

# Umbau des Large Angle Triggersystems des COMPASS Experiments

von

**Andreas Döder**



JOHANNES GUTENBERG  
UNIVERSITÄT MAINZ

Bachelorarbeit in Physik  
vorgelegt dem Fachbereich Physik, Mathematik und Informatik (FB 08)  
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz  
am 26.11.2012

1. Gutachter: Priv.-Doz. Dr. Eva-Maria Kabuß
2. Gutachter: Prof. Dr. Lutz Köpke



Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Mainz, den 26.11.2012

Andreas Düdler  
COMPASS  
Institut für Kernphysik  
Johann-Joachim-Becher-Weg 45  
Johannes Gutenberg-Universität D-55099 Mainz  
aduedder@students.uni-mainz.de



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Das COMPASS-Experiment . . . . .	1
1.1.1. aktuelle Messungen . . . . .	1
1.2. Der Strahl des CERN-SPS . . . . .	2
1.3. Das Target . . . . .	2
1.4. Das Spektrometer . . . . .	2
1.4.1. Die COMPASS-Datennahme . . . . .	4
1.4.2. Das Triggersystem . . . . .	4
1.4.3. Aufbau des LAS Triggersystems . . . . .	5
1.4.4. Der Aufbau des Hodoskops H1 . . . . .	5
1.5. Erzeugung des Triggersignals . . . . .	7
1.6. Szintillatoren . . . . .	10
1.7. Photomultiplier . . . . .	10
<b>2. Modifikation des Hodoskops H1</b>	<b>13</b>
2.1. Hinweise zum Umgang mit den Materialien . . . . .	14
2.2. Kleben von Lichtleitern und Szintillatoren . . . . .	15
2.2.1. Vorbereitung der Lichtleiter . . . . .	15
2.2.2. Vorbereitung der Szintillatoren . . . . .	15
2.2.3. Klebevorgang . . . . .	17
2.3. Vorbereitung der Szintillatoren zum Einbau . . . . .	17
2.4. Demontage H1 . . . . .	18
2.5. Vorbereitung der Rohacellplatten . . . . .	18
2.6. Bau der Gruppe . . . . .	19
2.6.1. Ausrichten der Komponenten . . . . .	19
2.6.2. Vorbereitung der Luftlichtleiter . . . . .	20
2.6.3. Zusammensetzen der Gruppe . . . . .	20
2.7. Einbau in das Hodoskop . . . . .	23
2.7.1. Prüfen auf Lichtdichtigkeit . . . . .	23
<b>3. Inbetriebnahme</b>	<b>27</b>
3.1. Verkabelung . . . . .	27
3.2. Einstellen der Hochspannung . . . . .	28
3.3. Zeitanpassung des LAS-Triggers . . . . .	28
3.4. Zählraten von H1 . . . . .	29

## *Inhaltsverzeichnis*

3.5. Zeitspektren von H1 . . . . .	31
3.5.1. Zeitspektren der einzelnen Kanäle . . . . .	32
3.5.2. Bestimmung der Lochbreite aus dem Spektrum der Zeitdifferenzen	34
3.6. Vermessung des Hodoskops mit rekonstruierten Spuren . . . . .	41
<b>4. Fazit</b>	<b>45</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>47</b>
A.1. Haltegestell zum Kleben der Szintillatoren . . . . .	47
A.2. Reparatur einer fehlerhaften Klebung . . . . .	47
A.3. Einbau von H1 . . . . .	49
A.4. Zuordnung der Verkabelung . . . . .	55
A.5. Zählraten von H1 . . . . .	57
A.6. Zeitspektren . . . . .	60
A.7. Lorentzfits der Simulation der Verschiebung der Peaks . . . . .	63
A.8. Lorentzfits an die aufgenommenen Spektren . . . . .	64
A.9. Daten der Iteration zur Bestimmung der Lochbreite . . . . .	65
A.10. Schaltplan der Photomultiplierbasis . . . . .	66
A.11. Konstruktionszeichnung der Lichtleiter . . . . .	67
A.12. Mathematica-Quellcode zur iterativen Bestimmung der Lochbreite . .	68
A.13. Quellcode des UserEvents . . . . .	72

# 1. Einleitung

## 1.1. Das COMPASS-Experiment

Das COMPASS-Experiment (COMmon Muon Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy) [5] ist ein Fixed-Target-Experiment am SPS-Beschleunigerring am CERB. Das Ziel des Experiments ist die Vermessung des Quark- und Gluonenbeitrags zum Protonspin (Myonprogramm) und die Spektroskopie exotischer Mesonen (Hadronprogramm).

### 1.1.1. aktuelle Messungen

Ab Ende Oktober wurden am COMPASS-Experiment Messungen zur tief virtueller Comptonstreuung (Deep Virtual Compton Scattering, DVCS) durchgeführt [6]. Damit soll die dreidimensionale Struktur der Nukleonen, insbesondere durch die Analyse der generalisierten Partonverteilung (Generalized Parton Distribution, GPD), untersucht werden.

Bei DVCS werden Leptonen, in diesem Fall Antimyonen  $\mu^+$ , an einem Proton gestreut. Während des Streuprozesses wird ein virtuelles Photon ausgetauscht, das nach einem Impulsübertrag auf das Proton in ein reelles Photon umgewandelt wird (Abb. 1.1).

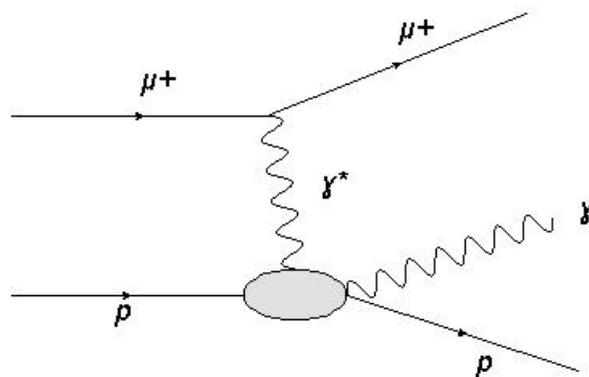


Abb. 1.1.: Feynmandiagramm eines DVCS-Prozesses

## 1. Einleitung

### 1.2. Der Strahl des CERN-SPS

Das SPS<sup>1</sup> (Super Proton Synchrotron) ist nach dem LHC (Large Hadron Collider) der zweitgrößte Kreisbeschleuniger am CERN. Er liefert einen Protonenstrahl mit einer Energie von bis zu  $400 \frac{\text{GeV}}{c^2}$  und  $1,2 \times 10^{13}$  Protonen auf dem Target T6 pro Beschleunigungszyklus (Spill).

Bei der Reaktion der Protonen mit T6 werden vor allem positiv geladenen Pionen  $\pi^+$  und Kaonen erzeugt. Etwa 10% der erzeugten Pionen zerfallen auf einer 600 m langen Zerfallsstrecke in Myonen ( $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ). Da nur linkshändige Neutrinos existieren und der Spin der beiden Zerfallsprodukte auf Grund der Drehimpulserhaltung entgegengesetzt sein muss, ist der resultierende Myonenstrahl polarisiert. Der Polarisationsgrad beträgt  $80 \pm 4\%$ . Er ist abhängig von der Energie der zerfallenden Pionen. Die verbleibenden Pionen und andere Hadronen können am Ende der Zerfallsstrecke mit einem Absorber herausgefiltert werden. Der Strahl wird dann über eine ca. 400 m lange Strecke zum Experiment geleitet. Dabei werden nur die Teilchen mit dem gewünschten Impuls selektiert und außerdem wird in der Beam Momentum Station (BMS) der Impuls jedes einzelnen Myons gemessen. Im Fall des Hadronenstrahls (Strahlführung ohne Absorber) ist eine Teilchenidentifikation möglich.

So kann ein polarisierter Myonenstrahl von bis zu 200 GeV Strahlenergie und  $2 \times 10^8$  Myonen pro Zyklus oder ein Hadronenstrahl mit bis 220 GeV in das Experiment geleitet werden.

### 1.3. Das Target

Der durch Kollision des Protonenstrahls des SPS mit T6 gewonnenen Strahl wird auf das eigentliche Target des Experiments gelenkt. Für die DVCS-Messungen wird flüssiger Wasserstoff in einem 2,5m langen Vakuumbehälter aus Mylarfolie in einem Behälter aus Kohlefaser verwendet. Um das Target ist ein Rückstoßprotonendetektor (Recoil Proton Detector, RPD) installiert. Dieser besteht aus zwei das Target umgebenden Szintillaterringen und dient dem Nachweis und der gestreuten Protonen. Durch die Flugzeitmessung zwischen den einzelnen Stufen des RPD kann außerdem die Geschwindigkeit der Rückstoßprotonen bestimmt werden.

### 1.4. Das Spektrometer

An das Target schließt sich das Spektrometer an. In diesem Experiment wird ein zwei-stufiges Spektrometer verwendet. Die erste Stufe (Large Angle Spectrometer, LAS) dient dem Nachweis von Teilchen mit großen Streuwinkel, die zweite (Small Angle Spectrometer, SAS) der Bestimmung von Teilchen mit kleinen Streuwinkeln. Eingangs beider Spektrometer befindet sich, hinter Spurdetektoren zur Vermessung der Teilchenbahn, jeweils ein Dipolmagnet (SM1: 1Tm und SM2: 4,4Tm), der die Teilchen abhängig von Impuls und Ladung verschieden stark horizontal ablenkt und somit eine

---

<sup>1</sup>weitere Informationen: <http://public.web.cern.ch/public/en/research/SPS-en.html>



## 1. Einleitung

Nach der Bestimmung der Geschwindigkeit der Teilchen im RICH-Detektor kann die Ruhemasse aus dem Impuls bestimmt werden. So können alle zur Teilchenidentifikation notwendigen Parameter evaluiert werden.

An dieser Stelle sei auch noch das Orientierungssystem des COMPASS Experiments kurz beschrieben. Die Richtungen werden als strahlauf- oder strahlabwärts und nach den großen Gebirgen als Jura oder Salève angegeben. Dabei ist Jura strahlabwärtsblickend links und Salève rechts.

### 1.4.1. Die COMPASS-Datennahme

Die Rohdaten der einzelnen Detektoren werden aufgezeichnet mit DaqDataDecoding und MySQL DataBase dekodiert. Diese Daten können dann mit CORAL (Compass Reconstruction and AnaLysis) zu Ereignissen mit rekonstruierten Spuren zusammengefasst werden. Die Analyse der Daten, das heißt die Auswahl der gewünschten Ereignisse wird dann mit PHAST (PHysics Analysis Software Tool) vorgenommen.

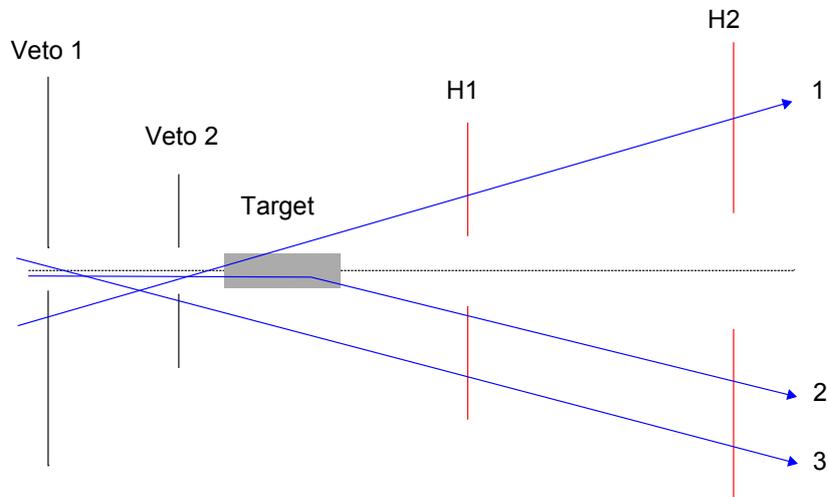
Während der Datennahme können einfache Studien wie die Aufzeichnung von Raten mit COOOL (Compass Object Oriented OnLine) durchgeführt werden.

### 1.4.2. Das Triggersystem

Bei der Auslese sollen natürlich nur Daten, die für die physikalische Auswertung relevant sind, aufgezeichnet werden. Das Speichern aller aufgenommenen Signale wäre angesichts der Menge technisch auch nur schwer umsetzbar und würde zudem zu erheblichem Mehraufwand bei der Rekonstruktion führen. Aus diesem Grund muss ein Triggersystem verwendet werden [3]. Das COMPASS-Experiment nutzt ein Hadwaretriggersystem. Dieses besteht aus Hodoskopen, Detektoren aus Szintillatorstreifen, die mit Photomultipliern ausgelesen werden. Außerdem kann auch der, in den Kalorimetern bestimmte, Energieverlust mit in die Triggerentscheidung einbezogen werden. Um eine Triggerinformation zu erhalten, werden die Hodoskope immer paarweise ausgewertet. So kann mit einer durch die Streifenbreite des Hodoskops beschränkten Genauigkeit die Spur der Teilchen zurück verfolgt werden. Wird mit horizontal angeordneten Streifen die vertikale Komponente der Teilchenspur gemessen, so kann die Spur bis zum Target zurückverfolgt werden und damit sichergestellt werden, dass das Teilchen aus dem Target kam. Dieser Aufbau eignet sich zum Selektieren von Ereignissen mit großen Streuwinkeln  $\theta \geq 5$  mrad, die bei großen Impulsüberträgen auftreten.

Mit vertikal angeordneten Szintillatorstreifen kann durch die Ablenkung des Magneten auf den Impuls der gestreuten Teilchen geschlossen werden. Da dieses System nur im SAS angewandt wird, soll hier nicht weiter darauf eingegangen werden.

Um Ereignisse auszuschließen, die nicht durch den Hauptstrahl, sondern durch einen diffusen Rand (Strahlhalo) verursacht wurden, sind eingangs des Spektrometers Hodoskope als Vetodetektoren angebracht (Abb. 1.3). Wird hier ein Teilchen nachgewiesen, so wird generell nicht ausgelesen.



**Abb. 1.3.:** Schematische Darstellung der Funktionsweise des Vetos. Die Spuren 1 und 3 werden trotz des Nachweises in H1 und H2 nicht ausgegeben, da sie in dem Vetosystem ausgelöst haben.

### 1.4.3. Aufbau des LAS Triggersystems

Das Triggersystem im LAS besteht aus zwei Hodoskopen (H1 und H2) mit horizontal angeordneten Szintillatorstreifen zur Strahlrückverfolgung auf das Target. Beide Hodoskope haben ein Loch in der Mitte um den Hauptstrahl ungehindert durchzulassen [7]. H2 ist direkt hinter dem Myonenfilter MF1 installiert. Da die Hodoskope nur auf gestreute Myonen sensitiv sein sollen, sind die Dimensionen von H2 genau an den Myonenfilter angepasst. Um eine möglichst gute Rückverfolgung der Teilchenspur zum Target zu gewährleisten muss der Abstand zwischen H1 und H2 möglichst groß sein. H1 ist 1018 cm strahlabwärts von H2 vor dem RICH Detektor installiert. H2 ist in zwei Hälften aufgeteilt, da so lange und damit instabile Szintillatorstreifen vermieden werden können und außerdem positiv und negativ geladenen Teilchen durch ihre Ablenkung in SM1 unterscheiden werden können.

### 1.4.4. Der Aufbau des Hodoskops H1

Das Hodoskop H1 besteht aus 32 Szintillatoren vom Typ BC408 der Marke Saint Gobain mit den Abmessungen  $230 \times 6 \times 1 \text{ cm}^3$ . Beim Auftreffen von Strahlung auf die Szintillatoren entsteht in ihnen Licht, das, wie in einer Glasfaser, durch Totalreflektion im Szintillator geleitet wird. An die Szintillatoren geklebte Lichtleiter aus Plexiglas bündeln durch Totalreflexion an der Oberfläche das Licht von dem rechteckigen Querschnitt der Szintillatoren auf den runden Querschnitt der beidseitig angeschlossenen Photomultiplier. (Abb. A.15).

An die Lichtleiter werden Photomultiplier des Typs XP2982 oder XP2900 der Firma Photonis angesetzt. Zur Abschirmung gegen das Magnetfeld von SM1 sind die isolierten Photomultiplier mit  $\mu$ -Metall abgeschirmt. Geschützt durch eine weitere

## 1. Einleitung

Isolierschicht sind sie dann in Weicheisenabschirmungen eingeschoben (Abb. 1.6). Die Abschirmungen sind ebenfalls isoliert mit dem Aluminiumrahmen verschraubt. In die mit Aluminiummanschlüssen am Lichtleiter befestigte Weicheisenabschirmung werden auch die Photomultiplierbasen eingeschraubt. Diese drücken durch eine Feder den Photomultiplier fest an den Lichtleiter. Um zu vermeiden, dass die massiven Weicheisenabschirmungen im Akzeptanzbereich des RICH, der direkt hinter H1 steht, liegen, wurden für H1 mit 48 cm sehr lange Lichtleiter verwendet (Abb.A.15). Diese haben allerdings den Nachteil, dass sie durch ihr Eigengewicht im nicht fixierten Zustand eine hohe Belastung auf der Klebung am Szintillator auswirken.

Zur Stabilisierung sind die Szintillatoren zu Gruppen zusammengefasst. Die oberste und die unterste Gruppe enthält sieben Szintillatoren die drei verbleibenden Gruppen enthalten jeweils sechs Szintillatoren (Abb. 1.4).

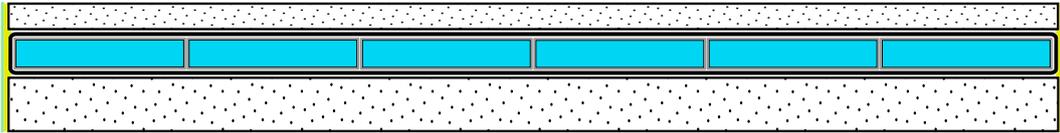


**Abb. 1.4.:** Aufnahme von H1. Die versetzte Stapelfolge der einzelnen Gruppen ist deutlich zu erkennen.

In der Gruppe ist jeder Szintillator mit aluminiumbeschichteter Mylarfolie eingewickelt. Diese Folie soll Licht, das die Bedingung der Totalreflexion an der Grenzfläche nicht mehr erfüllt, zurück in den Szintillator reflektieren. Alle Szintillatoren sind als Paket mit schwarzer Folie lichtdicht umwickelt. Auf beiden Seiten ist eine Platte aus Rohacell angebracht, die zusammen mit einer Verklebung mit Fiberglasauflage an den langen Kanten einen stabilisierenden Kasten bildet. Jeweils eine der Rohacellplatten ist 1 cm und eine 2 cm dick (Abb. 1.5). Beim Aufeinandersetzen wird dann so variiert, dass einmal die dicke und einmal die dünne Platte vorne ist. So können die Szintillatoren der oberen Gruppe immer auf die dicke Rohacellplatte der unteren Gruppe

## 1.5. Erzeugung des Triggersignals

aufgesetzt werden und die Belastung der Szintillatoren kann so minimiert werden (siehe Abb, 1.4).



**Abb. 1.5.:** Querschnitt durch eine Gruppe mit sechs Elementen. Die einzelnen Szintillatoren (blau) sind in aluminiumbeschichtete Mylarfolie gewickelt. Alle Szintillatoren sind als Paket in die schwarze lichtdichte Folie eingeschlagen. Unten ist die 2 cm dicke und oben die 1 cm dicke Rohacellplatte zu erkennen. An den Seiten ist mit Araldite 2011 (gelb) ein Streifen Fiberglas (grün) aufgeklebt.

In der mittleren Gruppe sind die mittleren vier Szintillatoren für 40 cm unterbrochen um die Ereignisse, die in die Akzeptanz des SAS fallen, möglichst ungehindert passieren zu lassen. Um dennoch eine beidseitige Auslese zu gewährleisten sind die Szintillatoren mit Luftlichtleitern verbunden. Die Luftlichtleiter sind ein aus Daylight-Folie von 3M gefertigter Hohlquader, in dessen Enden die Szintillatoren geschoben werden. Die verwendete Daylight-Folie ist eine hochreflektierende Mylarfolie (Reflektionsgrad: 99%). Die Reflexion entsteht durch konstruktive Interferenz an einem aufgebrachteten Gitter aus Kunststofffasern. Um die Ablenkung der Teilchen in SM1 auszugleichen wurde das Loch um 5 cm nach Jura verschoben. So bleiben auf der Seite Salève 100 cm lange und auf Jura 90 cm lange Szintillatoren übrig.

## 1.5. Erzeugung des Triggersignals

Die von den Photomultipliern ausgelesenen Signale der Szintillatoren sind abhängig vom Energieverlust der Teilchen im Szintillatormaterial. Aus diesem Grund wird jedes Signal zunächst mit einem CFD (Constant Fraction Discriminator) auf eine einheitliche Pulsbreite von 15 ns gebracht. Anschließend wird jedes Signal von H1 in drei Signale aufgespalten. Ein Signal wird zu einem Digitalkonverter (TDC, Time to Digital Converter) gesendet, um die Zeitinformation zu dem Signal zu bestimmen. Die beiden anderen Signale werden zu Matrizen, die auf sogenannten Gandalf-Boards implementiert sind, gesendet. In diesen Matrizen wird die Koinzidenz der Signale von H1 und H2 überprüft. Es sind zwei Matrizen nötig, da H2 in zwei Hälften aufgeteilt ist.

Da H2 im Experiment hinter H1 steht, müssen die Signale von H1 um die Flugzeit der Myonen zu H2 verzögert werden. Dies wird durch die Wahl eines längeren Signalkabels für das zu den Diskriminatoren gesendete Analogsignal erreicht. Zur Feinabstimmung sind in die Ausseelektronik an mehreren Stellen Delays eingebaut. In der Matrix wird

## 1. Einleitung



**Abb. 1.6.:** Die Weicheisenabschirmung mit den in ihr verbauten Komponenten. Von oben nach unten: Photomultiplierbasis mit Photomultiplier und Aluminiumanschluss an den Lichtleiter, die  $\mu$ -Metallabschirmung und die Kaptonfolie zur Isolierung [7]

jeder Kanal von H1 mit jedem Kanal von H2 verglichen. Der Aufbau der Matrix ist schematisch in Abbildung 1.7 dargestellt. Die Kanäle von H1 werden auf die Spalten geschaltet, die Kanäle von H2 auf die Zeilen. Da die Pixel der Matrix nacheinander durchlaufen werden, müssen Verzögerungen  $a_n$  beziehungsweise  $b_n$  zwischengeschaltet werden. Kommt an einem Pixel ein Signal von H1 gleichzeitig mit einem Signal von H2 an, so wird ein Hit-Signal ausgegeben. Dieses wird durch alle weiteren Pixel der Spalte durchgereicht und schließlich als Triggersignal ausgegeben. An den Trigger wird noch die Anforderung gestellt, dass nur Spuren, die sich auf das Target zurück verfolgen lassen, ausgewertet werden. Dazu können die Matrixpixel von außen angesteuert werden. Es werden nur solche Pixel aktiv geschaltet, die zu einer Kanalkombination gehören, die eine aus dem Target kommende Spur nachweist.

