abbildung 4.5.1): In der Mitte sorgt der Kern (*Core*) aus hochreinem Quarzglas (SiO_2) für den Transport des Lichtes. Der dünne Mantel (*Cladding*) hat einen kleineren Brechungsindex als der Kern ($n_1 = 1.5$) und ist somit für die Lichteigenschaften (Totalreflexion) verantwortlich. Im Fall der verwendeten HCS-Fasern ist dieser Mantel aus einem harten Polymer gefertigt, der bei der Herstellung eine chemische Bindung mit dem Quarzglaskern eingeht; das bewirkt die hohe Zugfestigkeit und vermindert die Bruchgefahr. Außen sorgt ein zweiter Mantel (*Buffer* oder *Coating*) aus Tefzel für mechanische und chemische Beständigkeit.

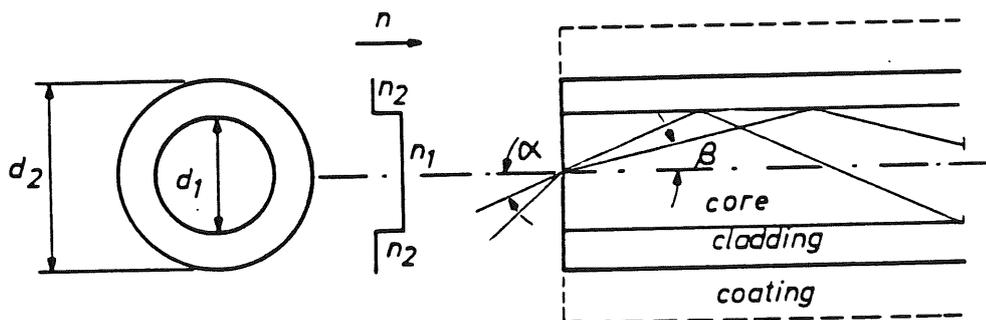


Abbildung D1: Aufbau einer Stufenindex-Multimode-Faser; aus [Hen 83]

Die optischen Eigenschaften der Faser werden im wesentlichen - wie Abbildung D1 zeigt - durch Kern und *Cladding* geprägt.

Die Kopplungseffizienz ist durch den Kernradius und die Numerische Apertur (NA) bestimmt. Es gilt für Strahlen, die im Faserkern durch Totalreflexion transportiert werden:

$$NA = n_1 \sin \beta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sin \alpha_{\max}$$

Das ergibt es einen Akzeptanzwinkel von: $\Omega = 4 \pi \sin^2 (\alpha_{\max} / 2)$

$$\approx \pi NA^2. \quad \text{für } \sin (\alpha_{\max} / 2) \ll 1.$$

¹ "Hard - Clad - Silica - Fiber", Hersteller: Ensign - Bickford Optics Company

Ist $2R$ der Kerndurchmesser, so charakterisiert die schraffierte Fläche der nebenstehenden Grafik aus [Hen 83] die totale Akzeptanz. Es ist einsichtig, daß in Fasern mit großem Kerndurchmesser und großer Numerischer Apertur auch große Leistungen eingekoppelt werden können (was ja auch ein Entscheidungskriterium für die Verwendung der HCS-Faser mit $1000 \mu\text{m}$ Kerndurchmesser war).

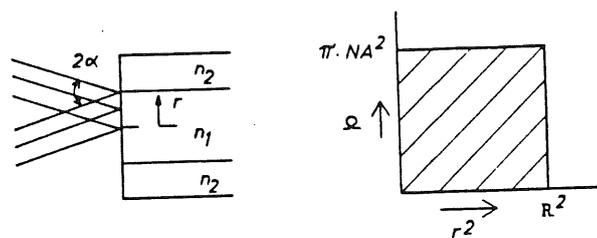


Abbildung D2: Akzeptanz einer Stufenindex-Faser

Die Transmission einer Faser wird durch drei verschiedene Prozesse geschwächt: Durch Absorption, durch Krümmungsverluste und durch Rayleigh-Streuung.

Die Absorption geschieht an Verunreinigungen im Faserkern, z.B. an OH^- -Ionen; sie absorbieren aber - wie andere Verunreinigungen auch - im infraroten Bereich. Da im Lasermonitorsystem aber UV-Lichtpulse transportiert werden sollen, sind die Verluste durch Absorption zu vernachlässigen.

