

Abbildung 50: Perspektivische Ansicht des TESLA-Detektors mit einem Ereignis im Detektor.

# 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

**Das Jahr 2000 stand ganz im Zeichen der Vorbereitung des „Technical Design Reports“ für TESLA (TDR), der im März des Jahres 2001 veröffentlicht worden ist. Die Arbeiten hierzu finden seit 1998 im Rahmen der internationalen II. ECFA/DESY Studie statt (ECFA – European Committee for Future Accelerators). In zwei Konferenzen, eine davon am DESY, wurden die Ergebnisse der Arbeitsgruppen vorgestellt und diskutiert.**

**Im September 2000 nahmen Mitglieder der Gruppe FLC an der internationalen LCWS 2000 Konferenz am Fermilab in den USA teil, auf der Physik und Technik zukünftiger Linearbeschleuniger wie TESLA besprochen wurden.**

**Im Berichtsjahr sind Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für eine Spurkammer und für Kalorimeter bei TESLA intensiv verfolgt worden.**

## Physik am Linear-Collider TESLA

Das Standard-Modell der Teilchenphysik ist eine außerordentlich erfolgreiche Theorie, die die Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen beschreibt. In den letzten dreißig Jahren sind in diesem Bereich enorme Fortschritte gemacht worden. Quarks und Leptonen als fundamentale Bausteine der Materie konnten etabliert werden, und die Natur der Kräfte konnte auf ein solides theoretisches Fundament gestellt werden. Viele Aspekte der Theorie konnten in einer langen Serie von Experimenten an Lepton- und Hadronbeschleunigern erfolgreich getestet werden.

Die Theorie weist aber nach wie vor entscheidende Lücken auf. So ist es bisher nicht gelungen, zu verstehen, wie die Massen der beobachteten Teilchen zu erklären sind – sowohl die Tatsache an sich, dass sie eine Masse haben, aber auch die sehr großen Unterschiede in der Masse vom leichtesten Quark, dem up-Quark, zum schwersten, dem top-Quark, sind unverstanden.

Obwohl mit der QCD eine Theorie der starken Wechselwirkung etabliert werden konnte, ist es bis heute nicht gelungen, diese mit der Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung zu vereinigen. Vielleicht am deutlichsten wird die Unvollkommenheit der Theorie aber dadurch illustriert, dass die Kraft, die in der Natur am sichtbarsten ist, die Gravitation, bisher überhaupt nicht in das Bild hineinzupassen scheint.

Einer der wesentlichen Schritte auf dem Weg zu einem tieferen Verständnis der Natur ist die Entdeckung des Higgs-Teilchens – ein Teilchen, das im Standard-Modell eng mit der Frage der Masse verbunden ist. Bisher konnte das Higgs-Teilchen experimentell nicht nachgewiesen werden, obwohl es interessante erste Hinweise in Daten von Experimenten am LEP-Beschleuniger gibt. Mit hoher Wahrscheinlichkeit wird das Higgs-Teilchen bei einer Masse von weniger als 200 GeV erwartet. Die Beobachtung, aber auch die Nicht-Beobachtung dieses Teilchens wird entscheidende Informationen über das Standard-Modell liefern.

Die präzise Untersuchung der Eigenschaften bekannter Teilchen hat in der Vergangenheit entscheidend zum Verständnis der Physik der Elementarteilchen beigetragen. Eine exakte Untersuchung des top-Quarks und, falls es existiert, des Higgs-Teilchens, wird helfen, in

der Zukunft Informationen über Physik bei sehr hohen Energien zu bekommen, die weit jenseits der Bereiche liegen, die mit Beschleunigern unmittelbar erreicht werden können.

TESLA (TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator) wird in der Lage sein, bei der Aufklärung dieser fundamentalen Fragen entscheidend mitzuwirken. Zusammen mit den anderen Beschleunigern der nächsten Generation, wie dem Tevatron-II oder dem LHC, wird TESLA die Frage des Higgs-Teilchens im Standard-Modell beantworten können. Wenn es das Higgs gibt, wird TESLA seine Eigenschaften mit unerreichter Genauigkeit bestimmen können. Selbst wenn – was zu erwarten ist – das Higgs bereits am Tevatron oder am LHC entdeckt worden ist, bevor TESLA erste Daten nimmt, wird es TESLA vorbehalten sein, zu etablieren, dass es sich bei dem Teilchen tatsächlich um das Higgs handelt, und ob es in den Rahmen des Standard-Modells hineinpasst.

