

Abbildung 49: *Perspektivische Ansicht des TESLA-Detektors.*

# Forschung an Lepton Collidern

**Beteiligte Gruppen:** Mitglieder und Gäste der Gruppe FLC, sowie im Rahmen der ECFA/DESY Studie Mitarbeiter aus etwa 66 Instituten aus 17 Ländern.

**Sprecher:** T. Behnke, DESY und R.D. Heuer, Univ. Hamburg

**Im Frühjahr 2001 konnte in einer gemeinsamen Anstrengung vieler Gruppen und Institute der „Technical Design Report“ für TESLA veröffentlicht werden.**

**Seitdem konzentrieren sich die Arbeiten auf zwei Gebiete: eine weitere Ausarbeitung des Physik-Programms von TESLA, besonders in Bereichen, die im TDR nicht ausreichend behandelt werden konnten, und die Organisation konkreter Detektorentwicklungsprojekte, um die in den Vorarbeiten zum TDR aufgeworfenen technischen Fragen zu beantworten.**

**ECFA verlängerte das Mandat der ECFA/DESY Studie um zwei weitere Jahre, mit dem Auftrag, die Studien zum physikalischen Potenzial eines Linear-Colliders mit einer Energie zwischen 90 und 800 GeV weiter auszuarbeiten. Die Gruppe FLC spielt weiterhin in dieser Studie eine zentrale Rolle.**

## Der Linear-Collider TESLA

Mit der Vorstellung des Technical Design Reports für TESLA wurde eine viele Jahre währende Arbeitsphase abgeschlossen und gleichzeitig eine neue Phase auf dem Weg zu einer Realisation eines Linear-Colliders begonnen. Das physikalische Potenzial eines Beschleunigers wie TESLA ist klar ausgearbeitet und umfassend präsentiert worden. Die technische Realisation der Maschine als supraleitender Beschleuniger ist im Detail dargelegt worden.

In den Monaten nach der Veröffentlichung des TDR hat es viele Aktivitäten im Bereich der internationalen Teilchenphysik gegeben, die dazu geführt haben, dass sich in Europa, den USA und Asien die Teilchenphysiker darauf geeinigt haben, dass ein Linear-Collider, wie zum Beispiel TESLA, das nächste wichtige Projekt ist. In Europa wurde dies von einer Arbeitsgruppe von ECFA formuliert, in den USA in einem großen Treffen der amerikanischen Teilchenphysiker in Snowmass im Sommer des Jahres 2001 ausgearbeitet. Das HEPAP Panel in den USA hat die Ergebnisse von Snowmass aufgegriffen und veröffentlicht. In Asien sind ähnlich lautende Empfehlungen vom ACFA, dem „Asian Committee for Future Accelerators“, herausgegeben worden.

Nach wie vor werden verschiedene technische Vorschläge für einen Linear-Collider diskutiert, von denen einer TESLA ist. Auf Initiative von ICFA ist eine Kommission eingesetzt worden, die einen technischen Vergleich der verschiedenen Vorschläge durchführen soll. Das Ergebnis dieses Vergleiches wird für Ende 2002 erwartet.

## Studien der Physik bei TESLA

Das physikalische Potenzial des Linear-Colliders TESLA wurde im Jahresbericht 2000 ausführlich beschrieben. Es ist im TDR für TESLA dokumentiert worden. Im Jahre 2001 wurden Untersuchungen vertieft, die für den TDR noch nicht abschließend behandelt wurden, und offene Fragestellungen wurden angegangen. Besonders betont wurde auch die weitere Ausarbeitung

der Stellung des Linear-Colliders relativ zum LHC. Eines der Ziele der „Extended ECFA/DESY Study“ ist es auch, in verstärktem Maße Ergebnisse, die mit Hilfe parametrischer Monte Carlo-Studien erzielt wurden, mit voller Simulation des Detektors und aller Untergründe zu wiederholen und zu überprüfen.