Krümmungsverluste sind im 4. Kapitel schon besprochen worden; sie sind zwar bemerkbar und deshalb auch relevant, sind von der Größe des Effektes aber nicht zu vergleichen mit den Verlusten durch Streuung.

Die Verluste durch Rayleigh-Streuung werden durch mikroskopische Inhomogenitäten des Glases verursacht. Licht wird an Orten, an denen der Brechungsindex schwankt, gestreut. Diese Strukturen des Glases sind sehr viel kleiner als die Wellenlänge des nahen UV. Die Abschwächung wird deshalb mit wachsender Wellenlänge abnehmen, sie ist proportional zu λ^{-4} , was bei [Sch 89] verifiziert wurde. Leider ist die Abschwächung durch Rayleigh-Streuung gerade im UV-Bereich sehr wirkungsvoll, weshalb in Tabelle D1 die Werte der Abschwächung bei 337 nm erschreckend hoch und die Abschwächlängen sehr klein sind.

Die Abschwächlänge δ wird üblicherweise in Metern angegeben, und ist ein Maß für die Strecke, nach der noch $1/e$ der ursprünglichen Intensität vorhanden ist. Oft erfolgt die Angabe der Abschwächung A in der Einheit db/km . Die Umrechnung ist:

$$A (\text{db/km}) = 4343 / \delta (\text{m}).$$

Die transportierte Intensität nimmt exponentiell ab:

$$I(x) = I(0) \cdot \exp(-x/\delta).$$

Zu den Transmissionseigenschaften gehört auch der Einfluß der Faser auf die Form des Lichtpulses. Bei allen im Lasermonitorsystem verwendeten Fasern ist der Kerndurchmesser wesentlich größer als die Wellenlänge, so daß es sehr viele quasikontinuierliche Lösungen der Wellengleichung gibt. Man spricht deshalb auch von Multimode-Fasern. Bei diesen Fasern ist somit die Strahl-optik anwendbar, mit der Folge, daß Veränderungen der Pulsform möglich sind. Insbesondere die Pulsverbreiterung soll hier erläutert werden: Verschiedene Moden verhalten sich in einer Faser unterschiedlich ("Multimode-Dispersion"). Extremfälle sind: *Core-Mode* und *Cladding-Mode*.

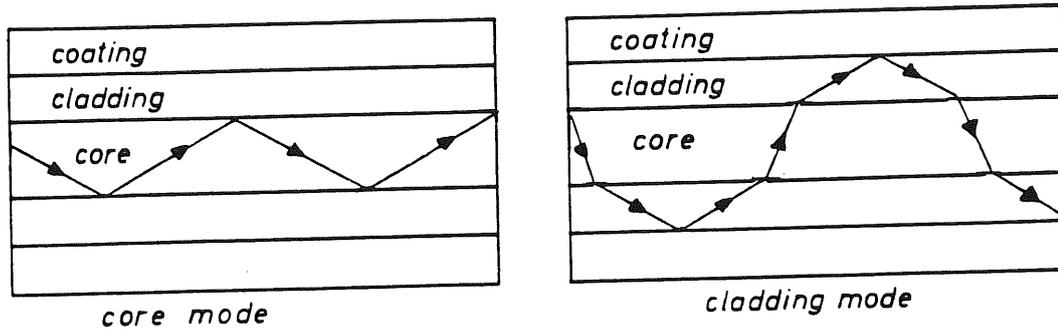


Abbildung D3: Moden in einer Stufenindex-Multimode-Faser; aus [Hen 83]

Die Folge dieser Multimode-Dispersion sind unterschiedliche Laufzeiten. Für den Laufzeitenunterschied Δt_{mod} gilt laut [Hen 83]:

$$\Delta t_{\text{mod}} = \frac{NA^2}{2nc} L$$

L: Länge der Faser
n: Brechungsindex des Kernes
c: Lichtgeschwindigkeit

Als charakteristische Größe wird die optische Bandbreite angegeben. Sie ist definiert:

$$f_{3\text{db}} = 0.44 / \Delta t_{\text{mod}}$$

Die Pulsverbreiterung wird im Allgemeinen noch verstärkt durch die chromatische Dispersion, die aber im Fall von Multimode-Fasern vernachlässigt werden kann.