1.5. Erzeugung des Triggersignals

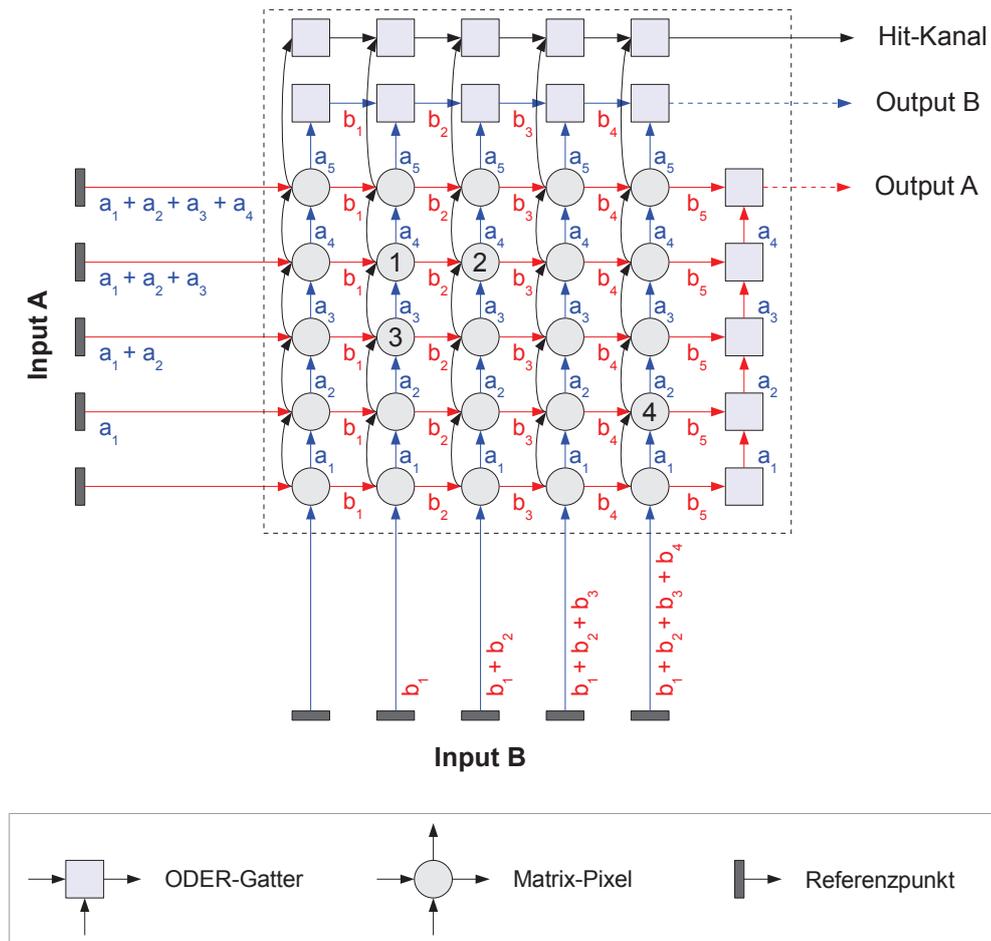


Abb. 1.7.: Schematische Darstellung des Aufbaus der Koinzidenzmatrix. Die Signale der Kanäle von H1 werden auf Eingang A, die der Kanäle von H2 auf Eingang B gelegt. [4]

## 1. Einleitung

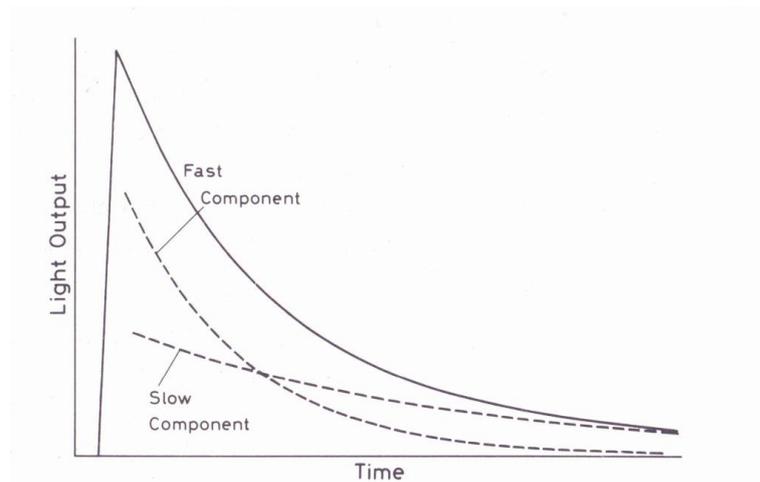
### 1.6. Szintillatoren

Als Szintillatoren werden Materialien bezeichnet, die beim Durchgang von geladenen Teilchen oder hochenergetischer Strahlung sichtbares Licht erzeugen. Beim Bau von Hodoskopen werden Szintillatoren aus organischen Materialien verwendet, da diese eine schnelle Auslese bei geringer Pulsbreite ermöglichen. Der verwendete Szintillator BC 408 von Saint Gobain hat Polyvenyltoluol als Trägermaterial. Die Szintillation ergibt sich durch Einbringen von Benzolringen in das Trägermaterial. Der Szintillator strahlt die höchste Intensität bei einer Wellenlänge von 425 nm ab. Die Pulsweite beträgt ungefähr 2,5 ns. Die Zerfallskonstante für das Abklingen des Signals ist 2,1 ns [1].

Abbildung 1.8 zeigt eine typische Intensitätsverteilung des von einem Szintillator nach Durchgang eines Teilchens erzeugten Lichtblitzes. Der Abfall der Intensität kann durch die Summe von zwei exponentiellen Zerfällen beschrieben werden. Er ergibt sich als die Überlagerung einer schnell und einer langsam abfallenden Komponente.

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

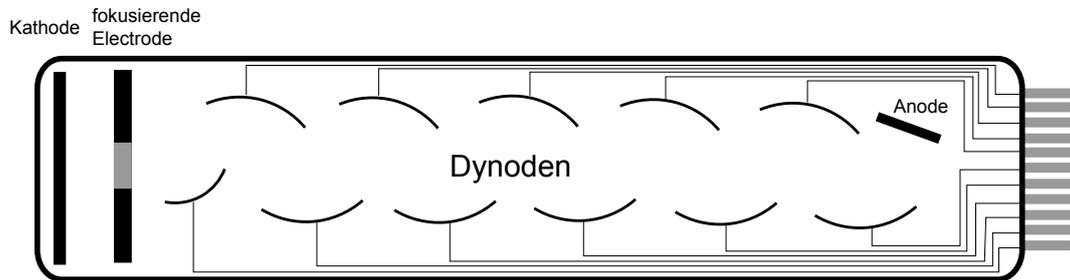
Dabei ist  $N(t)$  die Anzahl der freigesetzten Photonen,  $t$  die Zeit,  $A$  und  $B$  sind die Amplituden und  $\tau_s$  und  $\tau_l$  die Lebenszeiten der schnell und der langsam zerfallenden Komponente.



**Abb. 1.8.:** Intensitätsverlauf des Szintillatorsignals. Die schnell und die langsam abfallende Komponente sind getrennt dargestellt. [9]

### 1.7. Photomultiplier

Ein Photomultiplier ist ein Instrument, das Photonen in elektrische Signale umwandelt und diese verstärkt. Der Aufbau eines Photomultipliers ist in Abbildung 1.9 skizziert. Ein einkommendes Photon löst durch den photoelektrischen Effekt in der



**Abb. 1.9.:** Skizze des Aufbaus eines Photomultipliers. Zur besseren Übersicht wurde nur die Verkablung der Dynoden an die Pins eingezeichnet. Kathode, Anode und die fokussierende Elektrode werden auch noch über gesonderte Pins mit Spannung versorgt.

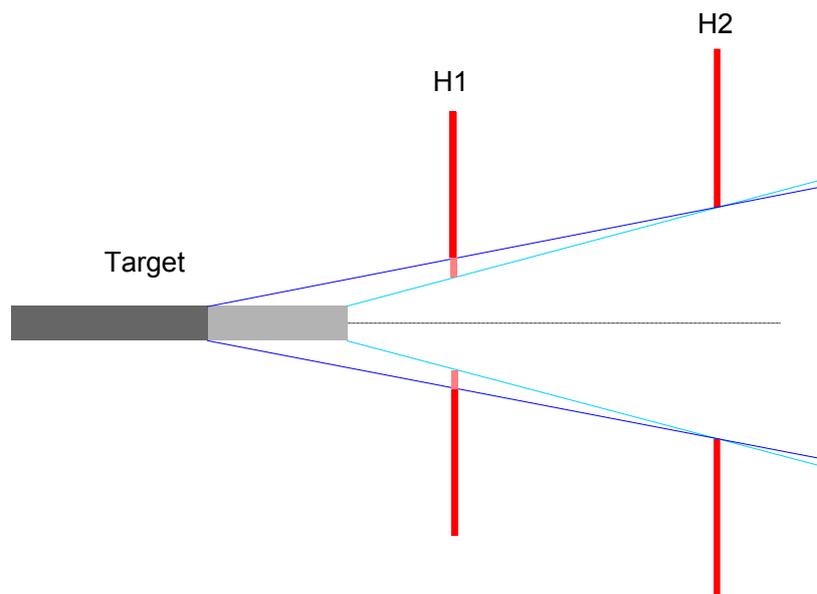
Kathode ein Elektron aus. Dieses wird durch Hochspannung beschleunigt und trifft auf die erste Dynode, wo es, durch die bei der Beschleunigung gewonnene Energie, weitere Elektronen auslöst. Von hier aus werden die Elektronen weiter zu einer nächsten Dynode beschleunigt, wo abermals weitere Elektronen ausgelöst werden können. Dieser Prozess wird bei den in H1 verwendeten XP2982 und XP2900 von Photonis über insgesamt elf Stufen fortgesetzt, bis schließlich an der Anode ein messbares Signal abgegriffen werden kann.

Die Beschaltung der Dynoden muss durch eine Hochspannungsbasis, auf die der Photomultiplier aufgesteckt wird, gewährleistet sein. Die Signalverstärkung eines Photomultiplier ist abhängig von der Art, wie die Spannung über die einzelnen Dynoden aufgeteilt wird. Im Moment wird in H1 eine Beschaltung verwendet, die eine möglichst gute Zeitauflösung gewährleistet. Die Anstiegszeit des Signals beträgt 1,9 ns bei einer Verstärkung von  $6,5 \times 10^6$ . Es sollen demnächst aber Basen, die eine höhere Verstärkung gewährleisten, eingebaut werden [2]. Ein Schaltplan der aktuell verwendeten Basis ist im Anhang beigelegt (Abb. A.14).



## 2. Modifikation des Hodoskops H1

Im Aufbau von 2012 wurde das Target um ca. 140 cm strahlaufwärts verschoben. Da die Dimensionen von H2 wie bereits erwähnt gleich bleiben müssen, musste H1 an diese Modifikation angepasst werden. Abbildung 2.1 zeigt schematisch wie sich das Verschieben des Targets auf die Dimension des Lochs von H1 auswirkt. Die Skizze zeigt die in vertikaler Richtung nötigen Anpassungen. Die Anpassung in horizontaler Richtung ist durch die Ablenkung von SM1 schwerer darzustellen. Das Loch wurde nun symmetrisch aufgebaut. Dies ist bei der für 2014 vorgesehenen Drell-Yan-Datennahme nötig. In einem Drell-Yan-Prozess entstehen Myonen und Antimyonen, die in SM1 auf Grund ihrer entgegengesetzten Ladung in entgegengesetzte Richtung abgelenkt werden.



**Abb. 2.1.:** Diese Skizze zeigt wie sich die die Verschiebung des Targets strahlaufwärts auf die Geometrie von H1 auswirkt, wenn die Teilchenspuren, die vom Rand des Targets ausgehen und H2 am Rand zum Loch treffen auch in H1 noch nachgewiesen werden sollen. Mit blasser Strichfarbe ist das alte Setup dargestellt.

Die Abmessungen von H1 nach dem Umbau sind in Abbildung 2.2 gezeigt. Die äußeren Abmessungen wurden nicht verändert. Es wurde lediglich das Loch zu einem um den Mittelpunkt symmetrischen Loch mit 50 cm Breite ausgedehnt. Die Höhe des Lochs

## 2. Modifikation des Hodoskops H1

wurde um zwei Szintillatorstreifen auf 37 cm ausgedehnt.

Der erste Teil dieser Arbeit dokumentiert die zum Umbau nötigen Arbeitsschritte. Im zweiten Teil werden dann erste, mit dem neuen Aufbau genommenen, Daten analysiert.

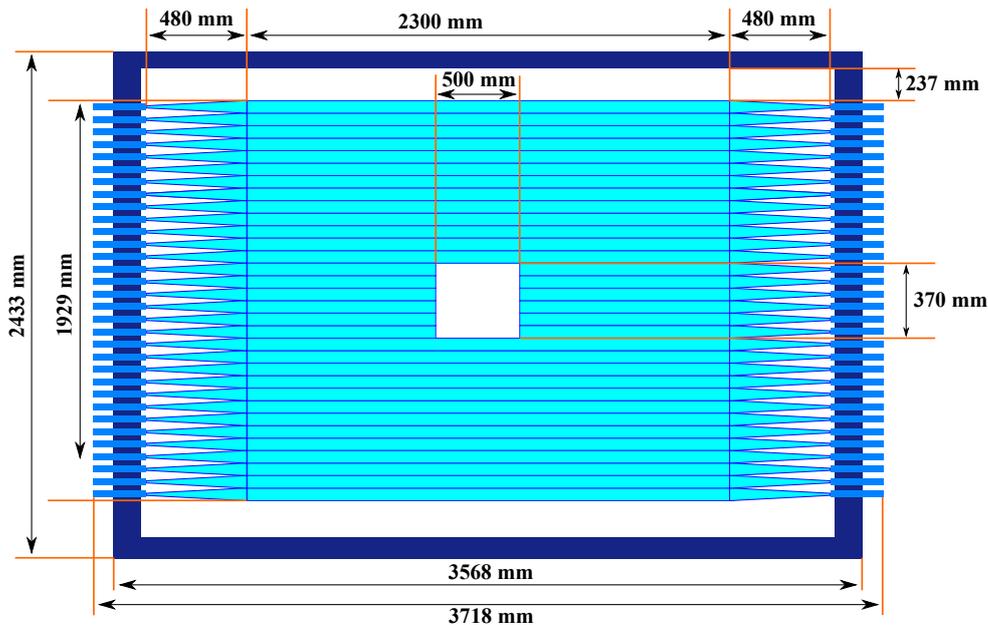


Abb. 2.2.: Skizze von H1 mit allen Abmessungen [8]

### 2.1. Hinweise zum Umgang mit den Materialien

Vor der Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte seien an dieser Stelle zunächst noch einige Hinweise zum Umgang mit den Bauteilen gegeben.

Das Szintillatormaterial ist sehr empfindlich. Bereits kleine Temperaturunterschiede im Material können zu Mikrorissen führen. Aus diesem Grund darf es nicht mit schnell verdunstenden Flüssigkeiten, wie beispielsweise Ethanol, in Berührung kommen. Außerdem dürfen die Szintillatoren nicht mit bloßen Händen angefasst werden, da das Fett der Haut durch chemische Reaktionen mit dem Szintillatormaterial ebenfalls zu Mikrorissen führt. Beim Umgang mit Szintillatoren müssen also immer Handschuhe getragen werden. Etwaige Mikrorisse an der Oberfläche beeinträchtigen die Totalreflexion des im Szintillator erzeugten Lichts und führen so zum Intensitätsverlust bei der Auslese.

Um die mechanische Belastung des Materials gering zu halten sollten die Szintillatoren beim Tragen entweder senkrecht, oder zumindest mit der schmalen Seite nach oben gehalten werden.

Weiterhin ist zu beachten, dass die Klebungen der Lichtleiter an die Szintillatoren auch bei kleinen mechanischen Belastungen brechen können. Der Lichtleiter sollte nie

für eine längere Zeit frei in der Luft schweben, sondern immer unterstützt werden.

## 2.2. Kleben von Lichtleitern und Szintillatoren

### 2.2.1. Vorbereitung der Lichtleiter

Die Lichtleiter wurden zunächst mit einer aluminiumbeschichteten Mylarfolie umwickelt. Der zylindrische Teil des Lichtleiters wurde mit glatter Mylarfolie umwickelt. Hier mussten später Aluminiumendkappen als Anschluss an die Weicheisenabschirmung aufgeschoben werden. Die Umwicklung durfte also nicht zu dick geraten.

Der verbleibende Teil des Lichtleiters wurde mit zerknitterter Mylarfolie locker umwickelt. Die Mylarfolie dient dazu, dass Licht, das die Bedingung zur Totalreflexion an der Grenzfläche des Lichtleiters oder Szintillators nicht erfüllt wieder zurück reflektiert wird. Da Totalreflexion nur beim Übergang vom optisch dichteren ins optisch dünnere Medium auftritt, darf die Mylarfolie, die natürlich dichter ist als die lichtleitenden Komponenten, nicht direkt anliegen. Das Zerknittern der Folie hat zwei Gründe. Zum einen wird eine zerknitterte Folie den Lichtleiter oder Szintillator weniger berühren, da nur eine ebene Oberfläche an der ebenfalls ebenen Oberfläche der Szintillatoren glatt anliegen kann. Zum anderen führt dies zu einer diffusen Reflexion. Das Licht wird unter einem anderen Winkel wieder in den Szintillator eintreten, als es ihn verlassen hat. So kann die Bedingung für Totalreflexion beim nächsten Auftreffen auf die Grenzfläche eher wieder erfüllt werden als bei Reflexion an glatter Folie.

Danach wurde an der Außenkante der Klebefläche noch eine Umwicklung aus blauem leicht abzulösendem Klebeband angebracht. Dieses diente dazu austretenden überschüssigen Klebstoff nicht auf die Oberfläche gelangen zu lassen. Dabei musste darauf geachtet werden, dass das Klebeband an der Kante zur Klebefläche dicht anliegt und nicht unterlaufen werden konnte.

Abschließend wurde kurz vor dem Kleben noch die Klebefläche selbst präpariert. Dazu musste sie mit feinkörnigem Schleifpapier (Körnung zwischen 1500 und 2000) leicht angeschliffen werden. Es reicht bereits mit dem Schleifpapier wenige Male mit wenig Druck darüberzufahren. Zum Schluss wurde die Oberfläche noch einmal mit einem fusselfreien Tuch gereinigt.

### 2.2.2. Vorbereitung der Szintillatoren

Bevor die Szintillatoren zum Kleben vorbereitet werden konnten, musste für ein Haltegestell zum Kleben gesorgt werden. Dieses musste so konstruiert werden, dass die Szintillatoren darin stabil aufrecht stehen und bei Berührungen nicht umfallen konnten. Außerdem ist es wichtig, dass durch die Befestigung keine Spannungen im Szintillator entstehen konnten.

Zur Vorbereitung der Szintillatoren wurden diese zunächst ausgepackt. Bei allen folgenden Arbeitsschritten wurden wegen der Empfindlichkeit der Szintillatoren Handschuhe getragen. Die Szintillatoren waren mit einer Schutzfolie überzogen. Diese haftete recht stark, sodass sie in einem flachen Winkel abgezogen wurde, um Spannungen

## 2. Modifikation des Hodoskops H1

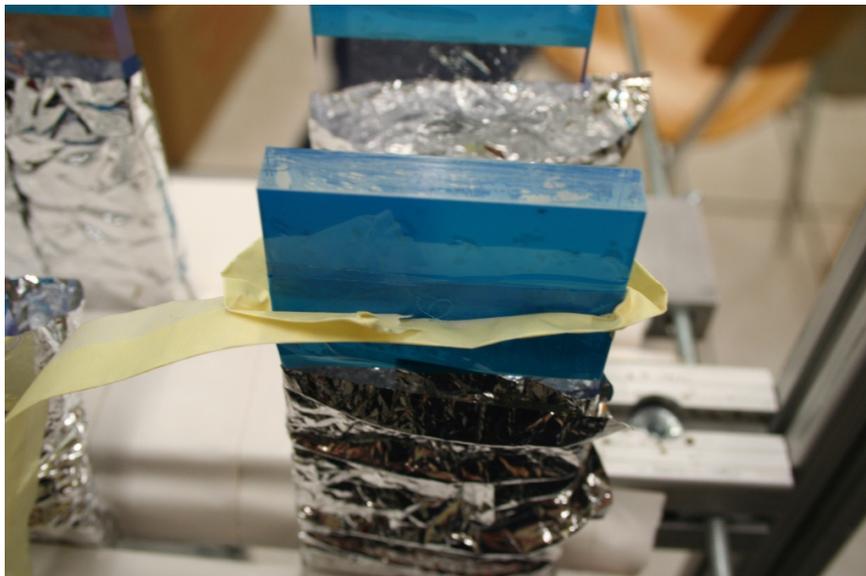
im Szintillatormaterial zu vermeiden.



**Abb. 2.3.:** Vorbereiteter Lichtleiter und Szintillator. Die Umwicklung mit zerknitterter Mylarfolie und das Abkleben mit dem blauen Klebeband sind zu erkennen.

Anschließend wurden die Szintillatoren wie die Lichtleiter in zerknitterte Mylarfolie eingeschlagen. An der zu klebenden Seite sollte die Mylarfolie bis ca. 5cm unter den Rand reichen. An der anderen Seite konnte sie bündig anliegen. Wie bei den Lichtleitern mussten auch die Seiten der Klebeflächen der Szintillatoren mit dem blauen Klebeband abgeklebt werden. Außerdem wurde an den Szintillatoren noch zu einer Rinne geformtes Kreppband angebracht (siehe Abb. 2.4). Dieses fängt herunterlaufenden Klebstoff auf.

Kurz vor dem Kleben wurden auch die Szintillatoren noch angeraut und mit dem fusselfreien Tuch abgewischt.

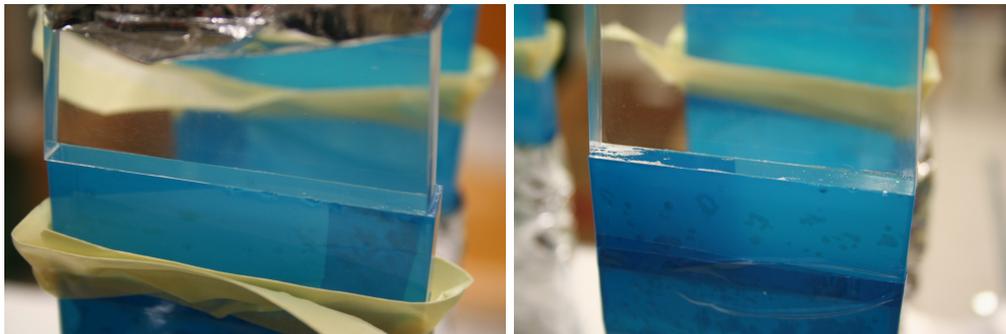


**Abb. 2.4.:** Zum Kleben eingespannter Szintillator. Um die Klebefläche ist das blau Klebeband und die Auffangrinne aus Kreppband zu sehen.

### 2.2.3. Klebevorgang

Zum Kleben wurde Loctite 406 der Firma Henkel, ein Sekundenkleber, auf den senkrecht eingespannten Szintillator aufgetragen. Beim Kleben durften keine Handschuhe getragen werden, da diese sonst festkleben können und ein erneutes Ablösen mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden wäre. Beim Klebevorgang war darauf zu achten, dass die komplette Klebefläche von einem dünnen Klebstofffilm überzogen ist. Anschließend wurden die Lichtleiter von oben aufgesetzt. Die Klebeflächen sollten direkt passgenau aufeinanderliegen, da der Klebstoff in 5 bis 10 s fest wird. Ein leichtes Korrigieren war während des langsamen Aufsetzens noch möglich, es sollten aber keine großen Bewegungen ausgeführt werden, da hierbei schnell Lufteinschlüsse in die Klebung gelangen können. Wenn beide Teile genau aufeinanderliegen, musste der Lichtleiter für ca. 20 s gehalten werden. Während dessen sollte jedoch nicht zu viel Druck ausgeübt werden, da sonst zu viel Klebstoff austritt und die Klebung so dünn wird, dass sich wieder Luftblasen ausbilden können.

Nach einer zwölfstündigen Trocknungsphase wurde das blaue Klebeband wieder abgezogen. Es musste noch überprüft werden, ob es keine Lufteinschlüsse gibt (vgl. Abb. 2.5). Sollte dies der Fall sein, müssten die Lichtleiter wieder abgebrochen werden und die Klebung erneut erfolgen (siehe Anhang).



(a) gute Klebung

(b) schlechte Klebung mit Lufteinschlüssen

**Abb. 2.5.:** *Beispiel für eine gelungene Klebung und eine schlechte Klebung mit Lufteinschlüssen*

## 2.3. Vorbereitung der Szintillatoren zum Einbau

Nachdem das Klebeband entfernt wurde, musste die Klebestelle ebenfalls in zerknitterte Mylarfolie gewickelt werden. Hierbei war auf ausreichenden Überlapp (ca. 5cm) der bereits bestehenden Wicklung zu achten. Abschließend mussten die Lichtleiter mit lichtdichtem Klebeband umwickelt werden. Hierbei hat sich folgender Arbeitsablauf als gut praktikabel erwiesen. Klebebandstreifen wurden in der Länge zurecht geschnitten, dass sie für eine Wicklung um den Lichtleiter langen. Die Mitte des Klebestreifens wurde auf der Oberseite des Lichtleiters mittig angesetzt. Nun wurden die Enden nach

## 2. Modifikation des Hodoskops H1

unten geklappt, sodass sie faltenfrei anlagen. Dabei war immer darauf zu achten, dass die Wicklung nicht zu fest wurde, da sonst die Lücke zwischen Lichtleiter und Mylarfolie verloren ginge. Die Wicklung wurde bis ca. 5cm vor dem Ende des Lichtleiters vorgenommen. Der restliche Platz musste frei bleiben, da hier später Aluminiumanschlüsse für die Weicheisenabschirmung angebracht wurden. Außerdem sollte mit dem Umwickeln erst kurz hinter der Klebestelle angefangen werden, da sonst die Szintillatoren durch die zusätzliche Klebebandschicht nicht mehr dicht genug aneinander gelegt werden können. Das Umwickeln wurde noch einmal mit gleicher Prozedur von der Unterseite wiederholt.

## 2.4. Demontage H1

Vor dem Beginn der Umbauarbeiten wurde H1 bereits in eine kleinere Halle neben der Experimentierhalle, die Cleanarea, gebracht. Hier wurden nun die zu modifizierende dritte Gruppe aus dem Hodoskop entnommen. Die oberen beiden Gruppen mussten auch mit ausgebaut werden, da alle Gruppen aufeinander aufgesetzt sind. Sie wurden für die Zeit des Umbaus zwischengelagert. Hierzu wurden sie mit der 2cm dicke Rohacellplatte nach unten auf eine ebene Fläche gelegt. Für die Lagerung mussten die Lichtleiter unterfüttert werden, sodass sie nicht in der Luft hängen und die Klebungen durch die Belastung des Eigengewichts brechen könnten.