### Higgs-Physik

Der Schwerpunkt der bisherigen Studien der Higgs-Physik lag bei der Untersuchung von Szenarien mit relativ leichten Higgs-Bosonen, wie sie auch von den vorliegenden Messungen bevorzugt werden. Trotzdem wurde in den letzten Monaten im Detail untersucht, wie das Potenzial von TESLA für schwerere Higgs-Bosonen aussieht. Je nach der Masse des Higgs-Bosons ergeben sich unterschiedliche Probleme. Ab einer Masse von etwa der doppelten W-Masse ist der dominante Zerfall des Higgs-Bosons nicht mehr ein Zerfall in ein Paar von b-Quarks, sondern in W Paare. Oberhalb einer Masse von etwa der doppelten Z-Masse bekommt der Zerfall in zwei Z-Bosonen große Wichtigkeit. Diese Effekte verändern die Rekonstruktionsmethoden und auch die Untergründe erheblich. Gleichzeitig wird die Breite des Higgs-Bosons bei höheren Massen größer, so dass die sichtbaren Signale schwerer vom Untergrund zu trennen sind. In Abbildung 50 ist das rekonstruierte Higgs-Signal für ein Higgs-Boson der Masse 240 GeV gezeigt. Ein klares Signal ist sichtbar, mit nur sehr geringem Untergrund. Die Masse lässt sich auf  $\pm 0.1\%$  bestimmen, die Breite auf  $\pm 12\%$  und der totale Wirkungsquerschnitt auf  $\pm 4\%$ . Mit dieser Methode lassen sich an einem Beschleuniger mit einer Schwerpunktsenergie von 500 GeV Higgs-Bosonen mit Massen bis etwa 400 GeV untersuchen.

In manchen Modellen zerfallen die Higgs-Bosonen mit großer Wahrscheinlichkeit in Teilchen, die im Detektor nicht direkt nachgewiesen werden können. Dies ist zum Beispiel in einigen supersymmetrischen Modellen der Fall, oder auch in Modellen mit großen extra Dimensionen, die in den letzten Monaten intensiv diskutiert worden sind. Bisher wurden Zerfälle in unsichtbare Teilchen nur für den Fall untersucht, dass das Higgs-Boson im Higgs-Strahlungs-Prozess durch Abstrahlung von einem Z erzeugt wurde, und dass das Z-Boson leptonic zerfällt.

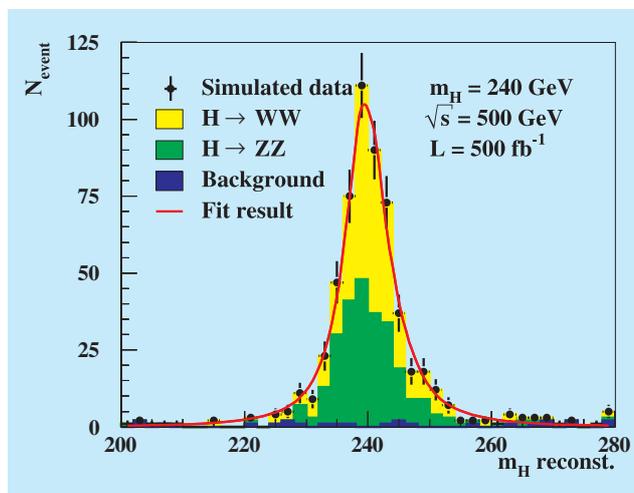


Abbildung 50: Rekonstruierte Massenverteilung für ein Higgs-Boson der Masse 240 GeV. Gezeigt sind die Beiträge von  $H \rightarrow WW$  und  $H \rightarrow ZZ$  Zerfällen, und die abgeschätzten Untergründe.

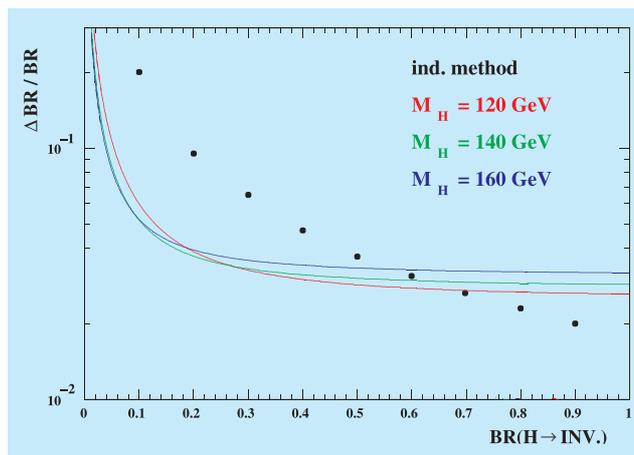


Abbildung 51: Genauigkeit, mit der das Verzweigungsverhältnis  $BR(H \rightarrow inv)$  rekonstruiert werden kann. Die Punkte zeigen das Ergebnis der simulierten Analyse, die durchgezogenen Linien die theoretischen Unsicherheiten für verschiedene Higgs-Massen.