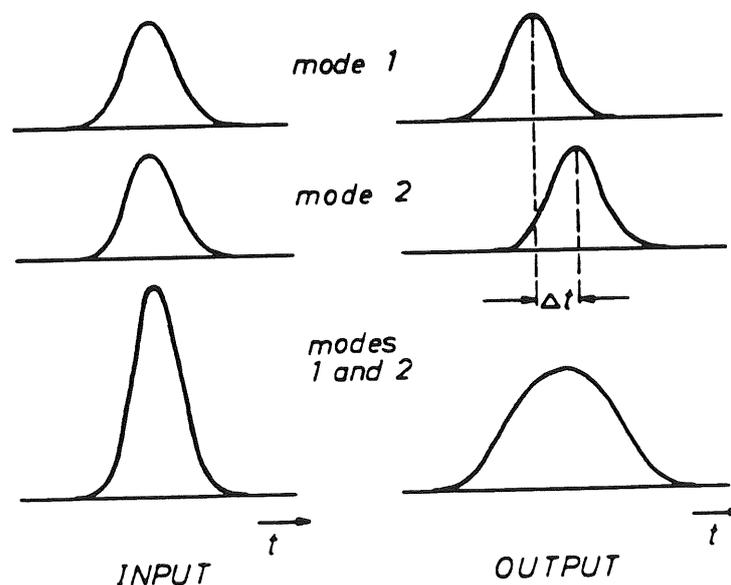


Abbildung D4: Pulsverbreiterung durch Multimode-Dispersion; aus [Hen 83]

In der folgenden Tabelle sind die wesentlichen und relevanten Faserdaten der Fasern (Herstellerangaben) zusammengestellt, die zu Testzwecken und endgültig im Lasermonitorsystem verwendet wurden/werden:

Faser: eingesetzt als:	HCN-M1000T-14 Primärfaser	HCN-M0200T-12 Testfaser	HCR-M0200T-05 Sekundärfaser	HCR-M0600T-06 Referenzfaser
Durchmesser (μm): Kern:	1000 +/- 15	200 +/- 5	200 +/- 5	600 +/- 10
Mantel:	1035 +/- 15	225 +/- 5	230 + 0 / -10	630 +/- 10
Buffer:	1400 +/- 50	500 +/- 50	500 +/- 50	1040 +/- 40
$R_{\text{Mantel}} : R_{\text{Kern}}$	0.97	0.89	0.87	0.95
Auf Festigkeit getestet bis (<i>kpsi</i>):	20	100	200	50
(<i>GPa</i>):	0.14	0.69	1.38	0.34
Empfohlener ¹ minimaler Verlegeradius (<i>mm</i>):	200	25	12	150
Numerische Apertur (2 <i>m</i> , 5% Intensität):	0.37	0.37	0.37	0.37
(1 <i>km</i> , 5% Intensität):	0.3	0.3	0.3	0.3
(5 <i>m</i> , UV-Spektrum):		0.17 ²	0.19 ^{2,3}	
Grenzwinkel α_{max} (<i>Grad</i>): (5 <i>m</i> , UV-Spektrum)		9.80 ²	10.96 ^{2,3}	
Abschwächung bei 820 <i>nm</i> (<i>db/km</i>):	14	12	5	6
Abschwächung bei 337 <i>nm</i> (<i>db/km</i>):		760 ²	> 1340 ^{2,3}	
Abschwächlänge bei 337 <i>nm</i> (<i>m</i>):		5.7 ²	< 3.2 ^{2,3}	
Konzentration von OH^- -Ionen (<i>ppm</i>):	1200	1200	2	2
Konzentration von Chlor (<i>ppm</i>):	500	500	7000	7000
Bandbreite (<i>MHz km</i>):	k. A.	17	17	9
(<i>ns / km</i>):		26	26	49

1 für eine Lebensdauer von 20 Jahren

2 aus [Sch 89]