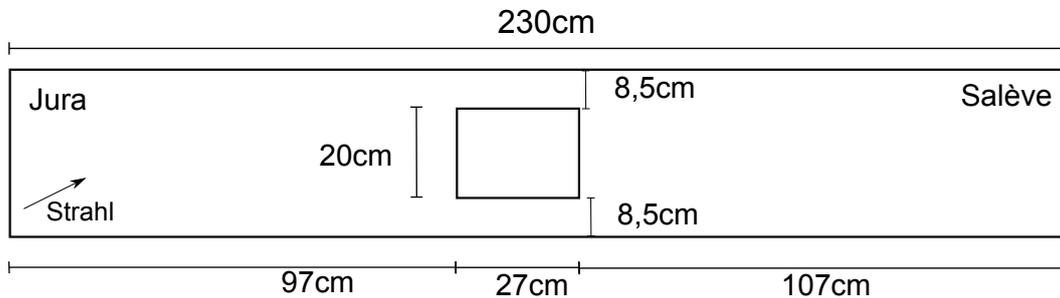
Bei der Demontage war darauf zu achten, dass das Drehen der Gruppe in die Waagerechte in der Luft geschieht. Das Drehen sollte nicht über eine aufgesetzte Kante erfolgen, da dies eine punktuelle Belastung darstellt.

Die dritte Gruppe wurde in ein Gestell mit Halterungen für die Lichtleiter gelegt. Das vorhandene Gestell war so konstruiert, dass wenn die 2cm dicke Rohacellplatte unten liegt, die Lichtleiter genau in die Halterung passen. In diesem Gestell konnte die Gruppe sicher transportiert werden. Falls nötig konnten auch die Lichtleiter mit dünnen Aluminiumstreifen und Schrauben der Größe M6 fixiert werden.

Die dritte Gruppe musste umsichtig auseinandergenommen werden. So konnte zum einen der Aufbau genau nachvollzogen werden und zum anderen mussten vier der 90cm langen Szintillatoren in dem Neubau wiederverwendet werden.

## 2.5. Vorbereitung der Rohacellplatten

Die Rohacellplatten für die Vorder- und Rückseite der Gruppe wurden auf die richtige Länge geschnitten. Sie haben ein Loch, um Ereignisse mit kleinen Streuwinkeln, die im SAS analysiert werden, möglichst wenig zu beeinflussen. Die genauen Maße der Platten wurden von der vorherigen Anordnung übernommen (Abb. 2.6).



**Abb. 2.6.:** Skizze mit den Abmessungen der Rohacellplatten. In dieser Ansicht blickt man aus Strahlrichtung auf die Gruppe.

Das Rohacell wurde mit einem Messer mit langer und dünner Klinge (Tapetenmesser) geschnitten. Dabei wurde an die vorgezeichneten Linien eine gerade Metallschiene angelegt und an dieser mehrmals mit dem Messer entlang gefahren, bis die Platte durchtrennt war. Anschließend wurden die Kanten mit Schleifpapier (Körnung 100) nachbearbeitet, um kleine Unebenheiten, die durch das mehrmalige Entlangfahren oder das Ansetzen des Messer entstanden sind, zu beseitigen. Dazu musste das Schleifpapier auf einen Gegenstand mit einer ebenen Fläche aufgespannt werden.

## 2.6. Bau der Gruppe

### 2.6.1. Ausrichten der Komponenten

Vor dem endgültigen Zusammenfügen der einzelnen Komponenten mussten diese zunächst im Hilfsrahmen ausgerichtet werden. An einer Seite wurden Winkelstücke als Anschlag für die Rohacellplatte auf dem Hilfsrahmen angebracht. Außerdem wurde die Platte mittig ausgerichtet und ihre Lage am Rahmen markiert. Sie bildet nun als Auflage auch das Referenzsystem für alle weiteren Komponenten und kann durch die Markierungen immer wieder in die richtige Position gebracht werden.

Anschließend wurden die Szintillatoren probeweise auf das Rohacell gelegt und ausgerichtet. Die Szintillatoren müssen dicht aneinander liegen. Um dies zu gewährleisten mussten die Halterungen der Lichtleiter leicht verschoben werden und teilweise auch Szintillatoren getauscht werden, da ein kleiner Versatz bei der Klebung der Lichtleiter oder eine etwas dickere Mylarumwicklung für Abweichungen sorgen können. Diese Unterschiede sollten sich bei benachbarten Szintillatoren immer ausgleichen.

Abschließend wurden die Szintillatoren noch in der richtigen Länge auf die Rohacellplatte geschoben. Jeder Szintillator muss 90cm in die Platte hineinragen. Dieser Abstand ist leicht zu messen. Um diese Position bei der endgültigen Montage wieder einstellen zu können, wurde in Höhe der Halterungen auf dem Lichtleiter ein Stück Kreppband angebracht. Darauf wurde die Lage der Halterungen markiert und zusätzlich für jeden Szintillator eine eindeutig zugeordnete Nummer notiert um später wieder die selbe Reihenfolge einzuhalten.

### 2.6.2. Vorbereitung der Luftlichtleiter

Die Luftlichtleiter wurden aus Daylight-Folie von 3M gefertigt. Diese hat eine hochreflektierende Seite und eine Seite mit einer Klebeschicht. Beide Seiten sind mit einer Schutzfolie umgeben. Die reflektierende Seite ist mit einer matt durchsichtigen Schutzfolie und die Klebeseite mit einer Schutzfolie aus bräunlichem Papier abgedeckt.

Die einzelnen Stücke wurden zunächst auf die passende Größe zugeschnitten. Für das 50cm lange Loch wurde eine Folienlänge von 62,5cm (dies entsprach genau der Hälfte des zur Verfügung stehenden Materials) und eine Breite von 16cm (entspricht einem Überlapp von 2cm nach dem Umwickeln) gewählt.

Zur Erleichterung des späteren Zusammenbauens wurden die Luftlichtleiter mit Hilfe eines alten nicht mehr benötigten Szintillators als Dummy zunächst vorgeformt. Hierzu wurde die Folie mit der reflektierenden Seite nach innen um den Dummy gewickelt. Dabei sollte nicht zu viel Druck aufgebaut werden, da die Folie locker genug anliegen muss um später die richtigen Szintillatoren, die zusätzlich mit der Mylarfolie umwickelt sind, in den Luftlichtleiter schieben zu können.

Der Dummy wurde so platziert, dass eine Seite über den Tisch ragt. An dieser Seite konnten nun die Kanten des Luftlichtleiters ausgeformt werden. Nachdem dieser Vorgang an der anderen Seite wiederholt wurde, wurde der Dummy wieder ausgewickelt und alle Kanten noch einmal nachgeformt. Dazu wurde die Folie komplett umgefaltet und auf eine harte, ebene Oberfläche gelegt. Mit leichtem Druck wurde mit einem zylindrischen Gegenstand über die Kanten gefahren, um sie in die Folie zu prägen.

### 2.6.3. Zusammensetzen der Gruppe

Die untere Rohacellplatte wurde zunächst mit einigen Streifen doppelseitigem Klebeband beklebt (Abb. 2.7) um später eine stabile Verbindung zur lichtdichten Folie zu erhalten. Vorbereitend wurde das Klebeband in gleicher Anordnung auch schon auf die Unterseite der späteren oberen Rohacellplatte aufgebracht.

Danach wurde die grob zugeschnittene schwarze Folie aufgelegt. Diese muss so groß sein, dass sie ausreicht die gesamte Gruppe einmal zu umhüllen, also mindestens  $230 \times 76$ cm. Es ist empfehlenswert die Folie großzügig abzumessen, da so kleine Ungenauigkeiten, die beim Anlegen eines solch großen Stücks unweigerlich entstehen, ausgeglichen werden können. Zum Auflegen der Folie wurde diese an allen Ecken auf Spannung gehalten und so platziert, dass ihre Mitte mittig über dem Rohacell schwebt. Nun wurde eine Ecke langsam auf das Rohacell abgesenkt. Von dieser Ecke aus wurde die Folie nun in alle Richtungen glatt auf der Platte ausgestrichen, sodass beim Kleben an das doppelseitige Klebeband möglichst keine Falten entstehen.

Auf der schwarzen Folie wurde dann als Anlegehilfe die Lage der Luftlichtleiter markiert. Die Luftlichtleiter wurden anschließend auf die Folie aufgeklebt. Dazu wurden sie, mit abgezogener Schutzfolie auf der reflektierenden Seite, wieder um einen Dummy gewickelt und am Überlapp zugeklebt. Wie schon beim Vorformen durfte die Folie



**Abb. 2.7.:** *Mit doppelseitigem Klebeband beklebte Rohacellplatte. Die Klebebandstreifen wurden zur Hervorhebung in diesem Bild rot umrahmt*

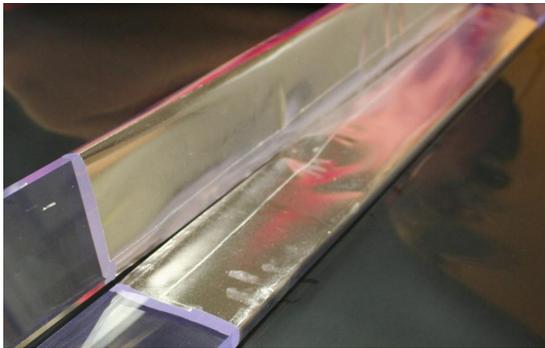
nicht zu stramm gezogen werden, da sich sonst später die Szintillatoren nicht mehr hätten einschieben lassen. Der erste Luftlichtleiter wurde passgenau an den Rand der Rohacellplatte geklebt. Dabei war besondere Sorgfalt und Konzentration gefordert, da an diesem Luftlichtleiter alle weiteren angesetzt wurden. Alle Klebungen mussten beim ersten Versuch gelingen. Auf Grund der starken Haftung des Klebstoffs wäre ein erneutes Ablösen nicht möglich gewesen.

Der Dummy verblieb zunächst in dem ersten Luftlichtleiter. Um einen zweiten Dummy wurde der nächste Luftlichtleiter gewickelt und zugeklebt. Das Aufkleben dieses und aller weiteren Luftlichtleiter gestaltet sich besonders schwierig, da diese nun an den vorher geklebten Luftlichtleiter und die schwarze Folie geklebt werden müssen. Dazu wurden sie zunächst mit der hinteren oberen Kante an die vordere obere Kante des bereits geklebten Luftlichtleiters angelegt. Danach wurde der Luftlichtleiter nach unten auf die schwarze Folie geklappt (Abb. 2.8).

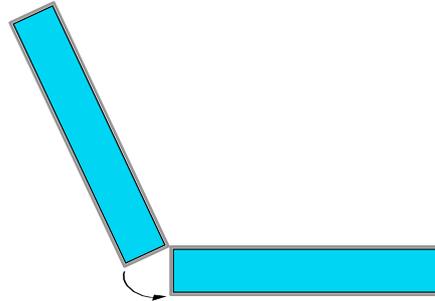
Nun konnte der Dummy aus dem hinteren Luftlichtleiter herausgezogen und die richtigen Szintillatoren konnten so weit hereingeschoben werden, bis die Markierung auf dem Lichtleiter zu der Halterung passt. Dabei musste darauf geachtet werden, dass sich die Mylarfolie nicht zusammenschiebt. Gegebenenfalls wurde sie mit der Spitze eines Skalpell oder eines kleinen Schlitzschraubendrehers vorsichtig in den Luftlichtleiter geschoben. Danach konnte der Vorgang mit den weiteren Luftlichtleitern wiederholt werden. (Abb. 2.9)

Nachdem alle Luftlichtleiter aufgeklebt und die Szintillatoren passend eingeschoben waren, wurde die schwarze Folie um das Paket geschlossen. Zunächst wurde ein Ende auf der Mylarfolie der Szintillatoren fixiert und dann das andere Ende ebenfalls umgeschlagen. Es wurde wieder nur mäßig angezogen, da sonst die äußerste Mylarfolie an den Szintillator gepresst worden wäre. Die schwarze Folie wurde nun mit einem Streifen schwarzem lichtdichtem Klebeband am Überlapp abgedichtet. Auch an den Seiten wurde die Folie mit Klebeband an den bereits mit lichtdichtem Klebeband um-

## 2. Modifikation des Hodoskops H1



(a) Foto vom Anlegen der Luftlichtleiter



(b) Skizze Anlegen der Luftlichtleiter

**Abb. 2.8.:** *Anlegen der Luftlichtleiter. Zum einen ein Foto von der Montage. Zum anderen eine Skizze, die die mit der Daylightfolie umwickelten Dummy im Profil zeigt.*

wickelten Lichtleitern versiegelt.

Die Zwischenräume zwischen den einzelnen Lichtleitern sind besonders schwierig abzudichten. Hierzu wurde zunächst ein Streifen 1 cm breites Klebeband in Längsrichtung mittig gefaltet und die Falz in der Spitze zwischen den Lichtleitern angesetzt. Danach wurde jeweils links und rechts noch ein Streifen Klebeband angesetzt und faltenfrei auf den Lichtleiter umgeschlagen, sodass sich ein Muster wie in Abbildung 2.10 ergibt.

Danach konnte die bereits mit Klebeband bestückte obere Rohacellplatte aufgelegt werden.

Abschließend musste an den Kanten der Längsseite der stabilisierenden Rohacellumhüllung noch Fiberglas mit Araldite 2011 aufgeklebt werden. Araldite 2011 ist ein Zweikomponentenkleber der nach dem Mischen ca. 30min verarbeitet werden kann. Das Mischen geschieht in einem speziellen Aufsatz auf einer für diesen Klebstoff vorgesehenen zweikammerigen Kartuschenpresse. Der Klebstoff wurde auf das mit grobem Schleifpapier angeraute und mit Ethanol entfettete zugeschnittene Fiberglas aufgetragen. Es wurde eine gleichmäßige wenige Millimeter dicke Klebstoffschicht aufgebracht um kleine Unebenheiten im Material auszugleichen. An die Klebung und die gegenüberliegende Seite wurde während des acht stündigen Aushärtens mit Schraubzwingen jeweils eine Metallstange gepresst. Die Stange an der Seite der Klebung wurde mit Papier mit einer Antihafbeschichtung (Schutzfolie von der Daylightfolie) umwickelt, um das spätere Ablösen zu erleichtern. Es wurde zunächst nur eine Kante geklebt und erst nach deren Aushärten die zweite.

Nach dem Zusammenbau der Gruppe wurde noch einmal die Größe des Lochs bestimmt. Hierzu wurde der Überstand der Lichtleiter über das Rohacell bestimmt. Da die Länge des Rohacell, der Lichtleiter und der Szintillatoren bekannt ist, kann aus diesen Messwerten die Größe des Lochs berechnet werden. Die so bestimmten Abmessungen des Lochs sind für jeden Streifen in Abbildung 2.11 dargestellt. Ein Fehler auf diese Abmessungen, der aus Ungenauigkeiten beim Anlegen und einer leichten



**Abb. 2.9.:** Die ersten drei Luftlichtleiter sind auf die schwarze Folie geklebt. In die ersten beiden wurden auch schon die Szintillatoren eingesteckt. Einer der Hilfsszintillatoren ist im dritten Lichtleiter, der andere liegt bereit um in die Daylightfolie eingepackt zu werden

Schiefelage der Szintillatoren resultieren kann wurde mit 0,5 cm abgeschätzt.

## 2.7. Einbau in das Hodoskop

Für den Transport zum Hodoskop wurde die neu gebaute Gruppe wieder in dem Hilfsstell getragen. Danach wurde die Gruppe wieder vorsichtig in das Hodoskop gehoben und ausgerichtet. Dabei musste darauf geachtet werden, dass sie zum einen links und rechts bündig aufsitzt und gleichzeitig die 2cm dicke Rohacellplatte auf den unterliegenden Szintillatoren aufliegt. Nun konnten die Weicheisenabschirmungen wieder auf den Lichtleitern steckenden Aluminiumanschlüsse geschoben werden. Die Halterungen wurden, wenn nötig, neu justiert, sodass das Aufschieben ohne Kraftaufwand ging und keine Spannung in den Lichtleitern entstehen konnte.

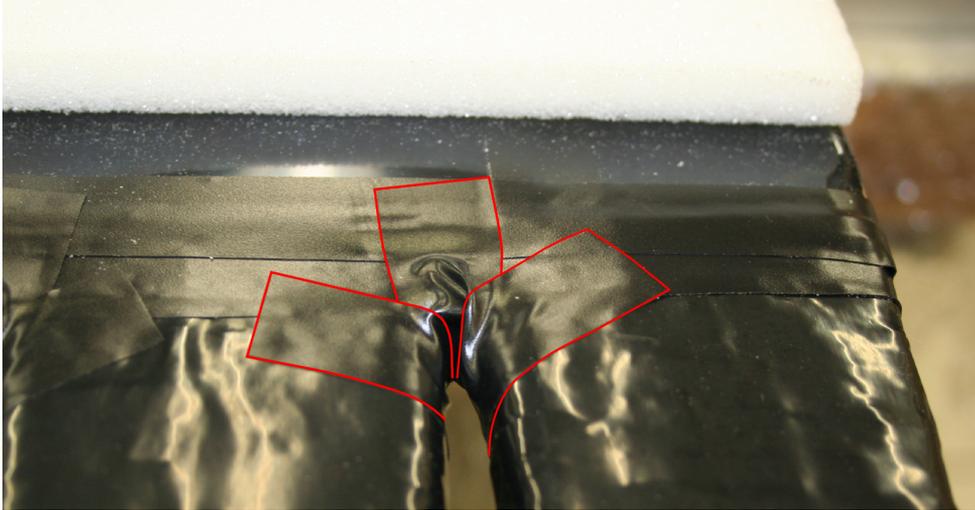
Danach wurden die beiden nicht bearbeiteten Gruppen ebenfalls wieder eingesetzt und in gleicher Weise befestigt.

Als nächstes wurde der Übergang zwischen den Aluminiumanschlüssen und den Weicheisen noch mit dem schwarzen Klebeband lichtdicht abgeklebt.

### 2.7.1. Prüfen auf Lichtdichtigkeit

Abschließend wurde die neu gebaute Gruppe noch auf ihre Lichtdichtigkeit geprüft. Da die Gruppe durch die schwarze Folie als eine Einheit lichtdicht ist, müssen zum Testen eines Streifens alle Weicheisenabschirmungen dieser Gruppe mit Photomultiplierbasen als Endkappen versehen werden. Auf einer Seite wurden nur Basen eingebaut, auf der anderen wurden direkt Photomultiplier eingesetzt, sodass diese beim Testen nicht

## 2. Modifikation des Hodoskops H1



**Abb. 2.10.:** Bild der lichtdichten Abklebung der Zwischenräume der Lichtleiter. Die relevanten Klebestreifen sind durch eine rote Umrahmung hervorgehoben



**Abb. 2.11.:** Skizze der mittleren Gruppe von H1. Es sind die genauen Abmessungen des Lochs, wie sie aus dem Überstand der Lichtleiter aus dem Rohacell berechnet wurden, angegeben

ständig gewechselt werden müssen.

Zum Prüfen wurde immer ein Photomultiplier an eine Hochspannungsquelle mit ca. 1400V und ein Oszilloskop angeschlossen. Auf dem Oszilloskop sollte dann das typische Signal eines Szintillators (Abb. 2.12) zu sehen sein. Es wurden angesichts der Fläche eines Szintillators senkrecht zur Erdoberfläche etwa eine Frequenz von 2Hz für auftreffende Myonen aus der kosmischen Strahlung erwartet. Diese Erwartung konnte auch grob durch Abschätzen bestätigt werden. Ein reines Abschätzen ist hier völlig ausreichend, da ein Lichtleck sich durch eine weitaus höhere Rate bemerkbar machen würde. Außerdem ist bei einem Lichtleck ein Absenken der Grundlinie des Signals zu erwarten. Es wurde also darauf geachtet, dass diese Linie immer bei 0V liegt.

## 2.7. Einbau in das Hodoskop

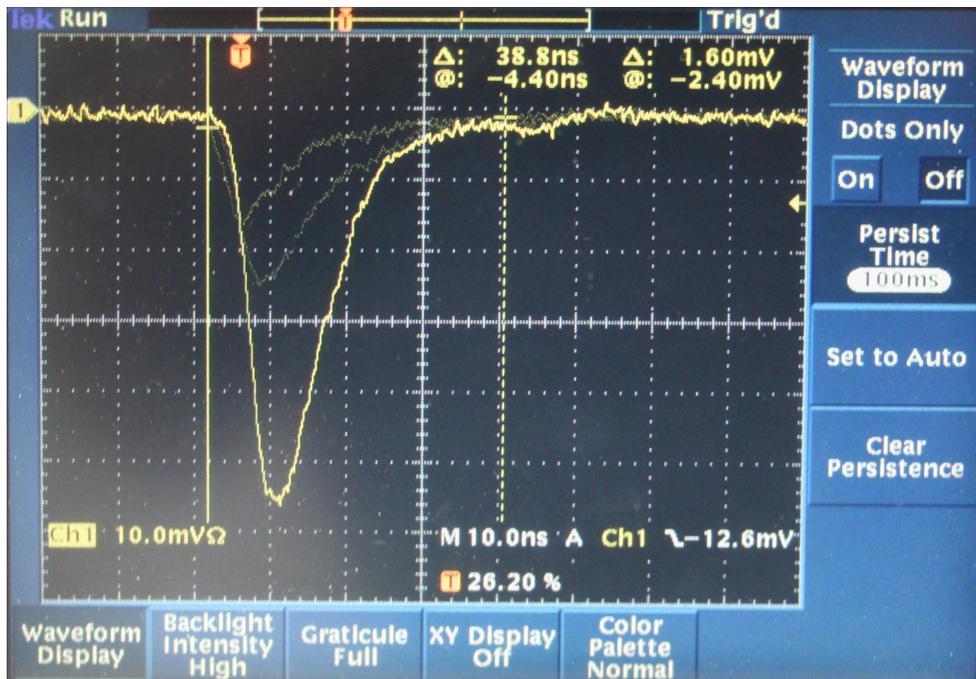


Abb. 2.12.: typisches Signal eines mit einem Photomultiplier ausgelesenen Szintillators auf dem Oszilloskop. Eine schnell abfallende und eine etwas langsamer ansteigende Flanke sind erkennbar. Vom Oszilloskop wurden in blasserer Farbe auch noch die beiden vorangegangenen Signale dargestellt.



## 3. Inbetriebnahme

### 3.1. Verkabelung

Nach dem Einbau von H1 (siehe Anhang) wurden die Hochspannungs- und die Signalkabel wieder angeschlossen.

Zur Spannungsversorgung stehen drei Verteilerboxen mit jeweils 24 Kanälen zur Verfügung (CAEN A647). Diese sind an einer Versorgungsplatine vom Typ CAEN A1535N in einem Hochspannungsversorgungssystem CAEN SY1527 angeschlossen. Jeweils eine Verteilerbox ist an einem H-Träger des Tragesystem auf der Seite Jura und der Seite Salève befestigt (Verkabelung an Jura siehe Abb. A.5). Die dritte Box wurde mittig unter dem Hodoskop in einem Kabeltunnel platziert.

An diese Box wurden die jeweils 10 untersten Kanäle jeder Seite angeschlossen. Die restlichen Kanäle wurden an die Verteilerboxen auf der entsprechenden Seite angekabelt (Zuordnung siehe Tabelle A.1).

Die Kabel für die ersten 10 Kanäle jeder Seite wurden von unten an das Hodoskop herangeführt. Die restlichen Kabel wurden an Stahlträgern oberhalb von H1 befestigt. Dabei wurde immer darauf geachtet, dass sich andere Detektoren noch herausziehen lassen.

Nach dem Verkabeln wurde die Hochspannung zunächst für alle Kanäle mit 1300V eingeschaltet. An dem Versorgungssystem kann man nun bereits sehen, ob es Probleme mit einzelnen Kanälen gibt. Das System gibt den Wert des aktuell fließenden Stroms zurück. Dieser sollte in etwa  $50\mu\text{A}$  betragen. Wenn ein Streifen wesentlich mehr Strom zieht, so wird er automatisch abgeschaltet und das Versorgungssystem gibt die Meldung "tripped" aus.

Tritt ein solches Problem auf, so muss das fehlerhafte Bauteil gefunden werden. Dabei kommen folgenden Komponenten in Frage:

- der Streifen der Verteilerbox
- das von der Verteilerbox abgehende Kabel
- das I-Stück, mit dem das Kabel von der Verteilerbox kommende Kabel an das Kabel der Base angeschlossen wird
- die Base
- der Photomultiplier

Zum Auffinden des Fehler wurden alle Komponenten nacheinander gegen funktionierende ausgetauscht werden. Erfahrungsgemäß liegt der Fehler meist bei der Base oder dem Photomultiplier, sodass diese zuerst getestet werden sollten.

### 3. Inbetriebnahme

## 3.2. Einstellen der Hochspannung

Die endgültige Einstellung der Hochspannung geschieht mit Myonsignalen bei eingeschaltetem Myonenstrahl. Zu diesem Zweck kann über eine Netzwerkverbindung auf das Hochspannungsversorgungssystem zugegriffen werden. In der Vetobaracke, dem Raum in dem alle Analogsignale des des LAS-Triggers zusammenkommen, wurde jeder Streifen einzeln am Oszilloskop betrachtet. Ausgehend von einer Spannung von 1300V wurde die Spannung für jeden Streifen so weit erhöht, bis am Oszilloskop das Myonenband mit einem Signalhöhe von ca. 100 mV sichtbar wurde (vgl. Abb. 3.1). Dabei wurde aber eine Maximalspannung von 1800V nicht überschritten, um die einzelnen Basen und Photomultiplier nicht zu stark zu belasten. Um das Ergebnis auf dem Oszilloskop zu testen, wurden mit der Taste "run/stop" die Signale für einen Beschleunigungszyklus aufgezeichnet.