Eine neue Studie erweitert die Szenarien auf den allgemeineren Fall, dass das Z auch in hadronische Endzustände zerfällt. Dadurch erhöht sich die Zahl der beobachtbaren Zerfälle erheblich, gleichzeitig wird der Untergrund aber auch höher. Durch geeignete Rekonstruktionsmethoden und unter Ausnutzung der exzellenten Massenauflösung des TESLA-Detektors konnte gezeigt werden, dass eine Abtrennung des Signals vom

Untergrund möglich ist. In Abbildung 51 ist die Genauigkeit gezeigt, mit der für verschiedene Higgs-Massen das Verzweigungsverhältnis  $BR(H \rightarrow inv)$  gemessen werden kann.

## Supersymmetrie

Eine wichtige Motivation für TESLA ist die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells. Supersymmetrie ist eine besonders attraktive und vielversprechende Erweiterung des Standardmodells. Viele Studien wurden durchgeführt, um zu untersuchen, inwieweit TESLA in der Lage sein wird, Supersymmetrie nachzuweisen. Ein besonderes Problem sind Modelle, in denen der Massenunterschied zwischen dem leichtesten SUSY Teilchen und dem zweitleichtesten Teilchen sehr klein wird. Besonders schwierig ist dabei der Fall, dass die Massendifferenz gerade ein Pion als weiteres Zerfallsprodukt zulässt. Aufgrund des hohen Untergrundes im Detektor ist eine saubere Identifikation dieser Ereignisse mit großen Problemen verbunden. Andererseits erzwingt aber der nur sehr begrenzt vorhandene Phasenraum für das Pion eine relativ klare Impulsverteilung dieser Teilchen. Dies ist in Abbildung 52 gezeigt. Hier wird die rekonstruierte Energie der Pionen für zwei Annahmen,  $\Delta M = 0.2 \text{ GeV}$  und  $\Delta M = 0.4 \text{ GeV}$ , gezeigt. Die Verbreiterung der Pionen-Linie bei der größeren Massendifferenz ist sichtbar, aber das Signal ist immer noch klar erkennbar.

Die angeführten Untersuchungen stellen nur einige wenige Beispiele dar aus den Arbeiten, die im Rahmen der ECFA/DESY Studie im letzten Jahr begonnen wurden. Es wird erwartet, dass im Laufe der nächsten ein- und zwei Jahre, bis zum Ende dieser Studie, die im TDR veröffentlichten Arbeiten durch ein breites Spektrum weiterer Untersuchungen erweitert werden, die das physikalische Potenzial von TESLA weiter untermauern und ausbauen.

## Software-Entwicklungen für TESLA

Geeignete und leistungsfähige Software Pakete sowohl für die Simulation als auch für die Rekonstruktion von Ereignissen erlangen eine immer größere Bedeutung