3 Nach [Dos 89] vergleichbar mit der HCP Faser

Tabelle D1: Faserdaten der verwendeten HCS-Fasern

Literaturverzeichnis

- [Bau 89 a] Bauhoff, W.
Simulationsrechnung mit GEANT - unveröffentlicht -
I. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg (1989)
- [Bau 89 b] Bauhoff, W.
Simulationsrechnung mit GEANT - unveröffentlicht -
I. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg (1989)
- [Bas 85] Bassler, E.
"GEP - Graphical Editor Program for Presenting User Data"
Internal Report, DESY R02-81/02 (1985)
- [Ber 76] Bergmann, E.
"uv TEA laser with 760-Torr N₂"
Applied Physics Letters, Vol. 28, No. 2 (1976)
- [Cou 72] Courtens, E.
"Nonlinear Coherent Resonant Phenomena"
aus: Laserhandbook Vol. 2
Herausgeber: Arecchi, F.
North Holland Publishing Company (1972)
- [Cra 59] Craggs, J. ; Massey, H.
"The Collisions of Electrons with Molecules"
aus: Handbuch der Physik, Bd 37/1: Atome III/Moleküle I
Herausgeber: Flüge, S.
Springer-Verlag (1959)
- [Dre 86] Drescher, A. et al.
"Calibration and Monitoring of the Argus Shower Counters"
DESY 86-019 (1986)
- [Ens 89] Ensign-Bickford Optics Company
Datenblätter FRM039 und FNM0389 (1989)
- [Fel 85] Feltesse, J
H1-Note 85/05-17 (1985)
- [Fin 64] Fink, E. ; Welge, K.
"Lebensdauer der Elektronenzustände N₂, N₂⁺, NH und PH"
Zeitschrift für die Naturforschung, Vol. 19a (1964)

- [Fit 76] Fitzsimmons, W. et al.
"Experimental and Theoretical Investigation of the Nitrogen Laser"
IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 12 No. 10 (1976)
- [Ger 82] Gerthsen, C. ; Kneser, H. ; Vogel, H.
"Physik"
Springer-Verlag (1982)
- [Gri 90] Griebel, R.
Diplomarbeit in Vorbereitung
I. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg (1990)
- [Har 90] Hartmann, T.
"Untersuchungen zum Verhalten von Plastiksintillatoren in
Magnetfeldern bis 1.65 T"
Diplomarbeit
I. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg (1990)
- [Hea 63] Heard, H.
"Ultraviolet Gas Laser at Room Temperature"
Nature 200, 667 (1963)
- [Hen 83] Hentschel, Chr.
Fiber Optics Handbook
Hewlett-Packard GmbH (1983)
- [Hol 90] Hollik, W.
"Status des Standardmodells"
Vortrag auf der DPG-Frühjahrstagung 1990 in Hamburg
- [Käm 89] Kämmler, B.
"Aufbau des Lichtpulsers für den CRYSTAL BARREL Detektor und Unter-
suchungen der Eigenschaften und Funktionsweise von Xenon-Blitzlampen"
Diplomarbeit
I. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg (1989)
- [Kle 87] Kleinknecht, K.
"Detektoren für Teilchenstrahlung"
Teubner Studienbücher (1987)
- [Loh 83] Lohrmann, E.
"Einführung in die Elementarteilchenphysik"
Teubner Studienbücher (1983)
- [Loh 86] Lohrmann, E.
"Hochenergiephysik"
Teubner Studienbücher (1986)

- [Mat 63] Mathias, L. ; Parker, J.
"Stimulated Emission in the Band Spektrum of Nitrogen"
Appl. Phys. Lett., Vol. 3, No. 1 (1963)
- [Mom 86] Momayezi, M.
"Ein lasergestütztes Kalibrationssystem für einen schnellen
Szintillationsdetektor"
Diplomarbeit
Kernforschungszentrum Karlsruhe (1986)
- [Oft 87] Ofti Datenblatt
DS 202 688 (1987)
- [Pat 72] Patterson, E. et al.
"Intense-electron-beam excitation of the 3371 Å N₂ laser system"
Appl. Phys. Lett., Vol. 21, No. 6 (1972)
- [Pei 87] Peitzmann, T.
"Kalibration eines Bleiglas Detektors und Untersuchung von
Ortsrekonstruktionsmethoden"
Diplomarbeit
Institut für Experimentalphysik, Universität Münster (1987)
- [Pep 89] Peppel, E.
"Untersuchungen an einem Prototyp-Segment aus vier Modulen des elek-
tromagnetischen Rückwärtskalorimeters für den H1-Detektor bei HERA"
Diplomarbeit
I. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg (1989)
- [Per 87] Perkins, D.
"Introduction to High Energy Physics"
Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (1987)
- [PRA 88] PRA Laser Inc.
LN 120 C - Operating Manual (1988)
- [Ruc 88] Ruckstuhl, W.
"Monitoring System for the BGO Calorimeter of the L3-Detektor"
Vortrag in Hamburg, 27.6.88
- [Sac 78] Sachs, L.
"Angewandte Statistik"
Springer-Verlag (1978)
- [Sca 85] Scaffardi, L. et al.
"Cascade population mechanism in nitrogen lasers"
Applied Optics, Vol. 24, No. 1 (1985)