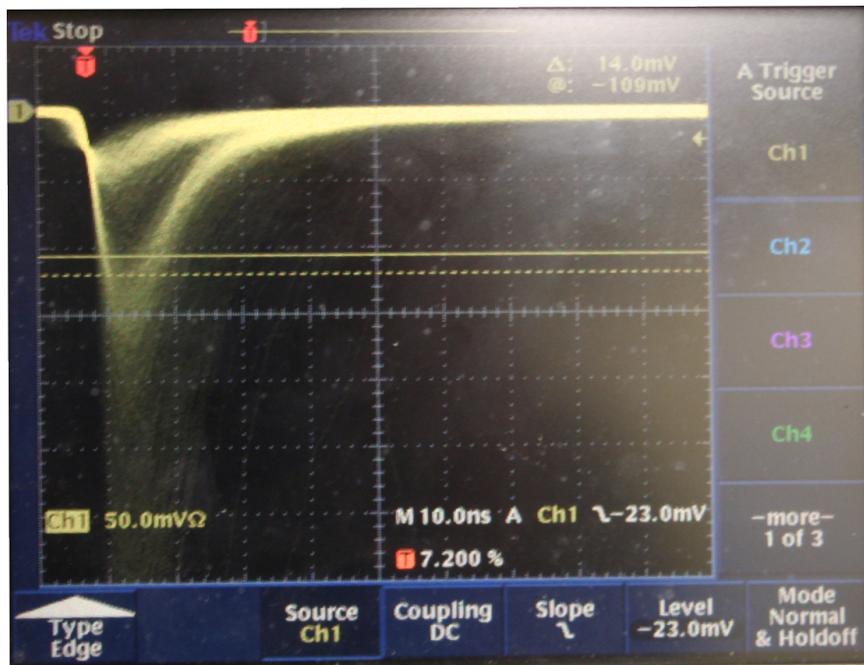


Abb. 3.1.: Signal auf dem Oszilloskop bei gut eingestellter Hochspannung. Unter der Lücke ist deutlich das Myonband sichtbar.

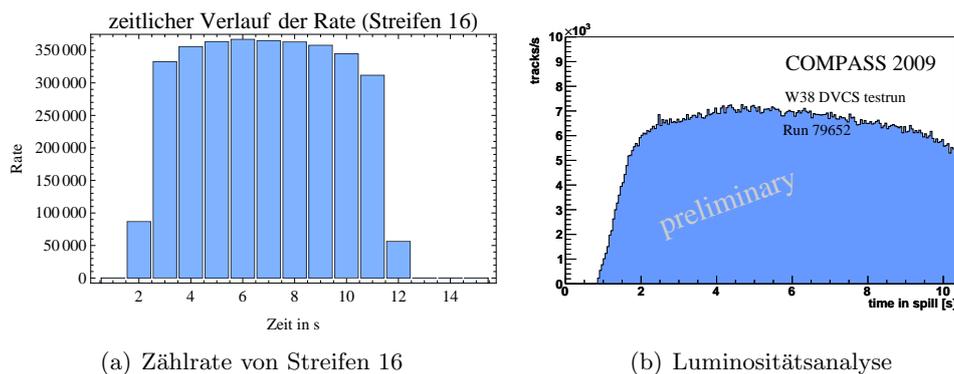
## 3.3. Zeitanpassung des LAS-Triggers

Als nächster Schritt zur Inbetriebnahme wurde die Zeitabstimmung der einzelnen Kanäle vorgenommen. Diese Arbeit wurde von Dr. Jens Barth und John Bieling von der Universität Bonn durchgeführt. Hierzu wurde für jeden Streifen ein Zeithistogramm erstellt. Als Zeit wird die Zeitdifferenz zu dem Auftreten des Teilchens in der BMS und dem Auslösen des Hodoskops ausgegeben. Große Zeitunterschiede zwischen

den Maxima der Histogramme der einzelnen Kanäle im Bereich von Nanosekunden wurden durch das Einbringen weitere Kabel ausgeglichen. Die Feinabstimmung wurde dann über die im Gandalf-Board verbauten Delays vorgenommen. Gleichzeitig wurde auch die Verzögerung zwischen den Signalen von H1 und H2 abgestimmt. So konnte eine Auflösung des LAS-Triggersystems von 1 ns erreicht werden. Im Folgenden sollen nun noch einige Daten, die während der Zeitabstimmung genommen wurden analysiert werden. Bei diesen Daten ist die Abstimmung noch nicht perfekt, sodass die Maxima der Zeitpeaks nicht für alle Kanäle auf dem selben Wert liegen. Da mit diesen Daten aber nur die Eigenschaften von H1 untersucht werden sollen und kein Vergleich mit anderen Detektoren nötig ist, ist dies ohne Belang.

### 3.4. Zählraten von H1

Die zu dem Gandalf-Board gehörende Software bietet die Möglichkeit direkt die Zählraten der einzelnen Kanäle auszugeben. Es werden für eine Sekunde alle Ereignisse, die zur beidseitigen Auslese führten, gezählt. Für diese Auswertung wurden 15 direkt aufeinander folgenden Messungen durchgeführt. Dabei wurde ein Extraktionsvorgang (Spill) des SPS aufgezeichnet. Die zeitliche Änderung der Zählrate für einen Streifen ist in Abb. 3.2 zu sehen. Alle anderen Kanäle zeigen die gleiche Struktur. Lediglich die Amplitude ist von Streifen zu Streifen verschieden, da die Streifen in der Mitte des Hodoskops natürlich von mehr Teilchen getroffen werden als die am Rand. Man sieht deutlich den schnellen Anstieg der Rate mit dem Beginn der Extraktion. Im Laufe eines Spills sinkt die Rate dann leicht ab, um zum Spillende wieder abrupt abzufallen. Diese Struktur ist ebenfalls in einer Luminositätsanalyse der Daten von 2009 zu erkennen. An diesem Diagramm lässt sich auch gut die Spilllänge von 10 s ablesen.



**Abb. 3.2.:** Sowohl der Verlauf der Zählrate eines Streifens des Hodoskops, als auch der eine Luminositätsanalyse zeigen die gleich Struktur im Verlauf eines Spills. Dabei ist zu beachten, dass die Zeitzählung im Diagramm der Zählraten eine Sekunde früher startet, als in dem Diagramm der Luminositätsanalyse.

### 3. Inbetriebnahme

Als nächstes soll für eine Messung der Vergleich der verschiedenen Streifen betrachtet werden. Abbildung 3.3 zeigt den Vergleich zwischen der Zählraten innerhalb und außerhalb eines Spills. Im Anhang finden sich in Abbildung A.9 alle Histogramme. Hier sind auch die Raten der Photomultiplier von Jura und Salève getrennt dargestellt und nicht nur, wie in Abbildung 3.2 die Zählrate bei beidseitiger Auslese. An diesen Grafiken lassen sich bereits einige Eigenschaften des Hodoskops ablesen.

Zum einen kann eine erste, grobe Abschätzung der zeitlichen Auflösung gemacht werden. Da die höchste Rate bei ca. 400000 Ereignissen pro Sekunde liegt muss die Auflösung kleiner als  $2,5 \mu\text{s}$  sein.

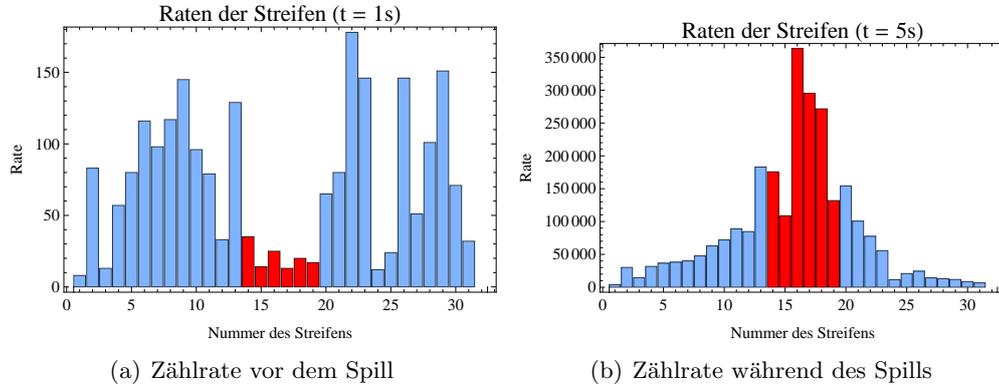
Bei der Betrachtung der Raten von Jura und Salève sieht man, dass die Rate der Photomultiplier von Jura generell höher ist als die auf Salève. Diese liegt an der Ablenkung durch den Magneten. Die Teilchen werden Richtung Salève abgelenkt. Da die im Szintillator erzeugten Photonen eine geringere Wegstrecke zu dem Photomultiplier von Salève zurücklegen müssen, ist auch die Wahrscheinlichkeit, dass sie nicht absorbiert werden und damit zu einem Signal führen höher.

Man sieht, dass Streifen 32 beim Mittelwert und bei Jura keine Rate zeigt. Daraus lässt sich schließen, dass hier ein Defekt vorliegt. Die Überprüfung des Signals mit dem Oszilloskop ergab, dass zwar ein analoges Signal in der Vetobaracke ankommt, durch einen beschädigten Constant Fraction Discriminator jedoch keine Auslese möglich ist. Der Vergleich mit den Nachbarkanälen zeigt, dass Streifen 15 und Streifen 24 in allen Histogrammen (Abb.A.9) eine recht kleine Rate haben.

Betrachten wir zunächst einmal Streifen 15. Es zeigt sich jedoch in keinem der Histogramme der Seiten ein so deutlicher Einbruch wie im Histogramm der beidseitigen Auslese. Man sieht aber wieder, dass die Rate geringer ist, als man es durch Extrapolation der Raten von Streifen 14 und Streifen 16 erwarten könnte. Es lässt sich also vermuten, dass es zu Verlusten bei der Lichtleitung im Streifen kommt.

Bei Streifen 24 scheint es eine andere Ursache zu geben. Hier ist nur in den Histogrammen von Jura ein Einbruch in den Rate zu erkennen. In diesem Fall scheint also die die Auslese dieses Photomultipliers das Problem zu sein. Tabelle A.1 ist zu entnehmen, dass die Spannung dieser Basis mit 1400 V vergleichsweise gering ist. Eine Erhöhung der Spannung könnte das Problem also beheben.

### 3.5. Zeitspektren von H1



**Abb. 3.3.:** Vergleich der Zählrate der Kanäle vor und während eines Spills. Die Kanäle mit Luftlichtleiter sind in rot eingefärbt.

Auch die Raten außerhalb eines Spills lassen Rückschlüsse auf die Eigenschaften von H1 zu. Die Signale werden nur noch durch kosmische Strahlung erzeugt. Da diese diffus ist, sollte sich keine ortsabhängige Variation wie bei dem fokussierten Strahl des Experiments ergeben. Die zugehörigen Diagramme zeigen dennoch wieder Schwankungen. Diese haben zwei Ursachen. Zum einen kann es von Streifen zu Streifen durch die spezifischen Eigenschaften jedes Photomultipliers und jeder Basis zu unterschiedlicher Verstärkung der Signale und damit zu Schwankungen in den Nachweisrate kommen. Zum anderen ist der Messzeitraum von einer Sekunde recht kurz, sodass statistische Schwankungen ins Gewicht fallen können.

Es fällt aber auf, dass die Streifen mit Luftlichtleiter eine wesentlich geringere Rate haben, als die Streifen ohne Luftlichtleiter. Die Ursache hierfür könnte die kleinere aktive Fläche dieser Streifen sein. Dann sollte die Rate um einen Faktor, der dem Verhältnis der Szintillatorlängen entspricht, ( $\frac{180}{230} \approx 0,78$ ) abnehmen. Um dies zu verifizieren wurde für alle Raten, die außerhalb eines Spills gemessen wurden der Mittelwert der Raten von Kanälen ohne Luftlichtleiter und von Kanälen mit Luftlichtleiter gebildet. Aus dem Verhältnis der Mittelwerte folgt aber eine Abschwächung um ca. 23%. Die kleiner aktive Fläche kann also nicht die alleinige Ursache für dies Schwankung sein. Der Luftlichtleiter, mit den zusätzlichen Phasenübergängen vom Szintillatormaterial in Luft und umgekehrt, scheint zusätzlich zu einer Abschwächung zu führen.

### 3.5. Zeitspektren von H1

Während des Probetriebs für die DVCS-Datennahme wurden mit COOL Zeitspektren für jeden Kanal von H1 aufgenommen (Abb. A.11 und Abb. A.10). Außerdem wurde im Fall der beidseitigen Auslese eines Streifens das Spektrum der Differenz der auf Jura und Salève gemessenen Zeit ermittelt (Abb. A.12). Im Folgenden sollen diese Spektren analysiert werden.

Die Spektren sind durch eine Kurve im Koordinatensystem dargestellt. Dies ist jedoch nur der Darstellbarkeit geschuldet. Eigentlich handelt es sich hierbei auch wieder im

### 3. Inbetriebnahme

Histogramme. Da die Breite eines Bins auf Grund der großen Datenmenge jedoch sehr klein gewählt werden kann, entsteht der Eindruck einer glatten Kurve.

An dieser Stelle sei zunächst kurz dargestellt, wie sich die Zeitinformationen interpretieren lassen. Ein Teilchen, das durch den Szintillator geht erzeugt an dem Ort der Durchgangs Licht. Dieses Licht breitet sich mit der Lichtgeschwindigkeit des Mediums aus. So erreicht es erst nach einer gewissen Zeit die Photomultiplier. Der Wert der Zeit ist also ein Maß für den Ort der Erzeugung. Man kann jedoch nicht direkt aus der gemessenen Zeit auf den Ort zurückschließen, da der Zeitpunkt des Auftreffens des Teilchens  $t_{\text{hit}}$  natürlich nicht bekannt ist. Er kann jedoch aus der Summe der auf Jura und Salève gemessenen Zeiten  $t_j$  und  $t_s$  ermittelt werden.

$$t_j + t_s = (t_{\text{hit}} + t_{\text{hit} \rightarrow j}) + (t_{\text{hit}} + t_{\text{hit} \rightarrow s})$$

Dabei stellen  $t_{\text{hit} \rightarrow j}$  und  $t_{\text{hit} \rightarrow s}$  die Zeiten, die das Licht braucht um vom Trefferort zu den Photomultiplier Jura und Salève zu kommen. Diese sind zwar auch unbekannt, ihre Summe  $t_{\text{Lauf}}$  kann jedoch aus den Länge der Szintillatoren, Lichtleiter und gegebenenfalls Luftlichtleiter und der Lichtgeschwindigkeit im entsprechenden Medium bestimmt werden.

$$\begin{aligned} t_j + t_s &= 2t_{\text{hit}} + (t_{\text{hit} \rightarrow j} + t_{\text{hit} \rightarrow s}) = 2t_{\text{hit}} + t_{\text{Lauf}} \\ \Rightarrow t_{\text{hit}} &= \frac{t_j + t_s - t_{\text{Lauf}}}{2} \end{aligned}$$

Die Summe der gemessenen Zeiten kann also als Triggerzeitpunkt verwendet werden, da sie unabhängig vom Auftreffort des Teilchens ist.

Zur Bestimmung der des Auftrefforts eignet sich jedoch die Differenz der Zeiten. Diese ist ein Maß dafür, wie weit ein Teilchen von der Mitte des Streifens entfernt auftraf.

#### 3.5.1. Zeitspektren der einzelnen Kanäle

Bei der Betrachtung der Spektren der einzelnen Kanäle fällt auf, dass Streifen 7 und Streifen 32 keine Signale liefern. Für Streifen 32 wurde die Ursache bereits im obigen Abschnitt erläutert. Bei Streifen 7 war eine defekte Photomultiplierbase auf Salève die Ursache. Sie konnte ausgetauscht werden, sodass dieser Streifen bei der Ratenmessung bereits wieder zu Verfügung stand. Ein defektes Bauteil in einem Kanal des Streifens macht sich in dieser Analyse in beiden Kanälen bemerkbar, da eine beidseitige Auslese als Bedingung zum Speichern der Daten gesetzt wurde. Aus den Spektren der einzelnen Kanäle kann man wieder einige Eigenschaften des Hodoskops ablesen. Zum einen kann man aus der Höhe der Peaks auf die Rate der einzelnen Kanäle schließen. Da die Raten aber bereits im vorangegangenen Abschnitt untersucht wurden, soll an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen werden.

Aus der Abweichung der Rate von benachbarten Bins des Histogramms kann man sehen, wie stark ein Kanal durch Rauschen beeinflusst wird. Dies wird vor allem bei den oberen Streifen (22 bis 31 deutlich). Hier die Rate allgemein niedriger, sodass

### 3.5. Zeitspektren von H1

Ereignisse, die von natürlicher Strahlung ausgelöst werden, eine größere Rolle spielen.

Der Vergleich der Kanäle von Jura und Salève eines Streifens zeigt, dass die Peaks von Salève breiter sind. Außerdem zeigen sich bei diesen Kanälen häufiger Doppelpeaks. In den Streifen 14 bis 19 sind Doppelpeaks zu erwarten. Hier sind in der Mitte die Luftlichtleiter und damit keine aktive Fläche.

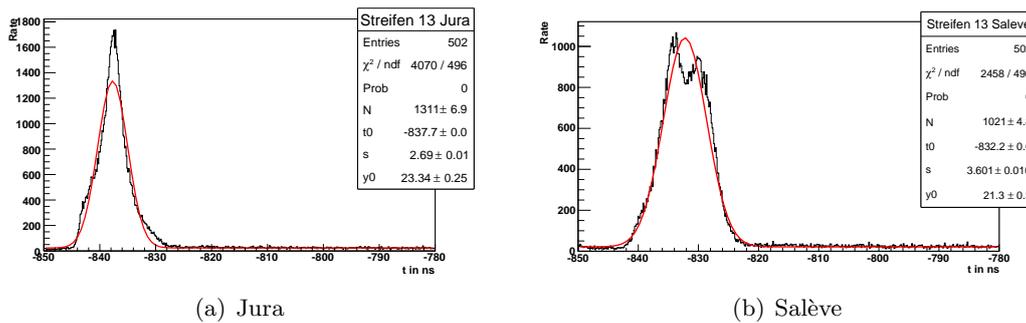
Somit kann hier auch keine Szintillation stattfinden und damit fallen Laufzeiten des Licht die zu diesem Ortsbereich gehören weg. Die Doppelpeaks in den anderen Streifen können durch statistische Schwankungen, Reflektionen oder Störungen beim Leiten durch das Kabel verursacht worden sein.

Die Auflösung des Hodoskops lässt sich aus der Breite der Peaks bestimmen. Dazu werden an die Peaks Gaußkurven

$$g(t) = \frac{N}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \frac{(t-t_0)^2}{s^2}} + y_0$$

angefittet. Zu dem eigentlichen Peak wurde noch eine Konstante  $y_0$  addiert um den aus natürlicher Strahlung resultierenden Untergrund zu beschreiben.

Die Übersicht der Spektren zeigt deutlich, dass die Fluktuation durch Zufallsereignisse noch recht hoch ist. Dies ist durch den kleinen Stichprobenumfang bedingt. Aus diesem Grund wurde die Bestimmung der Auflösung nur exemplarisch bei Streifen 13 durchgeführt. Dieser Streifen wurde ausgewählt, da er der letzte Streifen unter dem Loch ist und somit hier eine hohe Rate zu sehen ist. Es wurde keine Streifen der direkt in der Mitte liegt ausgewählt, da dieser durch den Luftlichtleiter nicht mehr einfach durch einen Peak beschrieben werden kann.



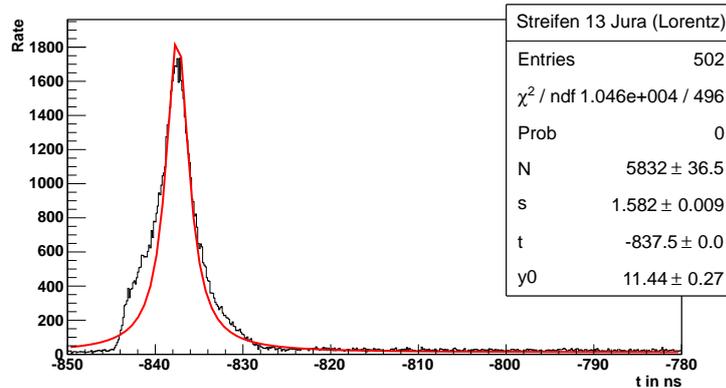
**Abb. 3.4.:** Zeitspektren von Streifen 13 mit Gaußfits

Abbildung 3.4 zeigt die Spektren dieses Streifens mit angepassten Gaußkurven. Es wird deutlich, dass der Zeitpeak von Jura nicht gut durch die Funktion beschrieben werden kann. Die Gaußkurve ist zu breit um diesen Peak anzunähern. Deshalb wurde dieser noch einmal mit eine Lorentzpeak

$$l(t) = \frac{N}{\pi} \frac{s^2}{s^2 + (t - t_0)^2} + y_0$$

### 3. Inbetriebnahme

beschrieben. Abbildung 3.5 zeigt das Resultat dieser Anpassung. Der Peak wird durch diese Funktion augenscheinlich wesentlich besser beschreiben.



**Abb. 3.5.:** Anpassung eines Lorentzpeaks an den Kanal Jura von Streifen 13

Der Parameter  $s$  beider Verteilungsfunktionen kann als Maß für die Auflösung des Kanals gesehen werden. So ergibt sich für den Kanal Jura aus dem Lorentzpeak eine Auflösung von 1,582 ns und für den Kanal Salève aus dem Gaußpeak eine Auflösung von 3.601 ns. Es wird deutlich, dass die Auflösung von Salève in etwa um den Faktor zwei schlechter ist. Die liegt an der Doppelppeakstruktur. Es wurden jedoch keine zwei Peaks angefitet, da nicht sicher woher diese Struktur stammt und somit die Auflösung künstlich verbessert würde.

Insgesamt zeigt sich jedoch, dass die Auflösung wesentlich besser ist, als durch eine erste Schätzung aus den Raten angenommen werden konnten. Dies zeigt außerdem, dass mit den im Experiment auftretenden Raten das Hodoskop nicht an der Grenze der möglichen Auflösung betrieben wird. Wäre dies der Fall, könnte es durch Mehrfachtreffer in einem Streifen zu Zufallskoinzidenzen kommen, die ein falsches Triggersignal erzeugen. Die nochmals bessere Auflösung des LAS-Triggers von 1 ns wird durch eine Korrektur der Signale mit den von der BMS gemessenen Zeiten erreicht.

#### 3.5.2. Bestimmung der Lochbreite aus dem Spektrum der Zeitdifferenzen

Wie bereits erwähnt kann aus der Zeitdifferenz des Kanals von Jura und Salève eines Streifens der Auftreffort des Teilchen relativ zu Streifenmitte bestimmt werden. Da die Auflösung des Hodoskops jedoch beschränkt ist, wird auch die berechnete Auftreffposition entsprechend verschmiert sein. Selbst die Auflösung  $\Delta t = 1$  ns, die sich aus der Zeitkorrektur durch die BMS ergibt, führt bei einer Lichtgeschwindigkeit im Szintillator von  $c_{\text{Szinti}} = 18,9742 \frac{\text{cm}}{\text{ns}}$  [1] zu einer Ortsauflösung von  $\Delta x = c_{\text{Szinti}} * \Delta t \approx 18$  cm. Diese Auflösung ist nicht geeignet um die Abmessungen des Lochs mit einer zufriedenstellenden Genauigkeit zu bestimmen.

Außerdem kann die Kante des Lochs nur schwer bestimmt werden. Das Maximums eines der beiden Peaks wird auf Grund der begrenzten Auflösung nicht direkt auf dem

Zeitwert liegen, der zu der der Position des Lochs gehört.