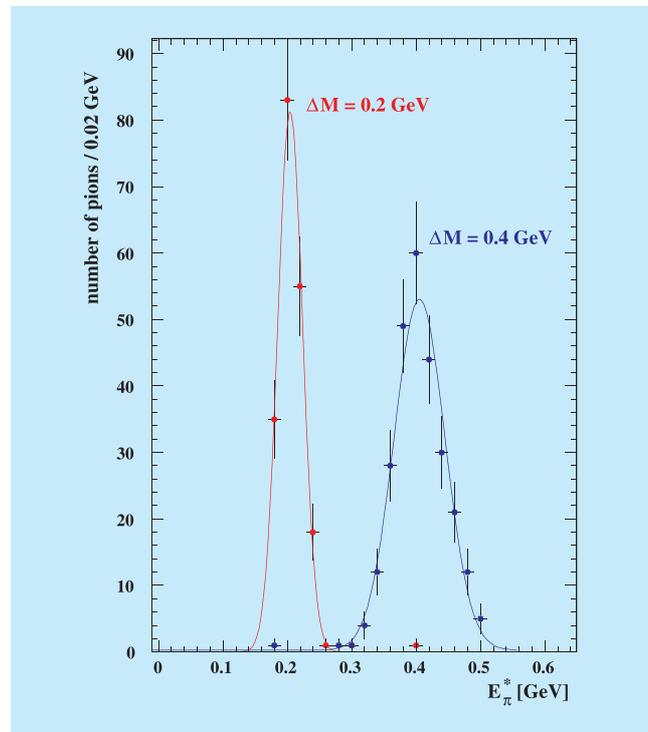


Abbildung 52: Energieverteilung der Pionen im Zerfall  $X \rightarrow \pi Y$ , mit  $X, Y$  dem leichtesten und zweitleichtesten supersymmetrischen Teilchen.

schon während der Entwicklung der Projekte. Nach Fertigstellung des TDR hat im Rahmen der ECFA/DESY Studie ein Prozess eingesetzt, eine moderne Software-Umgebung für die Simulation des TESLA-Detektors zu entwickeln. Gemäß dem industriellen Standard soll diese auf Objekt-Orientierten Technologien beruhen, gleichzeitig aber dem Benutzer einen einfachen und transparenten Zugang zu den Programmpaketen ermöglichen.

In Zusammenarbeit mit Gruppen in Frankreich und den USA wurde begonnen, die Simulation von dem auf GEANT3 und Fortran basierenden Programm auf das Objekt-Orientierte Programmpaket GEANT4 und C++ umzustellen.

Im Laufe des Jahres sind die Arbeiten am Rekonstruktionsprogramm fortgeführt worden. Besonders wichtig ist die Entwicklung eines Algorithmus zur Bestimmung des Energieflusses im Detektor. Im Konzept des Energieflusses werden die Informationen aus dem Spur-

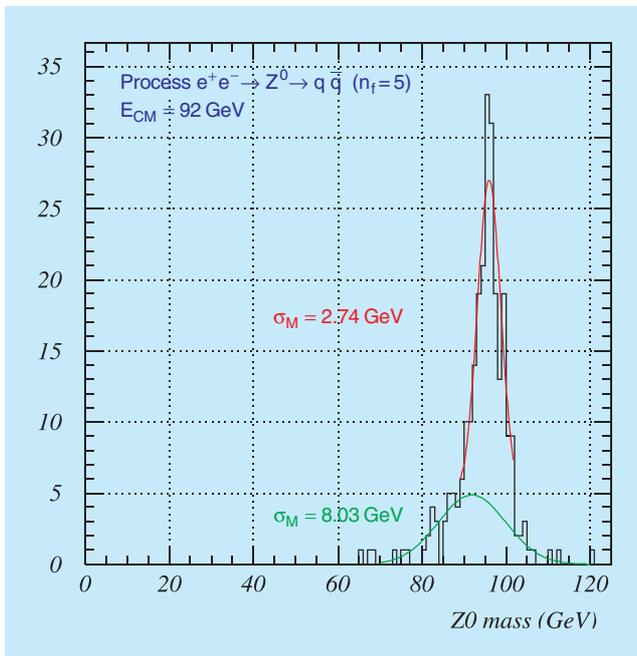


Abbildung 53: Massenverteilung des Z-Bosons, rekonstruiert in hadronischen Z-Zerfällen.

kammersystem mit Informationen aus dem Kalorimeter kombiniert, um eine optimale Rekonstruktion der Vierervektoren der Partonen, die das Ereignis erzeugt haben, zu erreichen. Aufgrund der sehr hohen Granularität des vorgeschlagenen TESLA-Kalorimeters sind völlig neue Techniken notwendig, um die Information optimal auszuwerten.

In Abbildung 53 ist die rekonstruierte Massenverteilung von Z-Bosonen gezeigt. Die Masse wurde nur aus den Informationen errechnet, die der Energiefluss-Algorithmus liefert. Die Breite der Verteilung entspricht einer Energiefluss-Auflösung von  $29\%/\sqrt{E}$  und ist damit etwa einen Faktor zwei besser als die beste bisher erreichte Auflösung.