Literaturverzeichnis

- [Sch 89] Schrader, C.
 "Ein Monitorsystem für das rückwärtige elektromagnetische Kalorimeter bei H1-HERA"
 Diplomarbeit
 I. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg (1989)
- [Sku 85] Skutnik, B. et al.
 "High Strength, Reliable, Hard Clad Silica (HCS) Fibers"
 in FOC/LAN 85 Proc., 232 (1985)
- [Sku 88] Skutnik, B. et al.
 "Radiation Behaviour of Pure Silica Core Optical Fibers"
 SPIE Vol. 992 (1988)
- [Spi 87] Katalog "Präzessionsoptik" der Firma Spindler & Hoyer
 Göttingen (1987)
- [Ssc 91] Schrieber, S.
 Diplomarbeit in Vorbereitung
 I. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg (1991)
- [Thi 85] Thiesmeyer, D.
 "Aufbau und Test eines Laser-Kalibrations-Systems für den SAPHIR-Detektor"
 Diplomarbeit
 Physikalisches Institut, Universität Bonn (1985)
- [TPR 87] Technical Progress Report 1987
 H1 - Collaboration
- [TPR 89] Technical Progress Report 1989
 H1 - Collaboration
- [Ulr 90] Ulrich, R.
 Persönliche Mitteilung
 Technische Universität Hamburg-Harburg (1990)
- [Wag 74] Wagner, K.
 "Nachleuchten von Ar, N₂, N₂⁺ und CH₄ nach Stoßionisation"
 Zeitschrift für die Naturforschung, Vol. 29 a (1974)
- [Wie 86] Wienke, R.
 "Aufbau des Blei-Glas-Kalorimeters SAPHIR"
 Diplomarbeit
 Institut für Kernphysik, Universität Münster (1986)

- [Wol 86] Wolf, G
"HERA: Physics, Machine and Experiments"
DESY 86-089 (1986)
- [Woo 73] Woodward, B. et al.
"A Reliable, Repetitively Pulsed, High-Power Nitrogen Laser"
Rev. Sci. Instrum., Vol. 44, No. 7 (1973)
- [Wun 88] Wunderlich, R.
"Untersuchungen an einem Prototyp-Doppelmodul des elektro-
magnetischen Rückwärtskalorimeters für den H1-Detektor bei HERA".
Diplomarbeit
I. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg (1988)
- [Zap 65] Zapesochnyi, I.
"The Cross Sections for the Excitation of Molecular Nitrogen Levels
by Electron Collision"
Opt. Spectry., Vol. 21, 83 (1966)
- [ZEU 87] ZEUS-Kollaboration
Statusreport 1987, Kapitel 5

Danksagung

Diese Diplomarbeit entstand im Bereich Teilchenphysik am I. Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg. Zum Abschluß möchte ich allen Mitgliedern danken, die sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Insbesondere bedanken möchte ich mich

bei Herrn Prof. H. H. Duhm, Herrn Prof. R. Langkau und Herrn Prof. W. Scobel für die interessante Aufgabenstellung und die gute Betreuung,

bei den Mitgliedern der H1-Gruppe, insbesondere bei Herrn M. Gennis für die vielen Tips und Hilfestellungen,

bei der Werkstatt des I. Instituts, insbesondere bei Herrn B. Leicht und Herrn H. Wleklinsky für die schnelle und präzise Anfertigung der mechanischen Bauteile,

bei Frau M. Berghaus für das sorgfältige Anfertigen zahlreicher Abbildungen,

beim technischen Stab des I. Instituts für die Bereitstellung verschiedener Hilfsmittel und die vielfältige Unterstützung bei allen technischen Problemen.

Den Abschluß meiner Diplomarbeit möchte ich zum Anlaß nehmen, mich für alle Hilfe, Unterstützung und Rücksichtnahme während meines Studiums zu bedanken, insbesondere bei meiner Mutter, bei Karin, bei Frau R. Oppenkowski und bei Frau E. Lorentzen.

Ich versichere, diese Arbeit unter Angabe aller wesentlichen Quellen und Hilfsmittel selbstständig verfaßt zu haben.

Törnesch, im August 1990