**Simulation der Zeitdifferenz**

Um die Spektren besser zu verstehen, wurde zunächst der Einfluss des Fehlers in der Zeitbestimmung auf das Spektrum untersucht. Hierzu wurde mit *Mathematica* eine Simulation geschrieben, die ein solches Zeitspektrum generiert. Als Vereinfachung wurde die Reflektion im Szintillator nicht berücksichtigt und nur gerade vom Erzeugungsort zum Photomultiplier laufende Photonenspuren betrachtet. Weiterhin wurde der Lichtleiter nicht eingerechnet, da er nur zu einer Verschiebung der Zeit um die Laufzeit des Licht in ihm führt. Außerdem wird die Absorption der Photonen vernachlässigt. Im Folgenden wird das Prinzip der Simulation erläutert. Alle 0.05 cm werden in den Szintillatoren  $N$  Photonen erzeugt. Die Anzahl der erzeugten Photonen muss selbstverständlich vom Ort der Erzeugung abhängen, da das Hodoskop in der Mitte von wesentlich mehr Teilchen getroffen wird, als am Rand. Als einfaches Modell wurde für diese Näherung ein gaußförmiges Strahlprofil

$$N(x) = 100 e^{-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}}$$

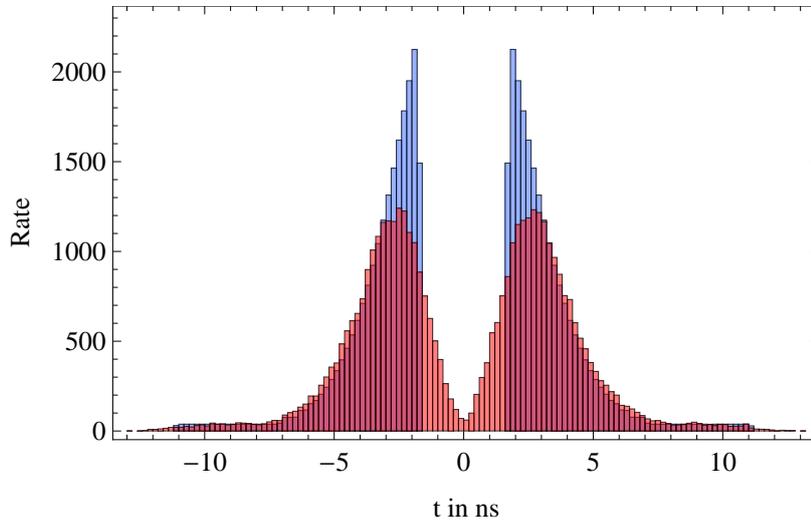
mit  $\mu = 115$  und  $\sigma = 25$ , eingesetzt. Für jedes der Photonen wird dann die Laufzeit zu dem Photomultiplier Jura und Salève berechnet. Da die Lichtgeschwindigkeit im Luftlichtleiter anders ist als im Szintillator wurde unterschieden, ob die Photonen in dem Szintillator Jura oder Salève erzeugt wurden. Die Formeln zu Berechnung der Laufzeit finden sich in Tabelle 3.1. Der Ursprung der Koordinatenachse liegt bei der Stelle der Auslese auf Jura. Die Lichtgeschwindigkeit ist in Luft  $c_{Luft} = 29,9705 \frac{cm}{ns}$  und im Szintillator  $c_{Szinti} = 18,9742 \frac{cm}{ns}$ .

		Photon erzeugt	
		Jura	Salève
Photon nachgewiesen	Jura	$\frac{x}{c_{Szinti}}$	$\frac{180-x}{c_{Szinti}} + \frac{50}{c_{Luft}}$
	Salève	$\frac{x-50}{c_{Szinti}} + \frac{50}{c_{Luft}}$	$\frac{230-x}{c_{Szinti}}$

**Tabelle 3.1.:** Berechnungsformeln für die Laufzeit des Lichts

Abbildung 3.6 zeigt die resultierende Verteilung der Differenz von Jura und Salève einmal ohne Fehler und einmal mit einem angenommenen Fehler von  $\Delta t = 1$  ns, der durch die Addition einer Zufallsvariablen aus Bereich von  $-\Delta t$  bis  $\Delta t$  umgesetzt wurde. An dieser Grafik sieht man deutlich die Verschiebung der Maxima der Peaks weg vom Rand des Lochs.

### 3. Inbetriebnahme



**Abb. 3.6.:** *Simuliertes Spektrum der Zeitdifferenz. Rot mit Fehler von  $\Delta t = 1$  ns und blau ohne Zeitverschmierung*

Im Folgenden wurde versucht die Größe dieser Verschiebung so zu charakterisieren, dass sie aus den gemessenen Daten herausgerechnet werden kann. Es ist klar, dass die Verschiebung von der Verschmierung der Zeit abhängt. Also wurde die Abhängigkeit der Verschiebung von der Breite des Peaks untersucht. Neben der Zeitauflösung, führen auch die Absorption und Reflektionen zu einer Verbreiterung des Peaks. Diese Phänomene werden also auch durch den angenommenen Fehler auf der Zeit mit berücksichtigt.

Als einzige noch zu bestimmende Komponente bleibt dann die Anzahl der an einem Punkt erzeugten Photonen  $N$ . Hier wurde weiterhin die Näherung eines gaußförmigen Strahl eingesetzt. Als freier Parameter dieses Profils bleibt dann noch die Breite  $\sigma$ . Diese wurde für die folgenden Untersuchungen so angepasst, dass eine gute Übereinstimmung der simulierten Spektren mit den gemessenen zu erkennen war. Für  $\mu$  wurde der Werte  $\mu = 115$ , also die Mitte eines Streifens, gewählt, da aus den aufgenommenen Zeitspektren keine Verschiebung der Strahlmittelpunkts vom geometrischen Mittelpunkt zu erkennen ist. Eine solche Verschiebung würde sich durch unterschiedliche Höhen der Doppelpeaks bemerkbar machen. Da jedoch mal der rechte und mal der linke Peak in den Zeitspektren höher ist, kann dies auf statistische Schwankungen zurückgeführt werden. Die Amplitude  $N$  kann frei gewählt werden. Sie beeinflusst die der Simulation zu Grunde liegende Statistik.

#### **Verschiebung der Maxima**

Als nächster Schritt wurde die Abhängigkeit der Verschiebung der Maxima von dem Zeitwert, der zum Rand des Lochs gehört näher untersucht. Hierzu wurde die bereits erwähnte Simulation genutzt. Die Breite des den Stahl des Experiments beschreiben-

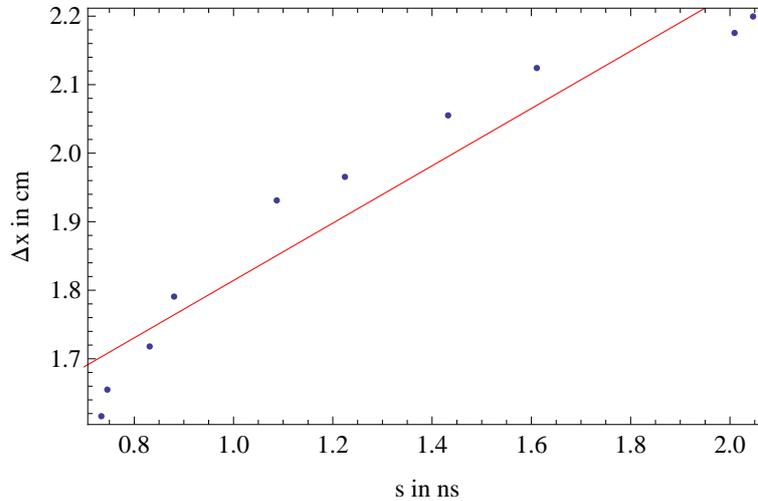
### 3.5. Zeitspektren von H1

den Gaußpeaks wurde auf  $\sigma = 25$  gesetzt. Dann wurden für die Fehler der Zeiten Werte im Bereich von 0 bis 1.6 in Schritten von 0.2 die verschmierten Zeitspektren gemessen. An diese Spektren wurden jeweils Doppellorentzpeaks

$$l_{\text{doppel}}(t) = \frac{N_1}{\pi} \frac{s_1^2}{s_1^2 + (t - t_1)^2} + \frac{N_2}{\pi} \frac{s_2^2}{s_2^2 + (t - t_2)^2} + y_0$$

angepasst. Die einzelnen Fits sind im Anhang in Tabelle A.13 dargestellt.

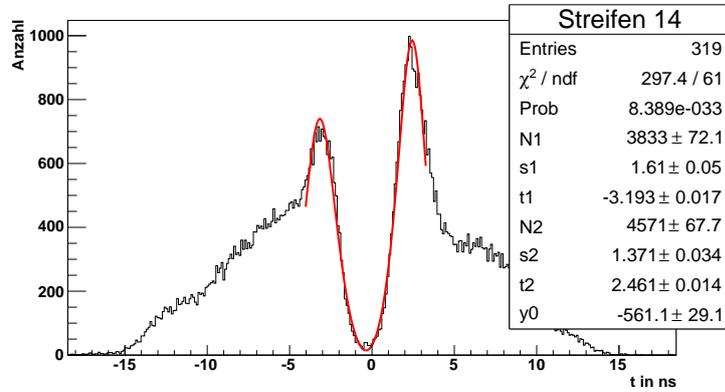
Von den ermittelten Peaks wurde die Breite gegen die Abweichung von dem Zeitwert, der zu der Koordinate des Rands gehört, aufgetragen. Wiederholtes Durchführen der Simulation zeigte, dass es auf Grund der, den Fehler darstellenden, Zufallszahl zu augenscheinlichen Abweichungen in dem Plot kam. Diese Differenzen hätten durch einen größeren Stichprobenumfang für jedes einzelnes Zeitspektrum abgeschwächt werden können. Da hierfür aber auch erheblich mehr Rechenzeit nötig gewesen wäre, wurde davon abgesehen. Auf Grund der Schwankung wurde die Beschreibung der Datenpunkte auch nur grob durch eine Gerade vorgenommen. Dies sollte jedoch in erster Näherung brauchbare Ergebnisse liefern. Ein Beispiel für eine solche Anpassung ist in Abbildung 3.7 zu sehen.



**Abb. 3.7.:** Verschiebung der Peaks in Abhängigkeit der Peakbreite

An dieser Stelle soll nun noch kurz gezeigt werden, dass mit der berechneten Verschiebung aus den aufgenommenen Zeitspektren die Breite des Lochs berechnet werden kann. Hierzu wurde das Spektrum von Streifen 14, dem ersten Streifen mit Luftlichtleiter verwendet. An das Zeitspektrum wurden ebenfalls Doppellorentzpeaks angefitet (Abb. 3.8 und Tabelle A.2).

### 3. Inbetriebnahme



**Abb. 3.8.:** Anpassung von Doppellorentzpeaks an das Spektrum der Zeitdifferenzen von Streifen 14

Aus der Differenz der Lage der Maxima der einzelnen Peaks sollte sich die nun also die Breite des Lochs  $b$  berechnen lassen.

$$b = ((t_2 - \Delta t_2(s_2)) - (t_1 + \Delta t_1(s_1)))c_{\text{Luft}} \approx 48\text{cm}$$

Bei dieser Berechnung wurde für die Korrekturen der Mittelwerte  $\Delta t_1(s_1)$  und  $\Delta t_2(s_2)$  der Wert der Geraden aus Abbildung 3.7 an der Stelle  $s_1$  beziehungsweise  $s_2$  eingesetzt. Da die tatsächliche Lochbreite bei ca. 50 cm liegt, liefert diese Methode also eine recht gute Abschätzung.

Bei dieser Rechnung wurde auf eine Fehlerabschätzung verzichtet. Sie soll nur plausibel machen, dass diese Methode funktioniert. Im Folgenden wird beschrieben wie das Verfahren noch weiter entwickelt werden kann. Dort wird dann auch auf eine Fehlerabschätzung eingegangen.

#### Methoden zur iterativen Bestimmung der Lochbreite

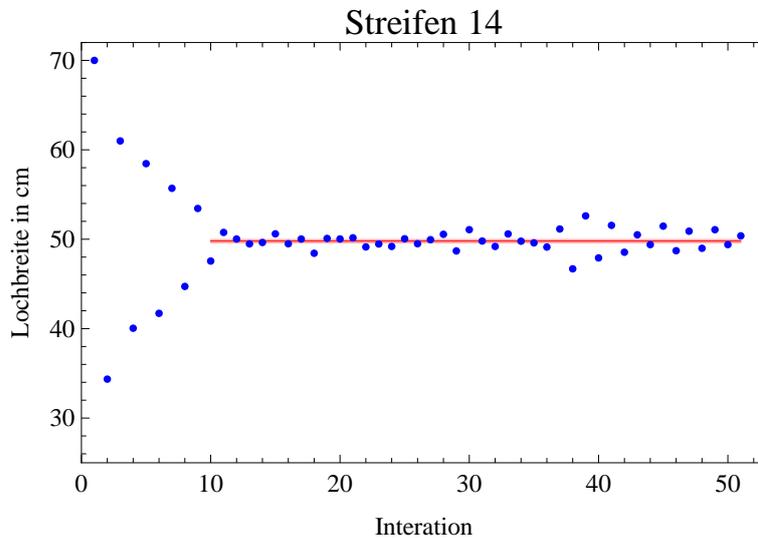
Bei allen bisherigen Analysen wurde die tatsächliche Breite des Lochs bei der Erzeugung der Zeitspektren verwendet. Da diese im Normalfall aber nicht bekannt ist, wurde noch ein Verfahren entwickelt, mit dem auch ohne die genau Kenntnis der Lochbreite, die Berechnung durchgeführt werden kann. Hierzu startet man mit einem Schätzwert für die Breite des Lochs. Mit diesem Werte wird aus den Parametern der an die Messwerte angepassten Lorentzpeaks eine Verschiebung und damit eine Breite des Lochs bestimmt. Im nächsten Iterationsschritt wird die Prozedur mit der berechneten Lochbreite erneut ausgeführt.

Die Erfahrung zeigte jedoch, dass in der Simulation nicht für alle Streifen die gleiche Strahlbreite verwendet werden kann. Ein Blick auf die gemessenen Spektren (Abb. A.12) zeigt auch schon, dass die Peaks der weiter außen liegenden Streifen breiter sind als die der in der Mitte liegenden Streifen. Der Rahmen dieser Arbeit ließ es leider nicht mehr zu die Form der Spektren in einen Zusammenhang mit dem Parameter  $\sigma$  zu

bringen. Dies wäre beispielsweise durch die Breite des Gesamtpeaks (Einhüllenden der zwei Lorentzpeaks) möglich. Aus diesem Grund wurde die Breite für Streifen 14 und Streifen 16 durch Ausprobieren so bestimmt, dass die Berechnung eine Lochgröße im Bereich von 50 cm liefert. Für Streifen 14 war die bei  $\sigma = 25$  und für Streifen 16 bei  $\sigma = 20$  der Fall.

Für Streifen 15 wurde dann der arithmetische Mittelwert der Werte der Nachbarstreifen eingesetzt. Die Streifen oberhalb der Mitte wurde mit dem gleichen Werte für  $\sigma$  wie der Streifen unterhalb mit gleichem Abstand zu Mitte berechnet.

Für die Streifen 14, 15, 18 und 19 wurde die Breite des Lochs dann mit dem oben erwähnten Verfahren berechnet. Als Startwert für die Lochbreite wurde  $b = 70$  cm gewählt. Im Verlauf der Iterationen war zunächst eine Konvergenz zu erkennen. Dann fluktuieren die berechneten Werte um einen scheinbaren Mittelwert. Dies lässt sich durch den Einfluss des Fehlers als Zufallsvariable erklären. Als Schätzwerte für die Lochbreite wurde deshalb der Mittelwert der fluktuierenden Werte genommen, mit dem Quotienten aus der Standardabweichung und der Wurzel der Anzahl der Freiheitsgrad als Fehler des Schätzwerts. In Abbildung 3.9 ist der berechnete Wert der Lochbreite für alle Iterationsschritte aufgetragen. Es ist ebenfalls der Mittelwert mit dem durch die Standardabweichung gegebenem Fehlerbereich gezeigt. Die zu den restlichen Streifen gehörenden Graphen sind im Anhang in Tabelle A.3 gezeigt.

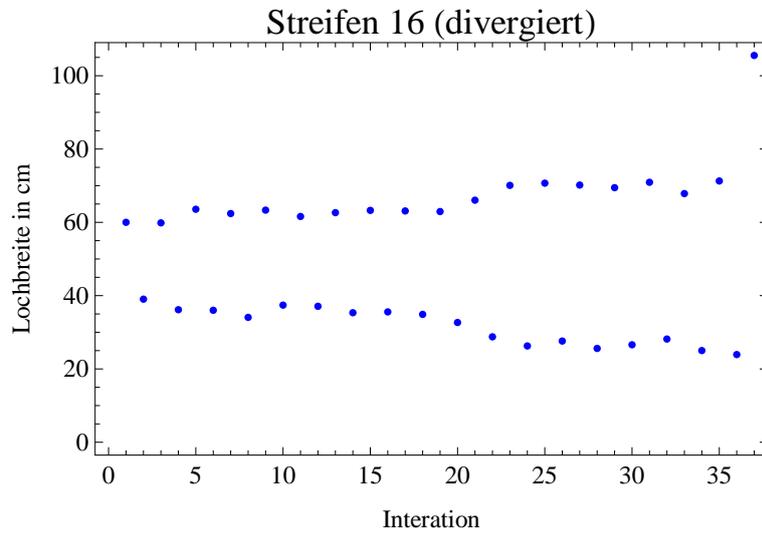


**Abb. 3.9.:** Konvergenz der Iteration für Streifen 14. Der Mittelwert ist in dem Bereich der Iterationsschritte, aus denen er berechnet wurde als rote Linie mit dem Fehlerbereich in hellrot eingetragen.

Für die Streifen 16 und 17 zeigte sich jedoch ein anderes Verhalten im Laufe der Iterationen. Abbildung 3.10 zeigt das Verhalten für Streifen 16. In diesem Fall wurde der Startwert bereits, um eine Konvergenz zu erleichtern, auf  $b = 60$  cm gesetzt. Die Werte schwanken um einen scheinbaren Mittelwert, liegen jedoch abwechselnd weit

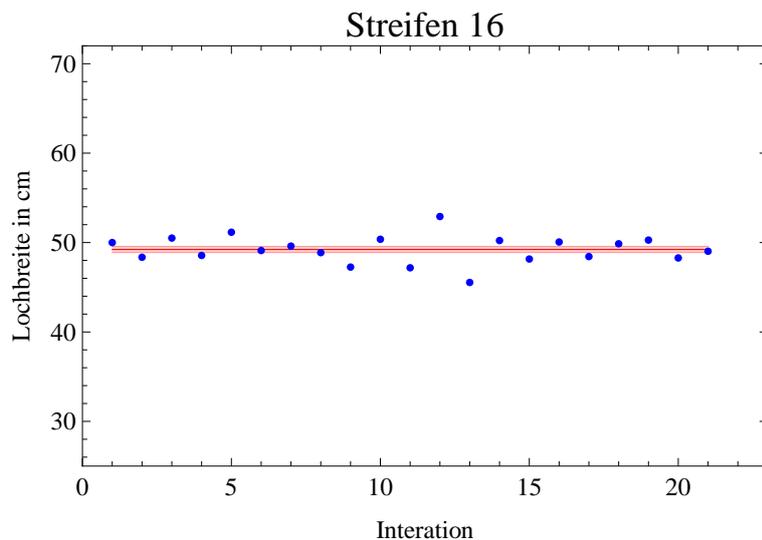
### 3. Inbetriebnahme

ober oder unterhalb dieses Werts. Mit der Zahl der Iterationen nimmt der Abstand von diesem Mittelwert zu. Hier ist also zunächst noch keine Konvergenz erkennbar.



**Abb. 3.10.:** Verhalten der Iteration für Streifen 16 bei einem Startwert von  $b = 60$  cm

Als nächster Schritt wurde daher der Startwert auf den abgeschätzten Mittelwert der bei der Iteration gewonnenen Datenpunkte von 50 cm gesetzt. Nun zeigten sich das bereits bekannte Verhalten der Fluktuation um diesen Mittelwert (Abb. 3.11). Zur Abschätzung der Lochbreite wurde dann wieder der Mittelwert gebildet.



**Abb. 3.11.:** Verhalten der Iteration für Streifen 16 bei einem Startwert von  $b = 50$  cm

Eine Übersicht über alle berechneten Schätzwerte für alle Streifen ist in Tabelle 3.2

### 3.6. Vermessung des Hodoskops mit rekonstruierten Spuren

gegeben. Zum Vergleich sind hier auch die Werte angegeben, die nach dem Bauen durch Abmessen des Überstands der Lichtleiter über die Rohacellplatte berechnet wurden. Da die Länge der Lichtleiter, der Szintillatoren und der Rohacells bekannt ist, kann daraus die Breite des Lochs ermittelt werden. Der Fehler dieses Abmessens wurde mit 0,5 cm abgeschätzt.

Streifen	Lochbreite in cm	
	aus Iteration	gemessen
14	49,8 ± 0,2	50,7 ± 0,5
15	50,6 ± 0,3	50,7 ± 0,5
16	49,2 ± 0,3	49,7 ± 0,5
17	49,9 ± 1,0	50,4 ± 0,5
18	50,9 ± 0,1	49,8 ± 0,5
19	46,8 ± 0,6	49,6 ± 0,5

**Tabelle 3.2.:** *Mit dem Iterationsverfahren berechnete und nach dem Bauen gemessenen Lochbreiten*

Der Vergleich der Werte zeigt, dass für alle Streifen der über die Iteration berechnete Wert in der Nähe des aus der direkten Messung bestimmten liegt. Die prozentualen Abweichungen liegen zwischen 0,2% und 5,6%. Dies spricht dafür, dass das Iterationsverfahren verlässliche Werte liefert. Man muss hierbei jedoch auch immer beachten, dass die Breite des simulierten Strahl an zwei Streifen angepasst wurde. Trotzdem zeigt sich, dass das Verfahren auch für die anderen Streifen die erwarteten Werte liefert. Es lässt sich also vermuten, dass eine weiterführenden Entwicklung des Verfahrens auch die Notwendigkeit der Anpassung unter Kenntnis des Lochs erübrigt.

### 3.6. Vermessung des Hodoskops mit rekonstruierten Spuren

Die genaueste Methode um die Abmessungen des Hodoskops zu bestimmen ist die Vermessung mit rekonstruierten Spuren. Hierzu wurde ein auf die neuen Abmessungen des Hodoskops abgestimmtes UserEvent geschrieben. Da bis zur Fertigstellung dieser Arbeit aber leider noch keine rekonstruierten Spuren zur Verfügung standen, wird an dieser Stelle nur das Prinzip mit der Auswertung mit Daten von 2011 dargestellt.

In dem UserEvent wird für jeden Event zunächst überprüft, ob ein Streifen beidseitig ausgelesen wurde. Hier werden die Zeiten der Photomultiplier von Jura und Salève sowie deren Summe und Differenz rausgeschrieben. Aus der Zeitdifferenz wird eine Abschätzung des Trefferorts vorgenommen.

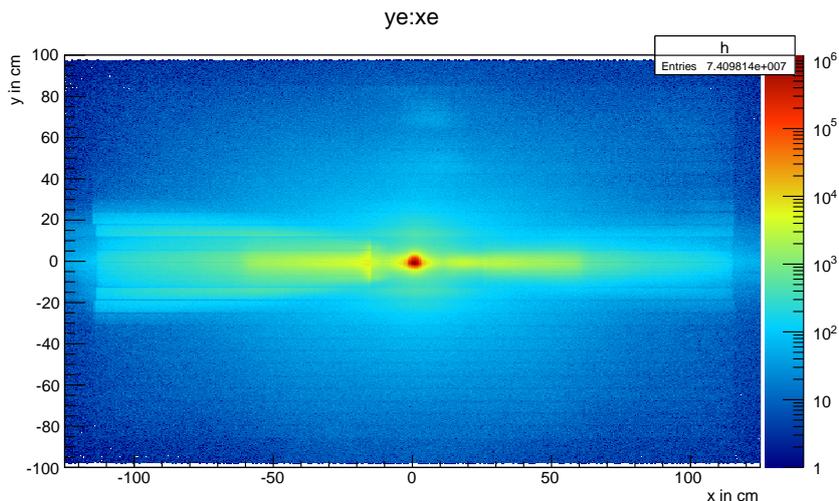
Im zweiten Teil des Programm wird jede rekonstruierte Spur auf H1 extrapoliert. Dann wird überprüft, ob der Streifen, der der y-Position der Spur entspricht ausgele-

### 3. Inbetriebnahme

sen wurde. Ist dies der Fall, so wird die Trefferposition, der Impuls des Teilchens und die Position, an der das Teilchen zuletzt nachgewiesen wurde rausgeschrieben.

Alle Daten werden in einem Root-Tree gespeichert.

Zur Auswertung können mit den Zeitspektren die oben bereits beschriebenen Analysen durchgeführt werden. Trägt man in einem Plot die extrapolierten Trefferpositionen gegeneinander auf, so kann man die Abmessungen des Hodoskops aus der Trefferhäufigkeit an einem Ort ablesen. In Abbildung 3.12 ist ein solcher Plot dargestellt. Das COMPASS-Koordinatensystem ist so gewählt, dass der Ursprung der  $x$ - $y$ -Ebenen in der Strahlmittem, und damit auch in der Mitte des Hodoskops, liegt. Man sieht deutlich die Streifenstruktur von H1. Das Loch in der aktiven Fläche wird ebenfalls deutlich. Allerdings sind in dem Loch noch viele Treffer verzeichnet. Diese sollte eigentlich durch die Bedingung der beidseitigen Auslese nicht mit aufgezeichnet werden. Es scheint sich hierbei um Zufallskorrelationen handeln. In dem UserEvent wurde aus diesem Grund auch die Anzahl der extrapolierten Spuren, die mit einem Streifen korrespondieren rausgeschrieben. Eine Einschränkung auf einen Treffer brachte jedoch auch keine bessere Darstellung.