## Detektorstudien für TESLA

Für den TDR wurde im Detail ein Detektorkonzept ausgearbeitet. Dieses Konzept sieht einen großen Detektor vor mit einem relativ konventionellen inneren Detektor für die Spurrekonstruktion, einem hochauflösenden Kalorimeter und einem Myon-System, das den gesamten Detektor umgibt. Spurkammern und Kalorimeter

befinden sich innerhalb einer Magnetspule, die ein solenoides Feld von 4 T erzeugt.

Obwohl das Konzept des Detektors konventionell ist, sind die Anforderungen an die einzelnen Komponenten sehr hoch. Verglichen mit existierenden Detektoren soll die Auflösung in allen Bereichen deutlich verbessert werden – im Spurkammersystem um eine Größenordnung, im Kalorimeter soll die Energiefluss-Auflösung um mindestens einen Faktor zwei verbessert werden. Um diese Ziele zu erreichen, sind dedizierte Entwicklungsarbeiten an einzelnen Detektorkomponenten notwendig. DESY hat deshalb ein Entwicklungsprogramm ins Leben gerufen, in dessen Rahmen Gruppen Vorschläge für Detektorentwicklungsarbeiten unterbreiten können. Diese Vorschläge werden dann vom DESY „Program Review Committee“ begutachtet, und im Falle der Annahme als offizielle DESY R&D Programme geführt. Im Berichtszeitraum sind vier Programme für Entwicklungsarbeiten vom DESY anerkannt worden, zwei für Silizium Vertex-Detektoren, eines für Entwicklungsarbeiten einer „Time Projection Chamber“ (TPC) und eines für Entwicklung der Kalorimetrie. Die Gruppe FLC ist an den beiden letzten Projekten aktiv beteiligt.

## Time Projection Chamber

Der volumenmäßig größte Teil des Zentraldetektors ist die Time Projection Chamber. Aufgabe der TPC ist es, die Spuren geladener Teilchen möglichst genau zu vermessen und Zerfälle langlebiger Teilchen zu rekonstruieren. Gleichzeitig erlaubt die Messung des spezifischen Energieverlustes  $dE/dx$  im Gas der TPC eine Identifikation verschiedener geladener Teilchentypen. Die im TDR vorgeschlagene TPC hat einen inneren Radius von 32 cm, einen äußeren Radius von 162 cm und eine Länge von etwa 5 m. Entlang einer Spur werden bis zu 200 Spurpunkte aufgezeichnet. Die TESLA-TPC unterscheidet sich in einem Punkt wesentlich von allen bisher gebauten TPCs: es ist vorgesehen, die Auslese der Ladung, die von den Spuren in der TPC erzeugt wird, nicht mittels Vieldrahtproportionalkammern durchzuführen, sondern Gas-Mikrodetektoren zu verwenden. Zwei Technologien werden momentan diskutiert, „Gas Electron Multipliers“ (GEMs) und Micromega Kammern.

Eine Gruppe von etwa 15 Instituten aus aller Welt, einschließlich Kanada und den Vereinigten Staaten, hat

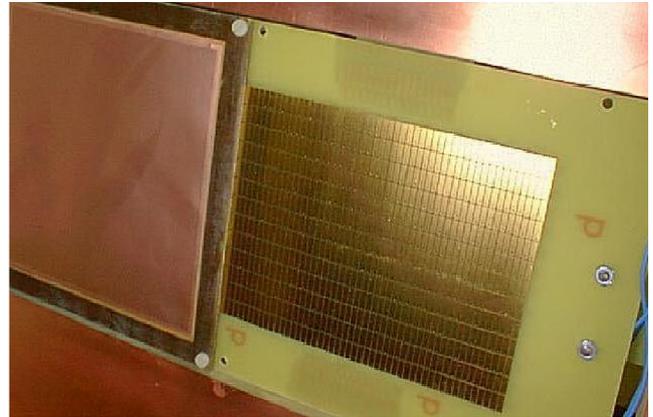
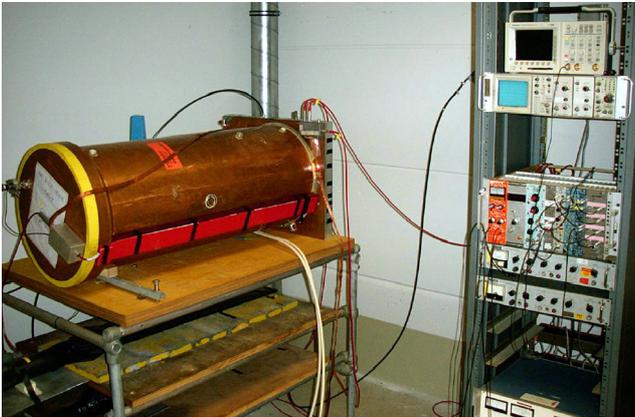