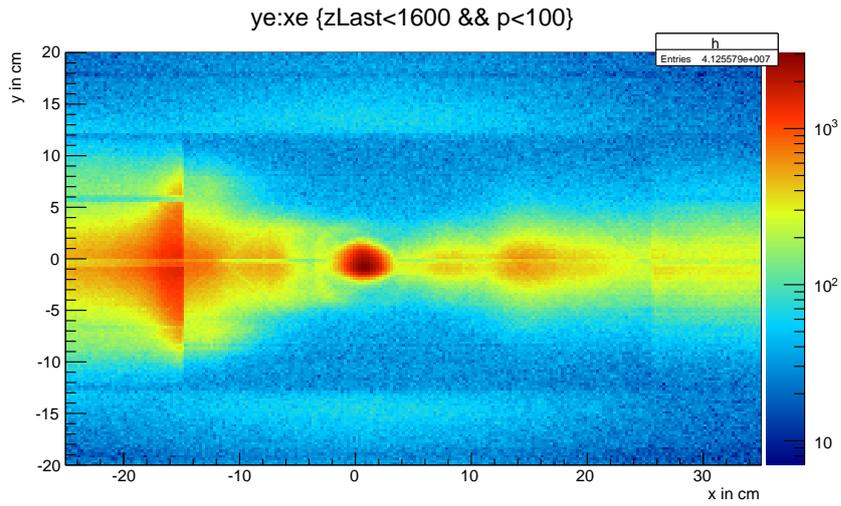
**Abb. 3.12.:** Vermessung von H1 mit rekonstruierten Spuren

Um das Loch bessere darzustellen wurde der Wertebereich der Positionen eingeschränkt. Außerdem wurde die weitere Anforderungen an die verwendeten Daten gestellt. Die Postion des letzten Nachweises wurde auf  $z_{\text{Last}} < 1600$  cm eingeschränkt. So wird sichergestellt, dass die Teilchen nur im LAS, also dem Spektrometerteil, für den das Hodoskop konstruiert wurde, nachgewiesen werden. Dadurch wurde die unerwünschte Rate im Loch etwas gesenkt und insbesondere die obere und die untere Kante wurde besser sichtbar.

Mit einer Einschränkung des Impulses auf  $p < 100 \frac{\text{GeV}}{c}$  konnte außerdem die Anzahl der Teilchen in der Mitte weiter gesenkt werden, sodass die Skala eine kleineren Bereich abdecken konnte und somit die Auflösung der Darstellung besser wurde. Die so

### 3.6. Vermessung des Hodoskops mit rekonstruierten Spuren

gewonnene Darstellung ist in Abbildung 3.13 zu sehen. Man erkennt deutlich, dass sich das Loch über den Bereich von  $x \geq -15$  cm bis  $x \leq 25$  cm erstreckt. Dies stimmt genau mit den erwarteten Abmessungen des asymmetrischen Lochs des alten Aufbaus überein.



**Abb. 3.13.:** Darstellung des Lochs in der aktiven Fläche mit rekonstruierten Spuren



## 4. Fazit

Alles in allem, kann man sagen, dass das Ziel der Arbeit erreicht wurde. H1 konnte erfolgreich umgebaut werden.

Die Auswertung der ersten Daten von H1 zeigt, dass es keine unerwarteten Unstetigkeiten in den Zeitspektren und den Raten pro Kanal gibt. Dies zeigt deutlich, dass das Hodoskop wieder ohne Probleme Daten liefert.

Bei der Datenanalyse konnte mit dem Iterationsverfahren eine Möglichkeit, mit der die Größe einer inaktiven Fläche aus den Zeitspektren berechnet werden kann gezeigt werden. Diese Methode bietet noch vielfältige Möglichkeiten zur Weiterentwicklung. Hier ist insbesondere an die Bestimmung der Strahlparameter zu denken.

Die genaue Vermessung des Hodoskops mit rekonstruierten Spuren konnte leider mangels der hierfür benötigten Daten nicht mehr durchgeführt werden. In der Arbeit mussten deshalb Daten von 2011 verwendet werden. Mit diesen Daten konnte jedoch gezeigt werden, dass das erstellte UserEvent die gewünschte Auslese vornimmt. In diesem Zusammenhang wäre eine weitere Analyse der zu der Rate im Loch führenden Spuren interessant.



# A. Anhang

## A.1. Haltegestell zum Kleben der Szintillatoren

Als Haltegestell für die Szintillatoren während des Klebevorgangs wurde eine Konstruktion aus Maytec-Aluminiumprofilen angefertigt. Hierzu wurden zwei Stangen auf einem Fuß aus zwei Stangen mit einer Querverstrebung als Stabilisierung aufgesetzt. Zwischen den beiden vertikalen Stangen wurde unten und in ca. 80 cm Höhe eine Querstrebe eingesetzt. Auf der unteren Strebe wurde eine Platte, auf der die Szintillatoren aufgestellt werden können angebracht. An die obere Querstrebe wurden beidseitig rechts und links zwei Gewindestangen montiert, sodass mit Flügelschrauben ein Aluminiumrechteckprofil gefestigt werden konnte. Zwischen diesem Profil und der oberen Querstrebe wurden die Szintillatoren eingeklemmt (Abb. A.1). Um die Szintillatoren zu schonen wurde mit Gewebepapier eine Polsterung aus Verpackungsflocken aufgebracht (Abb. A.2).

## A.2. Reparatur einer fehlerhaften Klebung

Wenn in einer Klebung zu viel Luftblasen eingeschlossen waren, musste der Lichtleiter wieder abgebrochen und neu aufgeklebt werden.

Zum Abbrechen des Lichtleiters wurde der Szintillator mit der breiten Seite auf einen Tisch gelegt. Er sollte so aufliegen, dass die Klebestelle genau an der Tischkante ist. Der Szintillator wurde nun mit einer Hand nahe der Kante fest an den Tisch gedrückt. Die andere Hand umfasste den Lichtleiter und mit einer kräftigen, ruckartigen Abwärtsbewegung wurde der Lichtleiter abgebrochen.

Als nächstes mussten die Klebefläche für eine neue Klebung vorbereitet werden. Der Klebstoff musste komplett herunter geschliffen werden. Hierzu wurde zunächst Schleifpapier der Körnung 1500 und später Körnung 2000 verwendet. Beim Schleifen wurde darauf geachtet, dass durch ein Wegkippen des Schleifpapiers an den Kanten die Ecken rund werden.

Die Lichtleiter wurden auf einem auf einen Tisch aufgeklebten Stück Schleifpapier mit leichtem Druck und kreisenden Bewegungen vom Klebstoff befreit. Um Staubbildung und eine Erwärmung des Materials zu vermeiden, wurde das Schleifpapier mit Wasser angefeuchtet. Die Szintillatoren sind durch ihre Länge für einen Schleifprozess nach gleichem Muster zu unhandlich. Sie würden deshalb aufrecht stehend in dem Haltegestell geschliffen. Dazu wurde das Schleifpapier auf einen Metallblock aufgespannt und angefeuchtet. Mit diesem Schleifblock wurde dann mit kreisenden Bewegungen die Oberfläche abgetragen. Hier musste besonders darauf geachtet werden, dass der

## A. Anhang



**Abb. A.1.:** Foto des Haltegestells mit eingespannten Szintillatoren. Zum Schutz der Szintillatoren wurde auf die Platte noch polsternde Folie gelegt.

Block an den Kanten nicht wegkippt und die Kante so abgerundet würden.

Während des Schleifvorgang wurde die Oberfläche immer wieder kontrolliert. Sie wurde mit einem Tuch trockengewischt und auf Klebstoffrückstände kontrolliert. Diese sind durch eine helle Reflexion zu erkennen. Sollten sich beim Abbrechen kleine Risse in der Oberfläche gebildet haben, so müssen diese heraus geschliffen werden. An Rissen und Klebstoffrückständen könnten sich beim erneuten Kleben wieder Luft einschließen anlagern.

Wenn die Oberfläche klebstofffrei und eben ist, können die beiden mit Wasser gesäuberten Teile nach dem bereits erläuterten Verfahren erneut aufeinander geklebt werden.



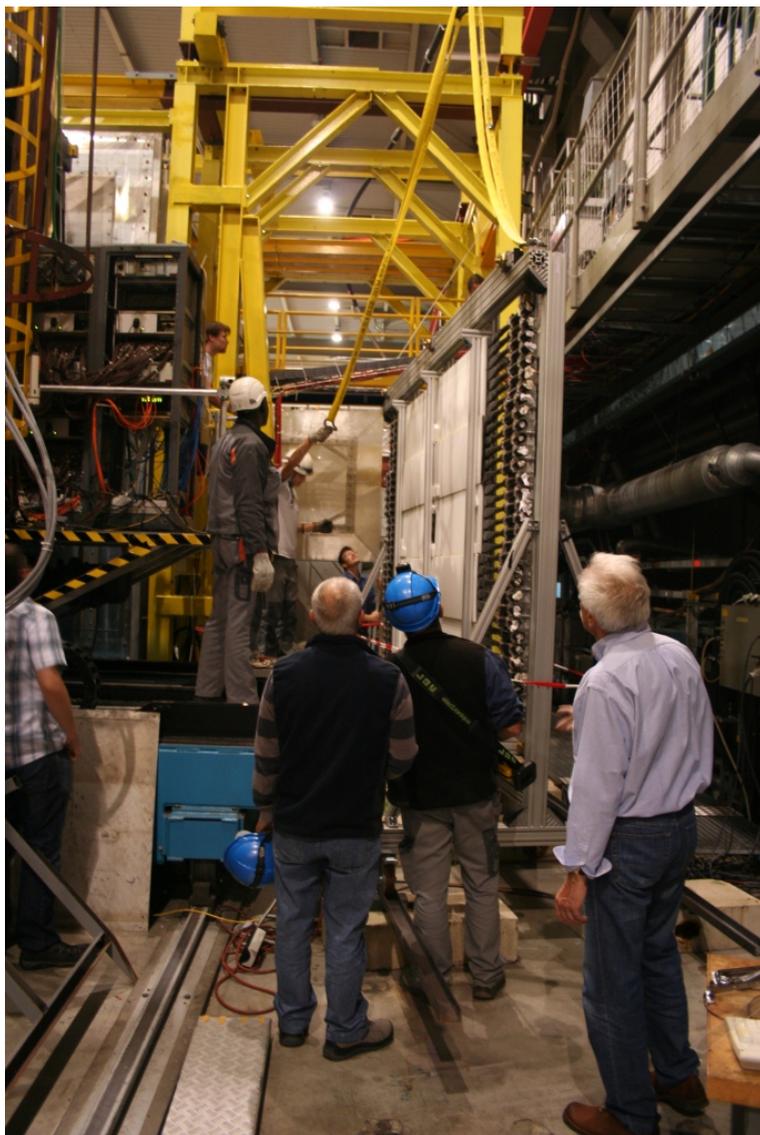
**Abb. A.2.:** Aluminiumrechteckprofil und ein mit Verpackungsflocken bestücktes Klebeband, das zur Polsterung aufgeklebt wird

### A.3. Einbau von H1

Zum Einbau wurde das Hodoskop auf seinem Hilfsgestell durch das hintere Tor in die Halle gerollt. Zum Transport wurden alle Photomultiplier und Basen vom Hodoskop entfernt. Dies ist zum einen zum Schutz der Bauteile, zum anderen aus Platzgründen beim späteren Drehen in die endgültige Position nötig. Am Hilfsrahmen sind drei Innengewinde zum Aufschrauben von Ösen zur Befestigung der Krangurte angebracht. Ein Gewinde ist in der Mitte und jeweils eines rechts und links. Zunächst wurde der Kranhaken mit zwei Gurten an den Ösen an der Seite befestigt. H1 wurde nun oberhalb der Wege auf der Jura zugewandten Seite entlang transportiert und neben HCal 1 auf U-Profilen, die auf die selbe Höhe wie die Plattform neben SM1 und Rich unterfüttert wurden, abgesetzt (Abb. A.3). Dabei mussten die oben am Rahmen von H1 angebrachten Rollen in Richtung Jura zeigen. Über die U-Profile wurde das Hodoskop nun auf die Plattform gerollt. Es wurde so ausgerichtet, dass die mittlere Öse wenige Zentimeter strahlabwärts der Verlängerung der oberen Halteschiene ist. Nun wurde H1, mit einem in dieser Öse befestigtem Gurt, am Kran festgemacht (Abb. A.4). Der Gurt wurde leicht auf Spannung gebracht und die Verbindungen des eigentlichen Rahmens des Hodoskops mit dem Fahrgestell wurde gelöst. Nach leichtem Anheben von H1 konnte das Gestell entfernt werden.

Um H1 in die spätere Position zu drehen, wurde aus Platzgründen die Stange auf der H1 später unten aufsitzt (Abb. A.5) ca. 40 cm Richtung Salève geschoben und abgestützt. Die Halterung dieser Stange wurde abgeschraubt. Nach dem Drehen (Abb. A.6) mussten die Rollen am Rahmen strahlaufrwärts zeigen. Mit diesen Rollen konnte das Hodoskop nun in die obere Halteschiene eingehängt werden (Abb. A.7). Diese Schienen ist bis über die Plattform verlängert. Nun wurde auch die untere Halteschiene zusammen mit einer Verlängerung über der Plattform wieder angebracht. Der Krangurt sowie alle drei Ösen konnten nun wieder vom Hodoskop entfernt werden.

Als nächstes wurden die drei senkrechten Stützen vom Rahmen entfernt. Diese dienten dazu die Gruppen während des Transports gegen Kippen zu sichern. Zwischen der obersten Gruppe und dem Rahmen wurden Distanzstücke aus Rohacell angebracht (Abb. A.8). Schließlich konnte H1 in die endgültige Position geschoben werden. An der oberen Schiene ist auf der Juraseite ein Anschlag angebracht. Abschließend konnte noch die Verlängerung der unteren Schiene wieder demontiert werden.

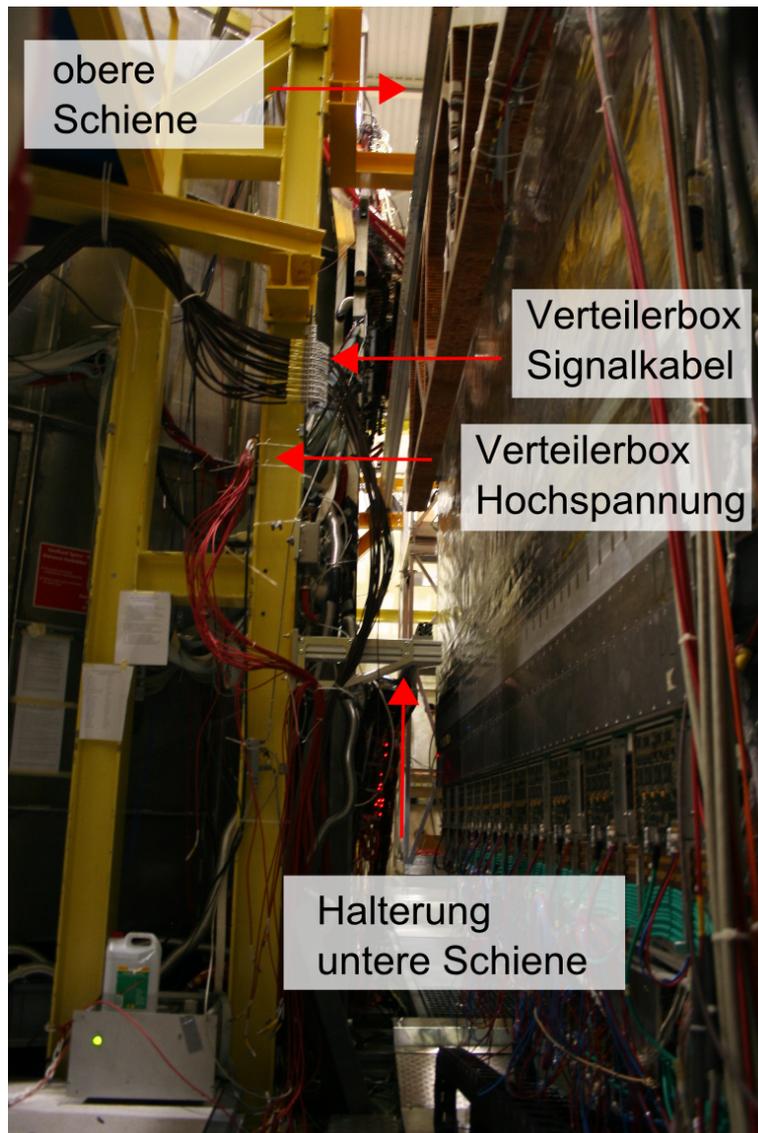


**Abb. A.3.:** *H1 auf den U-Profilen neben HCal1*

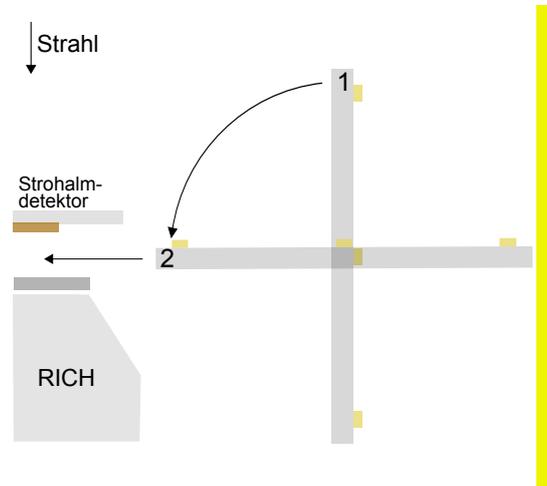
### A.3. Einbau von H1



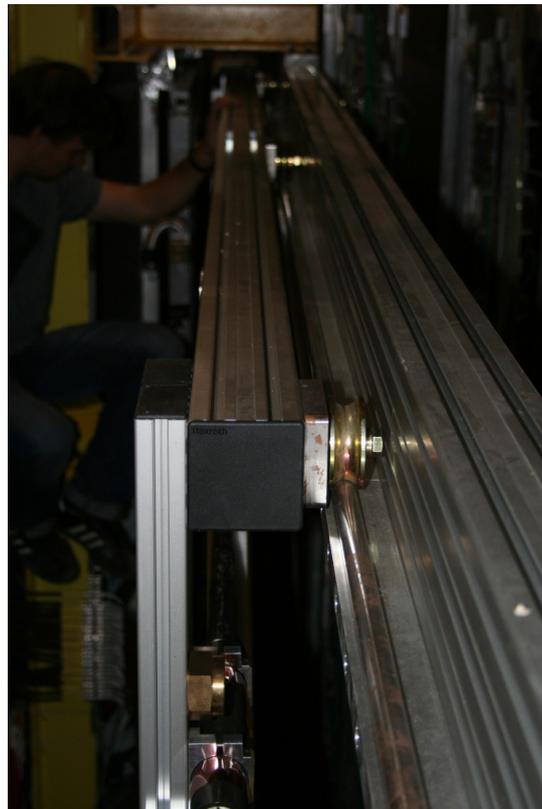
**Abb. A.4.:** Befestigung des Gurtes zum Drehen von H1. Das Foto wurde von der Juraseite strahlabwärts blickend aus gemacht. In der oberen rechten Ecke ist die Trageschiene zu erkennen.



**Abb. A.5.:** Bild der Lücke im Spektrometer, in die H1 eingebaut wird (Blick von Jura). Komponenten die zu H1 gehören sind beschriftet.



**Abb. A.6.:** Schematische Skizze zum Drehen und einschieben von H1. Die Rollen am Rahmen sind durch die gelben Kästchen symbolisiert. Der gelbe Balken am Rand stellt das Stützgerüst aus H-Trägern dar.



**Abb. A.7.:** Rollen in der oberen Führungsschiene

*A. Anhang*



**Abb. A.8.:** *Eingebaute Distanzstücke aus Rohacell zur Stabilisierung am oberen Rand*

### A.4. Zuordnung der Verkabelung

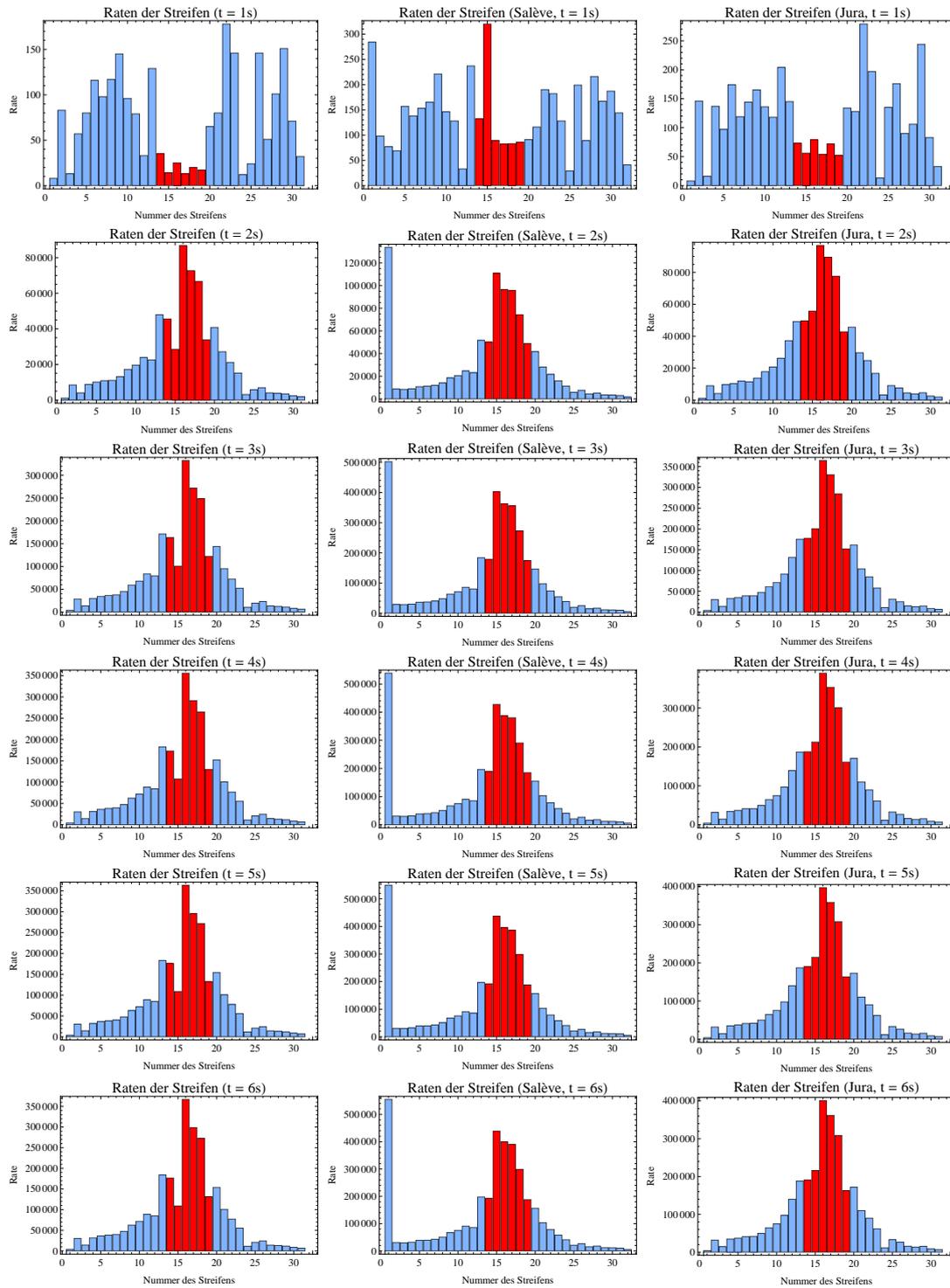
# Kanal	# Signal	HV-Box	Kanal HV-Box	Spannung in V
1	1	Middle	11	1500
2	0	Middle	12	1500
3	3	Middle	13	1300
4	4	Middle	14	1300
5	5	Middle	15	1550
6	6	Middle	16	1500
7	7	Middle	22	1650
8	8	Middle	18	1500
9	9	Middle	19	1500
10	10	Middle	20	1680
11	11	Salève	0	1600
12	12	Salève	1	1500
13	13	Salève	2	1500
14	14	Salève	3	1600
15	15	Salève	4	1550
16	16	Salève	5	1500
17	17	Salève	6	1300
18	18	Salève	7	1500
19	19	Salève	8	1600
20	20	Salève	9	1600
21	21	Salève	10	1700
22	22	Salève	11	1750
23	23	Salève	12	1550
24	24	Salève	13	1400
25	25	Salève	14	1500
26	26	Salève	15	1650
27	27	Salève	16	1600
28	28	Salève	17	1500
29	29	Salève	18	1500
30	30	Salève	19	1600
31	31	Salève	20	1600
32	32	Salève	21	1600
33	53	Middle	0	1800
34	35	Middle	1	1650
35	36	Middle	2	1700
36	37	Middle	3	1400
37	38	Middle	4	1600
38	39	Middle	5	1600
39	40	Middle	6	1550
40	41	Middle	7	1600