Abbildung 54: Links: Photo der Test TPC. Rechts: Ansicht der Elektrodenstruktur, die in der Test TPC verwendet wird.

gemeinsam ein PRC Proposal vorgelegt, eine solche TPC zu entwickeln. Die Gruppe FLC ist an diesem Programm mit intensiven Untersuchungen an einer mit GEMs instrumentierten TPC beteiligt.

Eine GEM bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber einer konventionellen, mit Drähten ausgerüsteten TPC. Die Menge an Material, die für die Auslese verwendet werden muss, kann vermutlich bei einer GEM-Auslese deutlich reduziert werden. Dies hat wichtige Auswirkungen auf die Funktion des Kalorimeters in der Endkappe des Detektors, das vollständig hinter dem Auslesesystem der TPC liegt. Fast wichtiger ist aber, dass die GEM-Folie einen Effekt, der einen wichtigen Beitrag zum systematischen Fehler einer konventionellen TPC entstehen in der Nähe der Drahtebenen erhebliche Verzerrungen der Driftlinien, entlang derer die Elektronen zu den Drähten driften. Diese führen zu einem nicht vernachlässigbaren systematischen Fehler bei der Ortsbestimmung. Da die Verstärkungselemente der GEM erheblich dichter (etwa einen Faktor 10) zueinander angeordnet sind, als es die Drähte in einer Kammer sein können, ist zu erwarten, dass sich die Verzerrungen entsprechend reduzieren.

Darüber hinaus unterdrücken GEMs den Fluss positiver Ionen, die im Verstärkungsprozess produziert werden, in das aktive Kammervolumen. Dies eröffnet die Möglichkeit, eine mit GEMs ausgerüstete TPC ohne Totzeit bei TESLA zu betreiben.

In Hamburg sind zwei Testkammern aufgebaut worden, um wesentliche Parameter der TPC zu messen und die angesprochenen systematischen Effekte zu untersuchen. In einer großen Kammer werden Spuren kosmischer Myonen vermessen und dazu verwendet, Auflösungen, Driftverhalten usw. über lange Distanzen zu studieren. Ein Photo der TPC und der Ausleseelektroden ist in Abbildung 54 zu sehen. Diese Kammer operiert bisher ohne ein magnetisches Feld. Ein Beispiel für ein in der Kammer rekonstruiertes Myon ist in Abbildung 55 gezeigt.

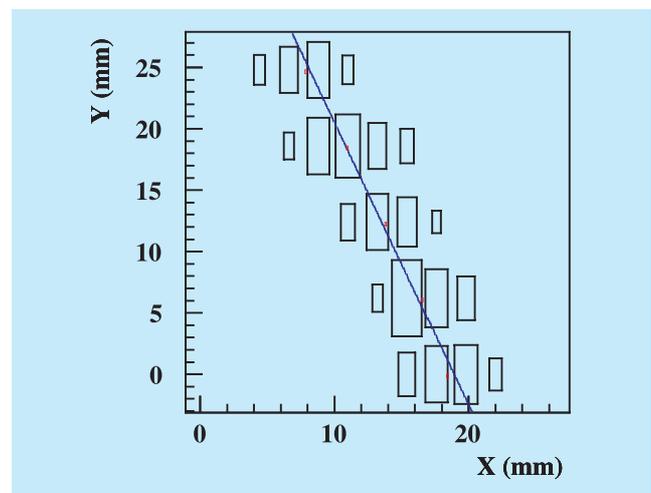


Abbildung 55: Spur eines kosmischen Myons, rekonstruiert in der TPC.

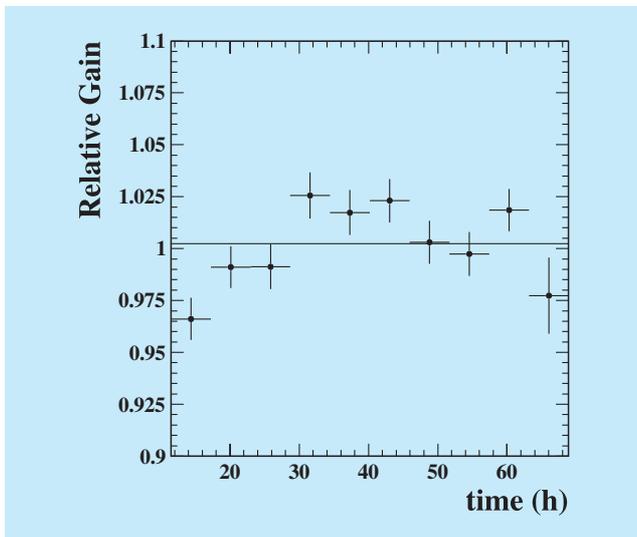


Abbildung 56: Gemessene Gasverstärkung als Funktion der Zeit in der TPC.

Eine wichtige Frage ist, wie stabil eine mit GEMs ausgerüstete Kammer ist. Wenn mit der Kammer der spezifische Energieverlust von Teilchen gemessen werden soll, müssen die Parameter über längere Zeiträume konstant gehalten werden, und die Variationen von Auslesezone zu Auslesezone sollten nicht zu groß sein. In der Prototyp-Kammer am DESY ist untersucht worden, wie groß die Unterschiede von Zelle zu Zelle sind, und wie stark die Eigenschaften sich mit der Zeit ändern. In Abbildung 56 ist das Ergebnis einer Messung über eine längere Zeit gezeigt. Die Messungen sind nicht auf Änderungen der Umgebungsparameter korrigiert. Trotzdem ist die Streuung der Messpunkte mit 1.9% klein.

Eine zweite, kleine TPC ist gebaut worden, die primär dazu verwendet werden soll, die Ladungsströme in der TPC genauer zu verstehen. Im Verstärkungsschritt werden viele positive Ionen produziert. Diese Ionen driften sehr langsam in Richtung auf die Kathode. Durch eine geeignete Wahl der Felder kann erreicht werden, dass nur ein kleiner Teil der Ionen tatsächlich zur Kathode driften, ein großer Teil aber auf der GEM selbst absorbiert wird. Diese so genannte Unterdrückung des Ionenrückflusses ist ein wichtiger Bestandteil des Konzeptes der TPC bei TESLA, wurde aber bisher nur unzureichend quantitativ untersucht. Mit der kleinen Testkammer konnten erste Daten genommen werden (Abb. 57).

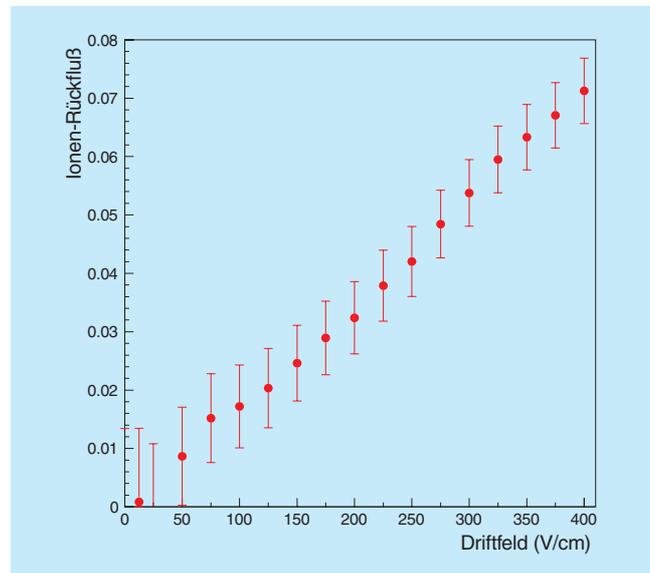


Abbildung 57: Prozentsatz der Ionen, die in das Driftvolumen der TPC zurückdriften, als Funktion der Spannung an der GEM.