A. Anhang

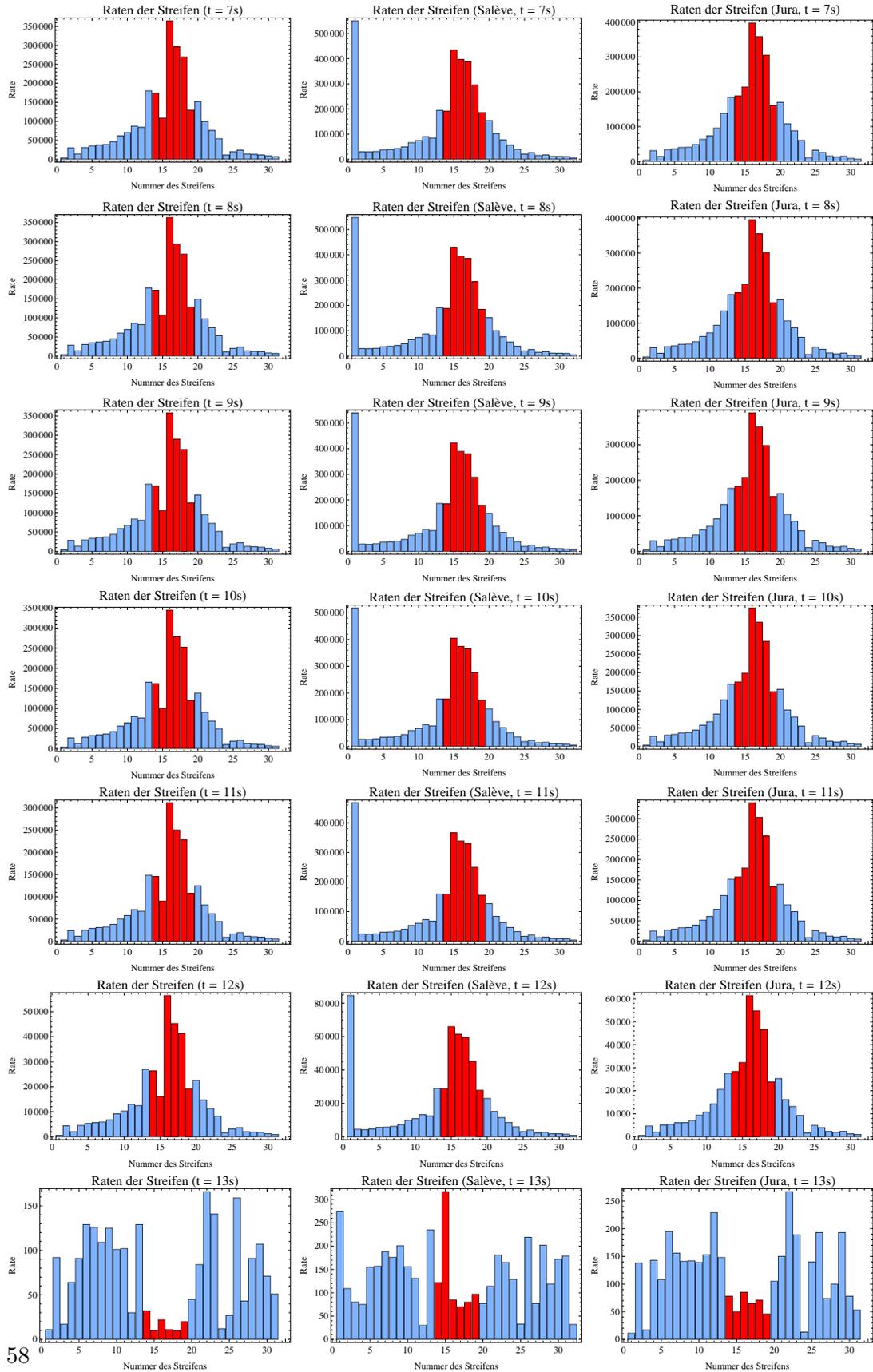
41	42	Middle	8	1600
42	43	Middle	9	1550
43	44	Jura	0	1600
44	45	Jura	1	1500
45	46	Jura	2	1650
46	47	Jura	3	1600
47	48	Jura	4	1500
48	49	Jura	5	1600
49	50	Jura	6	1500
50	51	Jura	7	1600
51	52	Jura	8	1500
52	54	Jura	9	1600
53	55	Jura	10	1650
54	56	Jura	11	1500
55	57	Jura	12	1500
56	58	Jura	13	1500
57	59	Jura	22	1550
58	60	Jura	15	1670
59	61	Jura	16	1550
60	62	Jura	17	1600
61	63	Jura	18	1600
62	64	Jura	19	1650
63	65	Jura	20	1500
64	66	Jura	21	1600

**Tabelle A.1.:** Zuordnung der Kanalnummern zu den Nummern der Signalkabel und der Hochspannung. Die Nummerierung der Kanäle starte bei dem untersten Photomultiplier auf Salève bei 1. Der oberste auf dieser Seite trägt die Nummer 32. Es folgen mit 33 bis 64 die Kanäle Jura von unten nach oben.

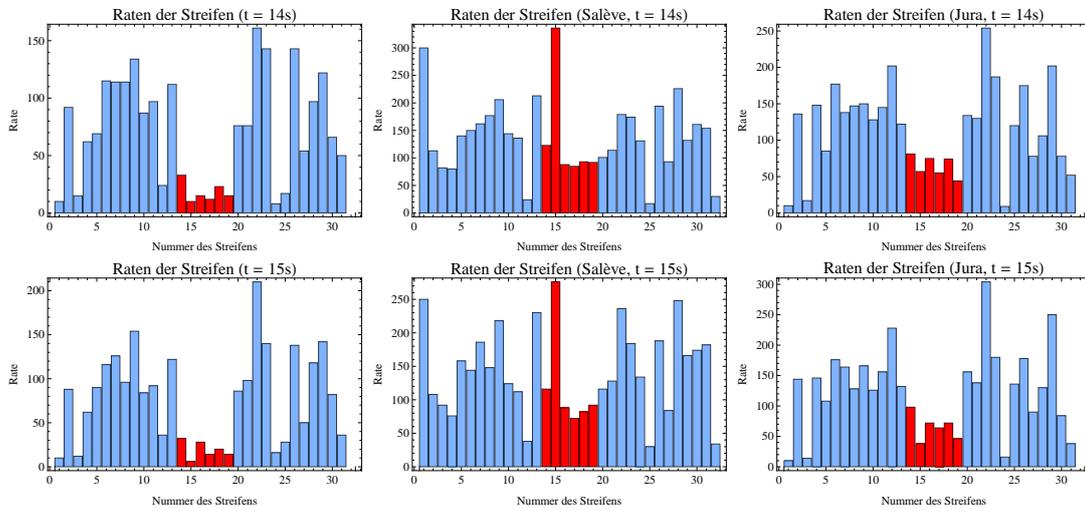
## A.5. Zählraten von H1



# A. Anhang



## A.5. Zählraten von H1



**Abb. A.9.:** Zählraten von H1. Dargestellt sind die Raten pro Kanal für beidseitige Auslese und Auslese nur auf Salève bzw. Jura. Die Kanäle mit Luftlichtleiter sind rot eingefärbt.

## A.6. Zeitspektren

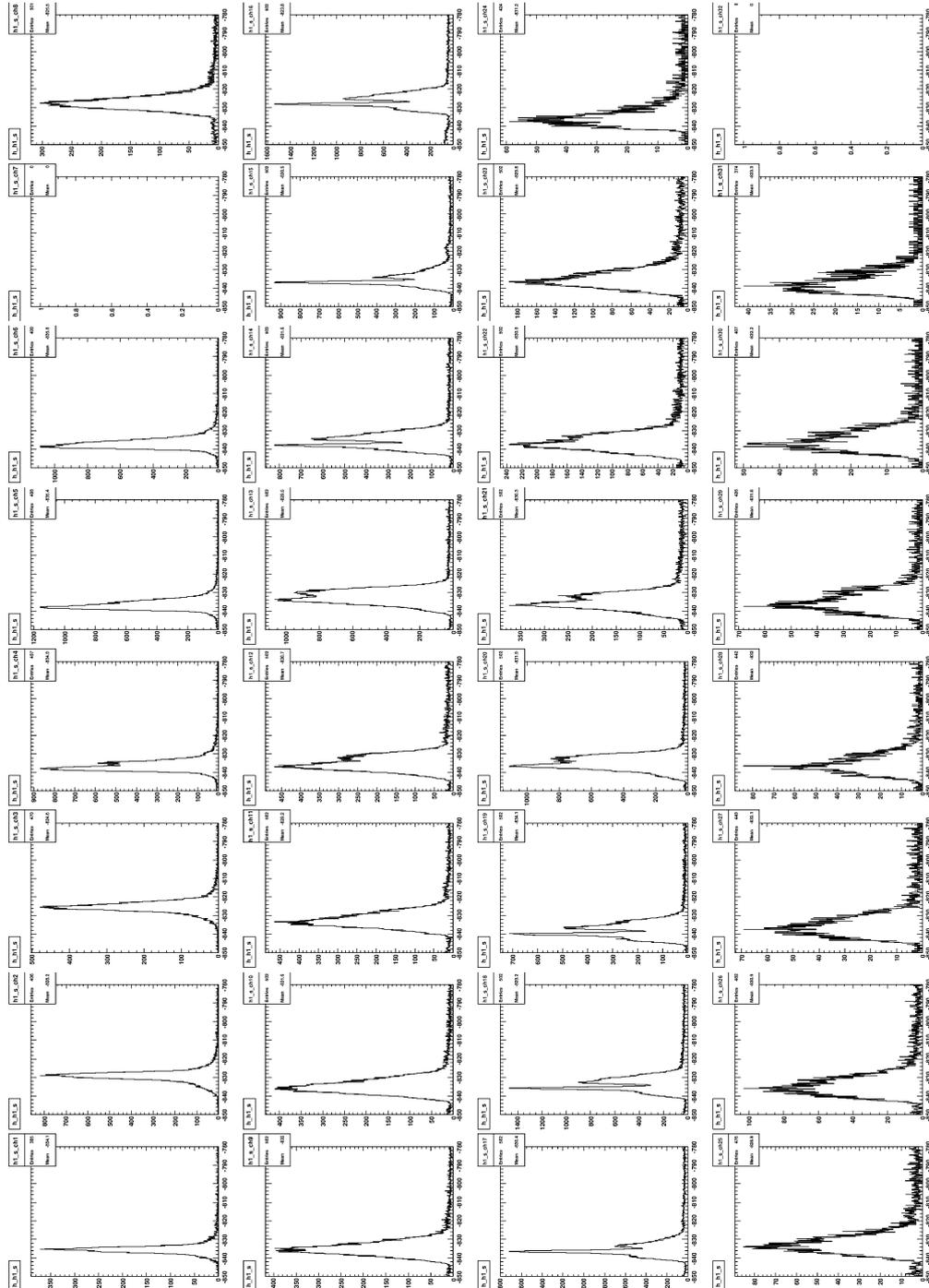


Abb. A.10.: Spektrum der Kanäle auf Salève

## A.6. Zeitspektren

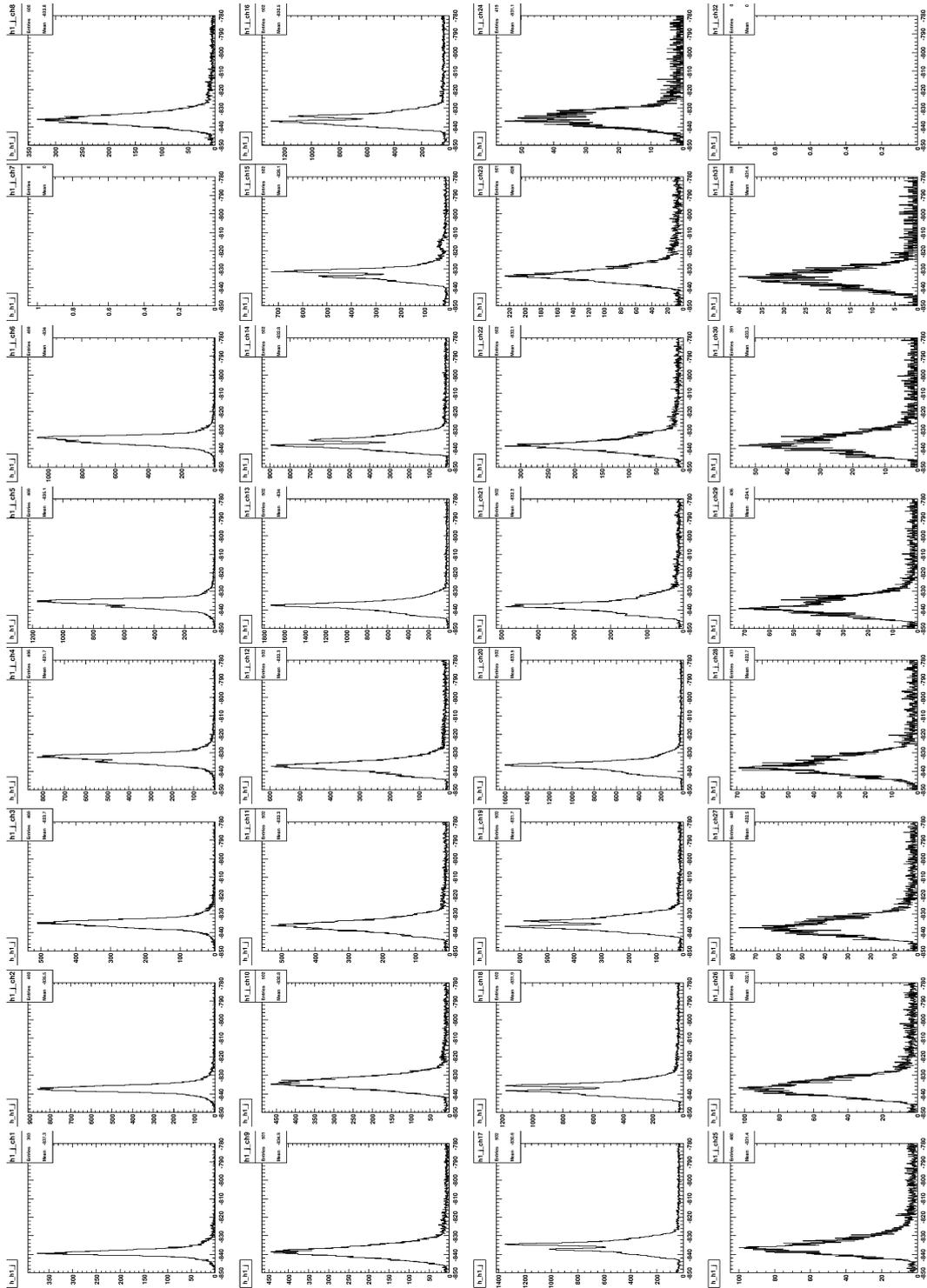


Abb. A.11.: Spektrum der Kanäle auf Jura

# A. Anhang

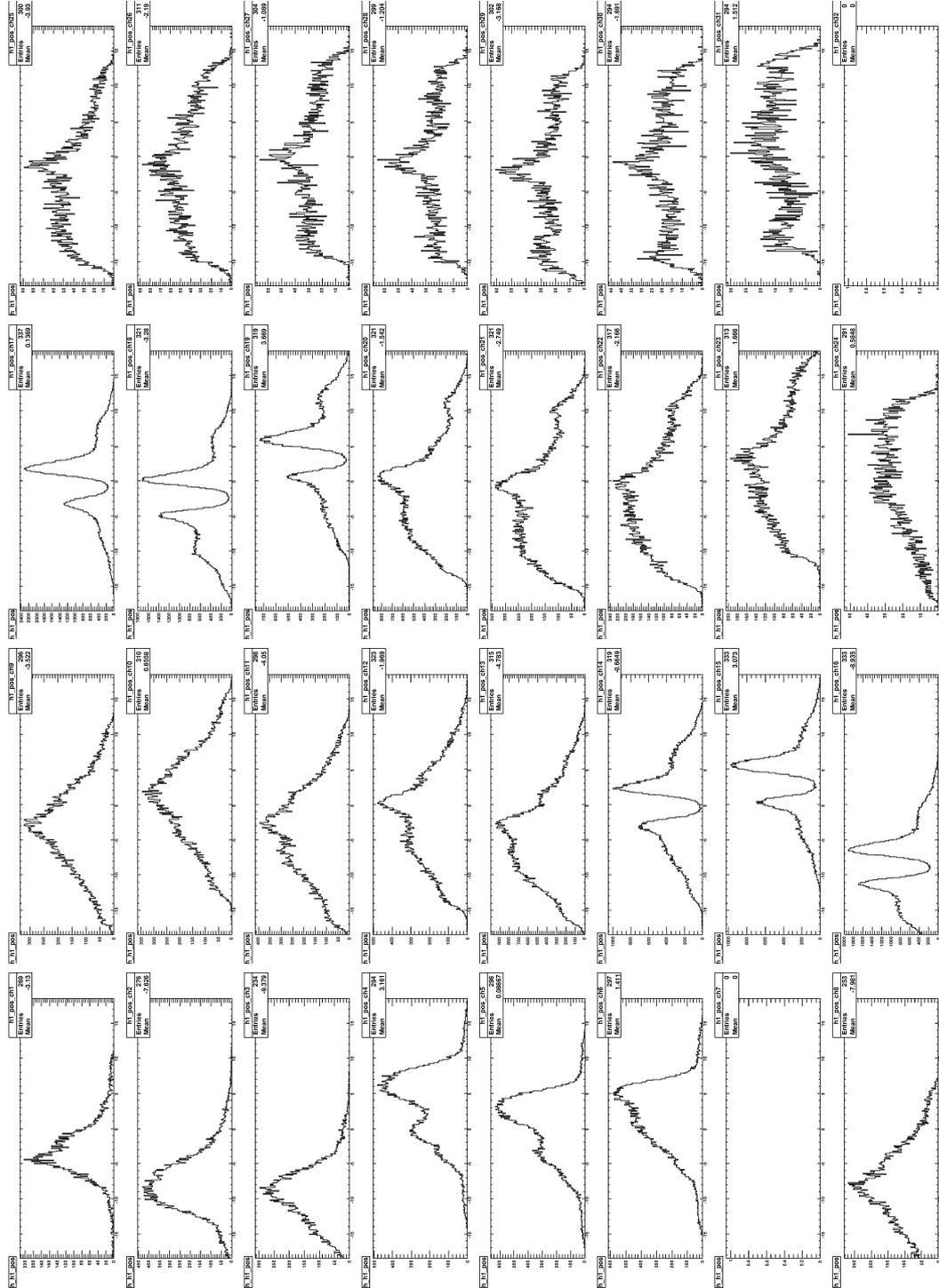


Abb. A.12.: Spektrum der Differenz der Zeiten von Jura und Salève

## A.7. Lorentzfits der Simulation der Verschiebung der Peaks

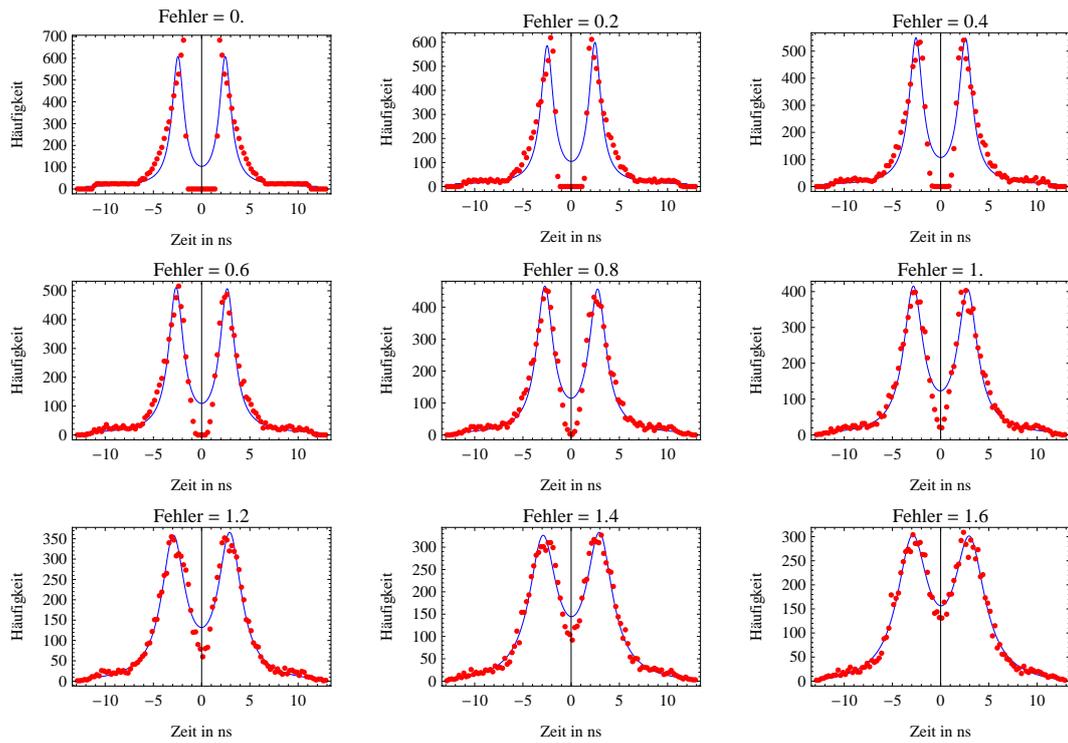


Abb. A.13.: An die für verschiedenen Verschmierungen simulierte Zeitspektren angepasste Doppellorentzpeaks

## A.8. Lorentzfits an die aufgenommenen Spektren

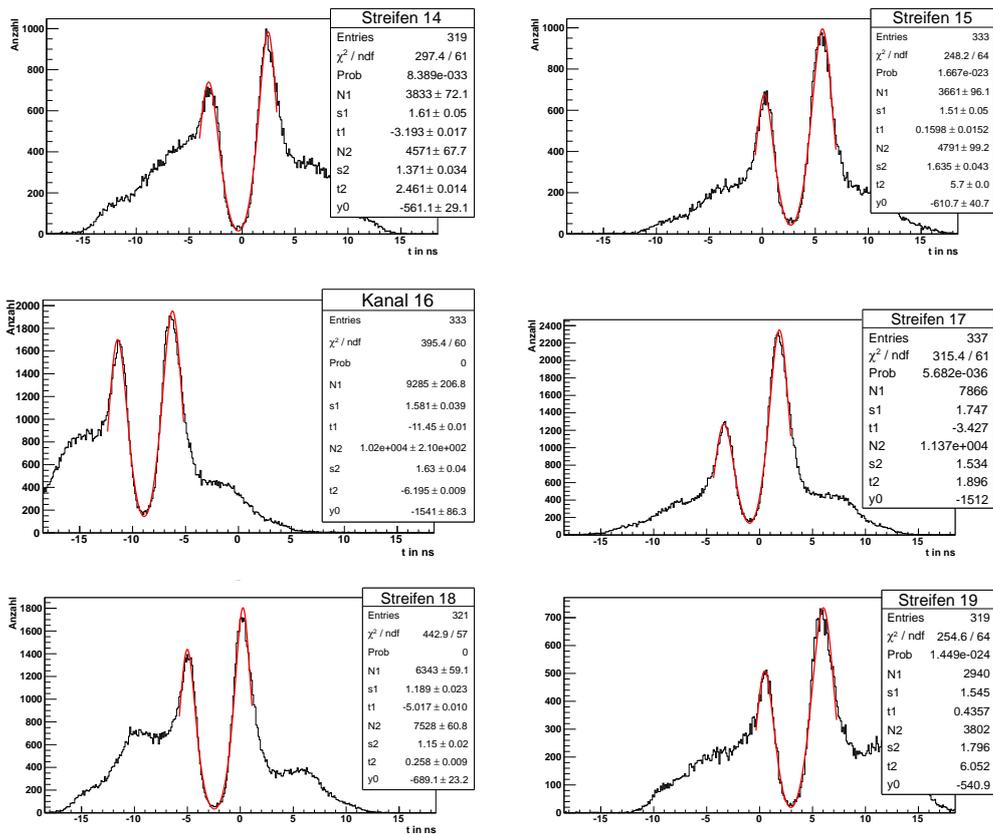
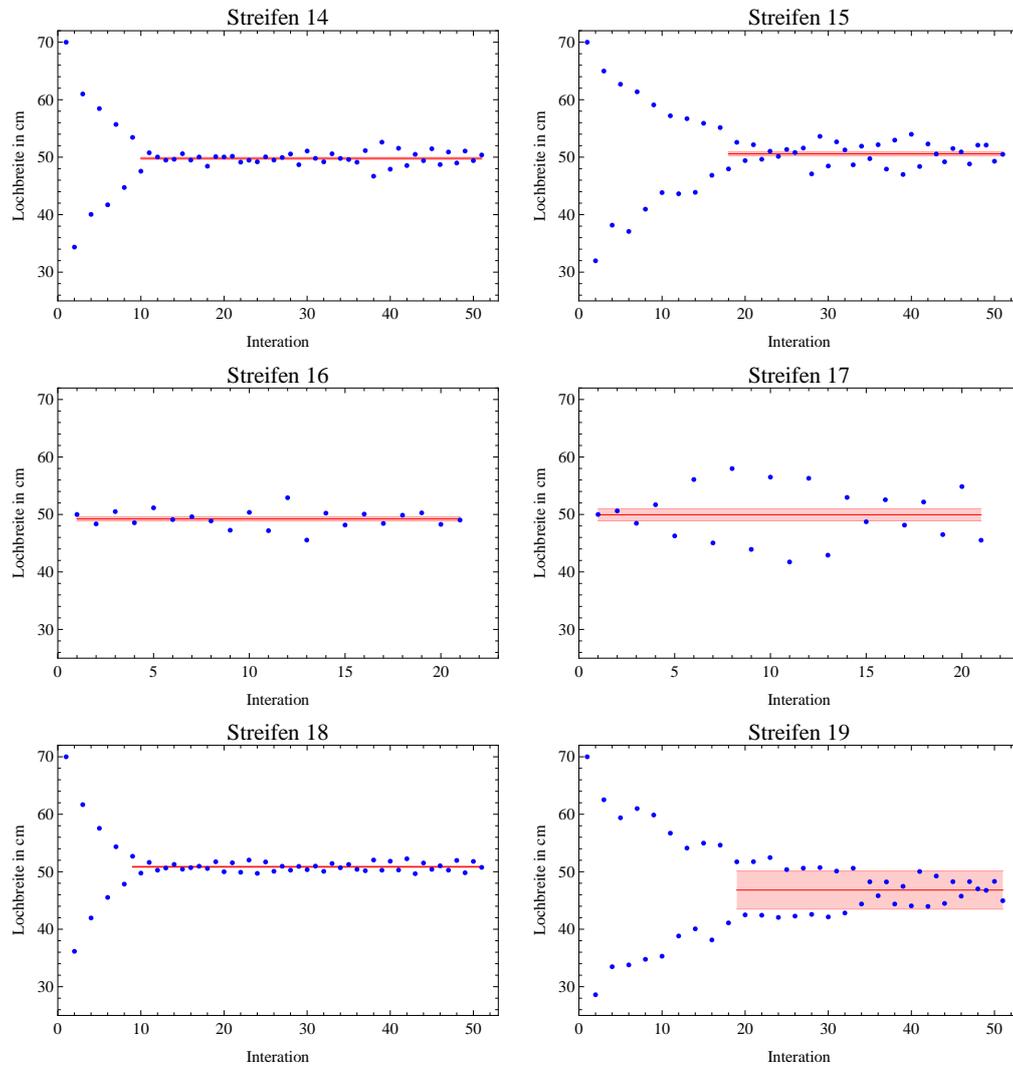