In der Zukunft werden verstärkt Anstrengungen unternommen werden, einen optimalen Satz an Operationsparametern zu finden, so dass der Ionenrückfluss minimiert werden kann.

## Das hadronische Kalorimeter

Als hadronisches Kalorimeter wird im TDR ein so genanntes „Tile“-Kalorimeter vorgeschlagen. Der Absorber ist aus Bleiplatten aufgebaut, die Energie wird mit Szintillatorplatten zwischen den Absorbern gemessen und ausgelesen. Das Licht aus den Szintillatoren wird mit Hilfe von Lichtleitern aus den Platten ausgekoppelt und zu den Photodetektoren geleitet. Das Prinzip solcher Tile-Kalorimeter ist gut bekannt und in vielen Experimenten erfolgreich angewendet worden.

Beim Vorschlag für den TESLA-Detektor ist die angestrebte Granularität allerdings deutlich größer als bisher. Es ist angestrebt, die Empfindlichkeit der Zellen so auszulegen, dass sie sowohl einzelne Teilchen als auch dichte Schauer gut erkennen. Gleichzeitig müssen die optischen Auslesekomponenten im sehr hohen Magnetfeld von 4 T funktionieren. Das Kalorimeter muss sehr

kompakt gebaut werden, damit es komplett innerhalb der Spule angeordnet werden kann.

Aus diesen Gründen sind viele technische Entwicklungsarbeiten notwendig. Eine internationale Gruppe hat sich gebildet, mit Beiträgen vom DESY, aus der tschechischen Republik und aus Russland, die es sich zum Ziel gesetzt hat, ein optimiertes Design des Tile-Kalorimeters zu entwickeln. Besonderes Augenmerk gilt dabei der Optimierung der Auskopplung des Lichtes aus den Szintillatorplatten und der Untersuchung verschiedener Photonen-Nachweisgeräte.

In Abbildung 58 ist die Lichtausbeute als Funktion des Krümmungsradius gezeigt, mit dem die Faser in die Szintillatorplatte eingelassen worden ist. Besonders bei den kleinsten Platten, die eine Größe von etwa  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  haben, ist es wichtig, die Verluste so gering wie möglich zu halten.

In Zusammenarbeit mit Gruppen aus Frankreich und Russland wird eine Alternative zum Tile-Kalorimeter untersucht. Bei diesem so genannten Digitalen Kalorimeter wird pro Zelle nur die Information, ob ein Teilchen in der Zelle nachgewiesen wurde, gespeichert,

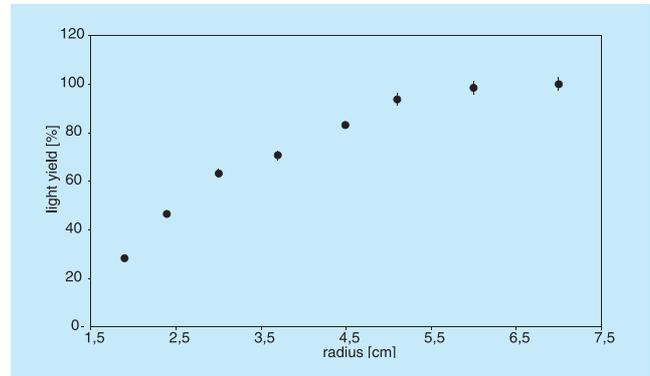


Abbildung 58: Lichtausbeute der Szintillatorplatten als Funktion des Krümmungsradius der Auslesefaser.

die Höhe der deponierten Energie wird nicht gemessen. Wenn die einzelnen Zellen ausreichend klein sind, so dass pro Teilchen viele Zellen ansprechen, lässt sich mit so einer Technologie eine ähnliche Auflösung wie mit einem konventionellen Kalorimeter erreichen. Allerdings gibt es viele technische Fragen, die gelöst werden müssen. Arbeiten an der Simulation eines solchen Kalorimeters haben begonnen.