Tabelle A.2.: Lorentzfits an die gemessenen Zeitspektren zur Bestimmung der Lage der Peakmaxima und Peakbreiten

## A.9. Daten der Iteration zur Bestimmung der Lochbreite



**Tabelle A.3.:** Die im Laufe der Iteration für die einzelnen Streifen berechneten Lochbreiten

## A.10. Schaltplan der Photomultiplierbasis

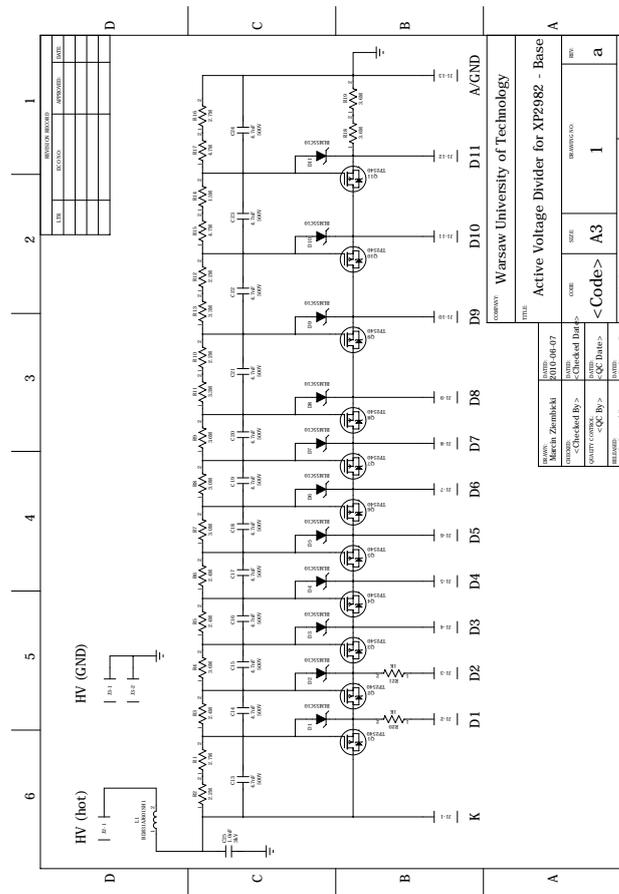


Abb. A.14.: Schaltplan der Base (erstellt von Marcin Ziembicki von der Technischen Universität Warschau)

## A.11. Konstruktionszeichnung der Lichtleiter

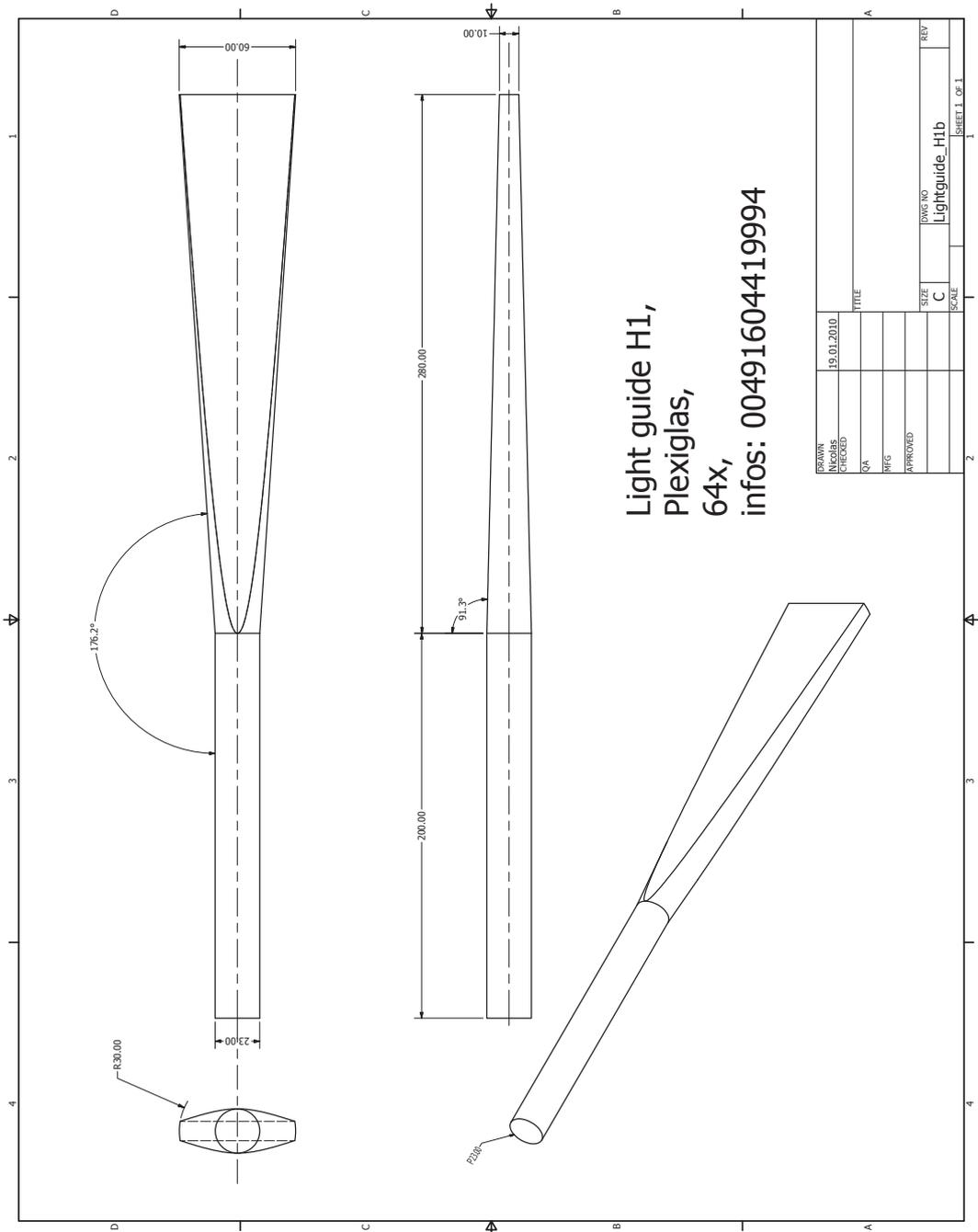


Abb. A.15.: Konstruktionszeichnung des Lichtleiters für H1 [10]

## **A.12. Mathematica-Quellcode zur iterativen Bestimmung der Lochbreite**

Auf den folgenden Seiten sind die Module, die zur iterativen Bestimmung der Lochbreite verwendet wurden aufgeführt. Mit "ZeitOrt2" wird das mit dem Fehler verschmierte Spektrum der Zeitdifferenz erzeugt. "FitLorentzFast" erstellt den Fit der Doppellorentzpeaks an das Spektrum. Aus dem mit dem Fit bestimmten Mittelwerte wird mit "DiffRand" die Abweichung zu dem zum Rand gehörenden fehlerhaften Zeitwert berechnet. Das Modul "Iteration" startet die einzelnen Iterationsschritte.

A.12. Mathematica-Quellcode zur iterativen Bestimmung der Lochbreite

```

c = 299 792 458 * 100 / 10^9;
nSzinti = 1.58;
nLuft = 1.000292;
cSzinti = c / nSzinti;
cLuft = c / nLuft;

lorentz[t_] := A1 *  $\frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + (t - \mu_1)^2}$  + A2 *  $\frac{\sigma_2^2}{\sigma_2^2 + (t - \mu_2)^2}$  + y0

FitLorentzFast[data_] :=
Module[{dx, xMin, xMax, zeit, ort, punkte, x, fit}, dx = 0.25;
  xMin = -13; xMax = 13; ort = {-9999};
  x = xMin;
  While[x < xMax, ort = Append[ort, x + dx / 2]; x = x + dx];
  ort = Delete[ort, 1];
  zeit = BinCounts[data, {xMin, xMax, dx}];
  punkte = Transpose[{ort, zeit}];
  fit = NonlinearModelFit[punkte, lorentz[t],
    {{A1, 600}, {μ1, -4}, {σ1, 1}, {A2, 600}, {μ2, 3},
    {σ2, 1}, {y0, 5}}, t];
  {fit["ParameterTable"][[1, 1, 6, 2]],
  fit["ParameterTable"][[1, 1, 7, 2]]}
]

```

## A. Anhang

```

ZeitOrt2[sigma_, fehler_, loch_] :=
Module[{tJurak, tSalevek, tJural, tSalevel, werte,
  werteJura, werteSaleve, anz,  $\sigma$ ,  $\mu$ },  $\sigma$  = sigma;  $\mu$  = 115;
anz[a_] := Exp[ $\frac{-0.5}{\sigma^2} (a - \mu)^2$ ]; werte = {{-10, -10, -10}};
tJurak[x_] := x / cSzinti;
tJural[x_] := loch / cLuft + (x - loch) / cSzinti;
tSalevek[x_] := (230 - loch - x) / cSzinti + loch / cLuft;
tSalevel[x_] := (230 - x) / cSzinti;
For[i = 0, i < (230 - loch) / 2, i = i + 0.1,
  For[j = 0, j < 100 * anz[i], j++,
    werte = Append[werte,
      {i, tJurak[i] + RandomReal[{-fehler, fehler}],
        tSalevek[i] + RandomReal[{-fehler, fehler}]}]
  ]
];
For[i = 230 - (230 - loch) / 2, i <= 230, i = i + 0.1,
  For[j = 0, j < 100 * anz[i], j++,
    werte = Append[werte,
      {i, tJural[i] + RandomReal[{-fehler, fehler}],
        tSalevel[i] + RandomReal[{-fehler, fehler}]}]
  ]
];
werte = Delete[werte, 1];
werteJura = Transpose[werte][[2]];
werteSaleve = Transpose[werte][[3]];
werteJura - werteSaleve]
DiffRandFast[sigma_, loch_] :=
Module[{erg, diff, xRR}, xRR = loch / 2 / cLuft;
erg = Table[FitLorentzFast[ZeitOrt2[sigma, i, loch]],
  {i, 0, 1.8, 0.2}];
diff = Table[{Abs[erg[[i, 2]]], erg[[i, 1]] - xRR},
  {i, Length[erg]}];
diff]

```

A.12. Mathematica-Quellcode zur iterativen Bestimmung der Lochbreite

```
Iteration[sigma_, start_, dt_, ddt_, it_] := Module[{ergIt},
  ergIt = {start};
  For[i = 1, i ≤ it, i++,
    AppendTo[ergIt,
      (dt - 2 * LinearModelFit[DiffRandFast[sigma, ergIt[[i]]],
        x, x][ddt]) * cLuft];
    Print[ergIt]
  ];
  ergIt
]
```

### **A.13. Quellcode des UserEvents**

Im folgenden ist der Quelltext des zur Vermessung von H1 mit rekonstruierten Spuren geschriebene UserEvents abgedruckt. In einem ersten Teil werden die Zeitwerte rausgeschrieben, falls ein Streifen von H1 beidseitig ausgelesen wurde. Die Zeitpeaks von Jura und Salève werden dabei so verschoben, dass ihr Mittelwert auf Null liegt. Es wird ebenfalls die Differenz und die Summe der Zeiten von Jura und Salève gespeichert.

Im zweiten Teil des Programm werden alle detektierten Spuren an die Position von H1 extrapoliert. Dann wird überprüft, ob es in einem Streifen, der zur Position der extrapolierten Spur passt eine Auslese gab. Ist die der Fall, so werden die Koordinaten des Treffers und Eigenschaften des zugehörigen Teilchens wie der Impuls oder die letzte Position des Nachweises gespeichert.

Alle Information werden in einem Root-Tree gespeichert. So können später daraus Diagramme erstellt werden.

### A.13. Quellcode des UserEvents

```
1  #include <iostream>
2  #include <cmath>
3  #include <vector>
4  #include <utility>
5  #include <sstream>
6  #include "TH1.h"
7  #include "TH2.h"
8
9  #include "TTree.h"
10 #include "TLorentzVector.h"
11 #include "PaParticle.h"
12 #include "Phast.h"
13 #include "PaSetup.h"
14 #include "PaEvent.h"
15 #include "PaDigit.h"
16 #include "PaAlgo.h"
17 #include "PaPid.h"
18
19 //Initialisieren der Werte zu Renormierung der Zeitpeaks
20 float t0H1_j1[32]={
21     0,
22     0,
23     835.0,
24     834.1,
25     835.5,
26     834.8,
27     832.9,
28     834.1,
29     835.0,
30     834.2,
31     834.9,
32     835.5,
33     836.1,
34     836.5,
35     834.5,
36     836.5,
37     837.0,
38     836.2,
39     835.9,
40     836.5,
41     836.4,
42     837.4,
43     836.0,
44     837.0,
45     834.9,
46     835.2,
47     835.5,
48     836.3,
49     837.1,
50     835.0,
51     0,
52     0
53 };
54
55 float t0H1_s1[32]={
56     0,
57     0,
58     833.7,
59     834.1,
```

## A. Anhang

```
60         835.8,
61         834.9,
62         833.4,
63         833.9,
64         835.4,
65         834.4,
66         834.7,
67         834.8,
68         835.8,
69         835.9,
70         836.5,
71         835.8,
72         837.9,
73         837.7,
74         836.9,
75         838.0,
76         836.9,
77         836.3,
78         834.5,
79         836.0,
80         835.7,
81         833.5,
82         834.6,
83         835.4,
84         836.0,
85         834.9,
86         0,
87         0
88     };
89
90
91
92     void UserEvent54(PaEvent& e){
93
94         int NH1 = 0;
95         int N=0;
96
97         static TTree* tree(NULL);
98         const int Nmax = 1000;
99         static int chH1[Nmax];
100        static bool first(true);
101        static float timeH1_j[Nmax], timeH1_s[Nmax], diffTimeH1[Nmax], sumTimeH1[Nmax],
102        zLast[Nmax], zFirst[Nmax];
103        static float xt[Nmax], yt[Nmax];
104        static double xe[Nmax], ye[Nmax], p[Nmax];
105
106        static int AnzTheo = 0;
107        static int AnzDet = 0;
108        static int hitsCh[32], hitsDetected[32];
109        static int muPrim[Nmax], anzPart[Nmax];
110
111        static float cLuft = 29.9705;
112        static float cSzinti = 18.9742;
113
114        const PaSetup& setup = PaSetup::Ref();
115        PaDetect det_H1 = setup.Detector(setup.iDetector("HG01Y1__"));
116        PaDetect det_MW11 = setup.Detector(setup.iDetector("MA01Y4__"));
117        PaDetect det_MW12 = setup.Detector(setup.iDetector("MA02Y1__"));
118        const double z_H1 = det_H1.Z();
```

### A.13. Quellcode des UserEvents

```

118
119     if(first){
120         tree = new TTree("tree","tree");
121         tree->Branch("NH1",          &NH1,          "NH1/I");
122         tree->Branch("N",            &N,            "N/I");
123         tree->Branch("AnzTheo",      &AnzTheo,     "AnzTheo/I");
124         tree->Branch("AnzDet",       &AnzDet,     "AnzDet/I");
125         tree->Branch("chH1",        chH1,           "chH1[NH1]/I");
126         tree->Branch("timeH1_j",     timeH1_j,     "timeH1_j[NH1]/F");
127         tree->Branch("timeH1_s",     timeH1_s,     "timeH1_s[NH1]/F");
128         tree->Branch("diffTimeH1",   diffTimeH1,   "diffTimeH1[NH1]/F");
129         tree->Branch("sumTimeH1",    sumTimeH1,    "sumTimeH1[NH1]/F");
130         tree->Branch("hitsCh",       hitsCh,       "hitsCH[32]/I");
131         tree->Branch("xt",           xt,           "xt[NH1]/F");
132         tree->Branch("yt",           yt,           "yt[NH1]/F");
133         tree->Branch("xe",           xe,           "xe[N]/D");
134         tree->Branch("ye",           ye,           "ye[N]/D");
135         tree->Branch("p",            p,           "p[N]/D");
136         tree->Branch("zLast",        zLast,        "zLast[N]/F");
137         tree->Branch("zFirst",       zFirst,       "zFirst[N]/F");
138         tree->Branch("muPrim",       muPrim,       "muPrim[N]/I");
139         tree->Branch("anzPart",      anzPart,      "anzPart[N]/I");
140         tree->Branch("hitsDetected", hitsDetected, "hitsDetected[32]/I");
141         first=false;
142     }
143
144
145     for(int i=0;i<Nmax;i++){
146         chH1[i]=-1;
147         timeH1_j[i]=-9999;
148         timeH1_s[i]=-9999;
149         diffTimeH1[i]=-9999;
150         sumTimeH1[i]=-9999;
151         xt[i]=-9999;
152         yt[i]=-9999;
153         xe[i]=-9999;
154         ye[i]=-9999;
155         zLast[i]=-9999;
156         zFirst[i]=-9999;
157         beam[i]=-9999;
158         muPrim[i]=-9999;
159         anzPart[i]=-9999;
160         p[i]=-9999;
161     }
162
163
164     int Bvtx = e.iBestPrimaryVertex();
165
166     const vector<PaDigit>& vdig = e.RawDigits();
167     vector<int> chH1_j, chH1_s;
168     vector<float> tH1_j, tH1_s;
169
170     if(Bvtx==-1) return;
171
172     // Auselesen der Zeitinformationen
173     for(vector<PaDigit>::const_iterator it = vdig.begin();it!=vdig.end(); it++){
174
175         const PaDigit d = *it;
176         string detname = d.DecodeMapName();

```

## A. Anhang

```
177
178         if(detname.find("HG01Y1_j")==0){
179             chH1_j.push_back((int) d.DigInfo(0));
180             tH1_j.push_back((float) d.DigInfo(4));
181         }
182         if(detname.find("HG01Y1_s")==0){
183             chH1_s.push_back((int) d.DigInfo(0));
184             tH1_s.push_back((float) d.DigInfo(4));
185         }
186     }
187 }
188
189 for(int i=0; i<32 ; i++){
190     hitsDetected[i]=0;
191 }
192
193
194 // Berechnung der Ortsinformation aus dem Kanal und der Zeitdifferenz
195     for (int it=0; it<chH1_j.size(); it++) {
196
197         for (int it2=0; it2<chH1_s.size(); it2++) {
198
199             if(chH1_j.at(it)==chH1_s.at(it2)){
200
201                 hitsDetected[chH1_s.at(it2)]++; // =1 -> ++
202                 chH1[NH1]=chH1_s.at(it2);
203                 timeH1_j[NH1]=tH1_j.at(it)+t0H1_j1[chH1[NH1]];
204                 timeH1_s[NH1]=tH1_s.at(it2)+t0H1_s1[chH1[NH1]];
205
206                 diffTimeH1[NH1]=timeH1_j[NH1]-timeH1_s[NH1];
207                 sumTimeH1[NH1]=timeH1_j[NH1]+timeH1_s[NH1];
208
209                 yt[NH1]=chH1[NH1]*6-9;
210                 if(13<chH1[NH1] && chH1[NH1]<20){
211                     if(diffTimeH1[NH1]<0){
212                         xt[NH1]=(-diffTimeH1[NH1]-50/cLuft)*cSzinti/2+140;
213                     }
214                     else{
215                         xt[NH1]=(-diffTimeH1[NH1]+50/cLuft)*cSzinti/2+90;
216                     }
217                 }
218                 else{
219                     xt[NH1]= 115+diffTimeH1[NH1]*cSzinti/2;
220                 }
221                 NH1++;
222             }
223         }
224     }
225 }
226
227
228 // Berechnung der Ortsinformation aus Spuren
229
230
231
232     for(int i=0; i<32; i++){
233         hitsCh[i]=0;
234     }
```

### A.13. Quellcode des UserEvents

```

235
236
237
238
239 // Schleife über Particles mit BestPrimaryVertex
240
241
242
243
244     for(int i = 0; i < e.NTrack(); i++){
245
246
247
248         const PaTrack& tr = e.vTrack(i);
249
250
251         if(tr.iParticle() >= 0){
252             const PaParticle & part = e.vParticle(tr.iParticle());
253
254             PaTPar par2;
255
256             tr.Extrapolate(z_H1,par2);
257             xe[N]=par2.Pos(0);
258             ye[N]=par2.Pos(1);
259             p[N]=par2.Mom();
260             zLast[N]=tr.Zmax();
261             zFirst[N]=tr.Zmin();
262
263             if(part.IsMuPrim()){
264                 muPrim[N]=1;
265             }
266             else {
267                 muPrim[N]=0;
268             }
269
270             if((int)((ye[N]+det_H1.YSiz()/2-det_H1.Y())/det_H1.Pitch())<32 && 0
271 <= (int)((ye[N]+det_H1.YSiz()/2-det_H1.Y())/det_H1.Pitch())){
272                 hitsCh[(int) ((ye[N]+det_H1.YSiz()/2-det_H1.Y())/det_H1.Pitch
273 ())]++;
274
275             if(det_H1.Y()-det_H1.YSiz()/2<= ye[N] && ye[N] <= det_H1.Y()+det_H1.
276 YSiz()/2){
277                 AnzTheo++;
278                 for(int i=0; i<32; i++){
279                     if(hitsCh[i]=1 && hitsDetected[i]==1){
280
281                         anzPart[N]=hitsCh[i];
282                         AnzDet++;
283                         N++;
284                         tree->Fill();
285                     }
286                 }
287             }
288         }

```



## Literaturverzeichnis

- [1] *Datenblatt des BC 408.*
- [2] *Datenblatt des XP 2982.*
- [3] C. Bernet.  
The COMPASS trigger system for muon scattering.  
*Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 550(1-2):217 – 240, 2005.
- [4] John Bieling.  
Entwicklung eines ungetakteten 4-Kanal-Meantimers und einer Koinzidenzschaltung auf einem FPGA, 2010.
- [5] COMPASS Collaboration.  
The COMPASS Experiment at CERN. oai:cds.cern.ch:1028264.  
*Nucl. Instrum. Methods Phys. Rev., A*, 577(arXiv:hep-ex/0703049. CERN-PH-EP-2007-001. 3):455–518. 84 p, Jan 2007.
- [6] COMPASS Collaboration.  
COMPASS-II Proposal.  
Technical Report CERN-SPSC-2010-014. SPSC-P-340, CERN, Geneva, May 2010.
- [7] N. du Fresne.  
Technical Summary Of The Large Angle Spectrometer Trigger.  
COMPASS Note, 2011.
- [8] Grafik erstellt von Malte Wilfert.
- [9] William R. Leo.  
*Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach.*  
Springer, Berlin, 2., überarb. a. edition, February 1994.
- [10] Alice Zimmermann.  
Design und Test von Szintillationszählern mit Luftlichtleitern für das Triggersystem des COMPASS-Experiments, 2010.



## Danksagung

*Ich möchte mich bei Prof. Eva-Maria Kabuß für die Aufnahme in ihre Arbeitsgruppe und die Betreuung dieser Arbeit bedanken.*

*Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei allen aus der Arbeitsgruppe die mir geholfen haben. Malte Wilfert sei für die Hilfe beim Bauen und etliche gute Ratschläge bei der Datenauswertung gedankt. Nicolas du Fresne von Hohenesche und Johannes Bernhard möchte ich für Unterstützung in technischen Fragen während des Umbaus und der Inbetriebnahme von H1 danke.*

*Außerdem sei Dr. Jens Barth für die Hilfe bei der Datennahme gedankt.*