Die Entdeckung und genaue Vermessung des Higgs-Teilchens bedeuten allerdings nicht, dass damit alle Fragen der Teilchenphysik geklärt sind. Das Standard-Modell ist auf viel zu viele ad-hoc Annahmen gegründet und lässt zu viele Fragen offen, als dass es eine wirklich fundamentale Theorie sein kann. Sehr grundlegende theoretische Überlegungen liefern die Argumente, dass es eine weiterführende Theorie geben muss. Ein mögliches Konzept ist das der Supersymmetrie. In supersymmetrischen Theorien wird die scheinbar sehr unterschiedliche Behandlung von Fermionen und Bosonen aufgehoben, indem jedem Fermion ein Boson zugeordnet ist und umgekehrt. Solch eine Theorie hat viele sehr attraktive Eigenschaften – experimentell ist sie bisher allerdings nicht bestätigt.

Eine unmittelbare Konsequenz der Supersymmetrie ist es, dass eine große Zahl neuer Teilchen existieren sollte. Unterschiede zwischen verschiedenen supersymmetrischen Theorien spiegeln sich in den Massen dieser Teilchen wider. Sollte es Supersymmetrie geben, wäre es wichtig, möglichst viele dieser Teilchen möglichst genau zu vermessen, um zu verstehen, in welcher Form die Supersymmetrie in der Natur realisiert ist. Die meisten der Theorien sagen viele Teilchen mit Massen unterhalb eines TeV voraus, in einem Bereich also, der mit einer Maschine wie TESLA zugänglich ist. Verglichen mit einem Hadron-Beschleuniger wie dem LHC kann TESLA in einem weiten Para-

meterraum im Wesentlichen alle der vorausgesagten supersymmetrischen Teilchen mit großer Präzision untersuchen, allerdings ist der Bereich sehr hoher Massen, oberhalb etwa 1 TeV, dem direkten Zugriff von TESLA verschlossen.

Supersymmetrie ist eine Theorie, die den Weg zu einer Beschreibung der Gravitation im Rahmen einer Quantentheorie öffnet. Die Entdeckung von Supersymmetrie kann zwar nicht als Garantie dafür gelten, dass die Gravitation damit auch verstanden werden kann, umgekehrt scheinen aber alle bisher untersuchten und erfolgversprechenden Ansätze einer Quantentheorie der Gravitation die Supersymmetrie zu fordern. Die Entdeckung und genaue Vermessung der supersymmetrischen Teilchen kann deshalb ein einmaliges Fenster bieten, Informationen über die Physik, die bei für die Gravitation relevanten Energien von etwa  $10^{16}$  GeV gilt, zu gewinnen. Eventuell ist dies der einzige Weg, da Beschleuniger mit solch hohen Energien nur schwer vorstellbar sind.

Ein zentraler Aspekt der Physik bei TESLA ist die hohe Präzision. Ein tiefes Verständnis der Physik der elementaren Teilchen setzt nicht nur voraus, dass Teilchen gefunden werden, sondern dass ihre Eigenschaften, ihre Wechselwirkungen untereinander und mit anderen Teilchen mit hoher Präzision vermessen werden können. Nur dann kann überprüft werden, wie weit die Beschreibung im Rahmen des Standard-Modells gültig ist, oder ob irgendwann neue Phänomene auftreten, die neue theoretische Ansätze notwendig machen. Elektron-Positron Beschleuniger wie TESLA spielen hier eine sehr zentrale Rolle. Aufgrund des eindeutig definierten Anfangszustandes und der genau definierten Energie der Kollision sind Präzisionsmessungen überhaupt erst möglich. Viele der interessanten Prozesse treten nur sehr selten auf, und nur die fast untergrundfreie Umgebung eines Elektron-Positron Beschleunigers erlaubt einen experimentellen Zugang.

Natürlich kann es sein, dass keine der Vorstellungen, die wir heute haben, in der Natur verwirklicht ist. Vielleicht gibt es kein Higgs, vielleicht ist Supersymmetrie nur ein Traum, und vielleicht gibt es keine neuen Teilchen bei den Energien, die von der nächsten Generation der Beschleuniger untersucht werden. In diesem Fall werden Präzisionsmessungen bei möglichst hohen Energien die einzige Möglichkeit sein, zu entscheiden, welches der verschiedenen theoretischen Modelle stimmt.

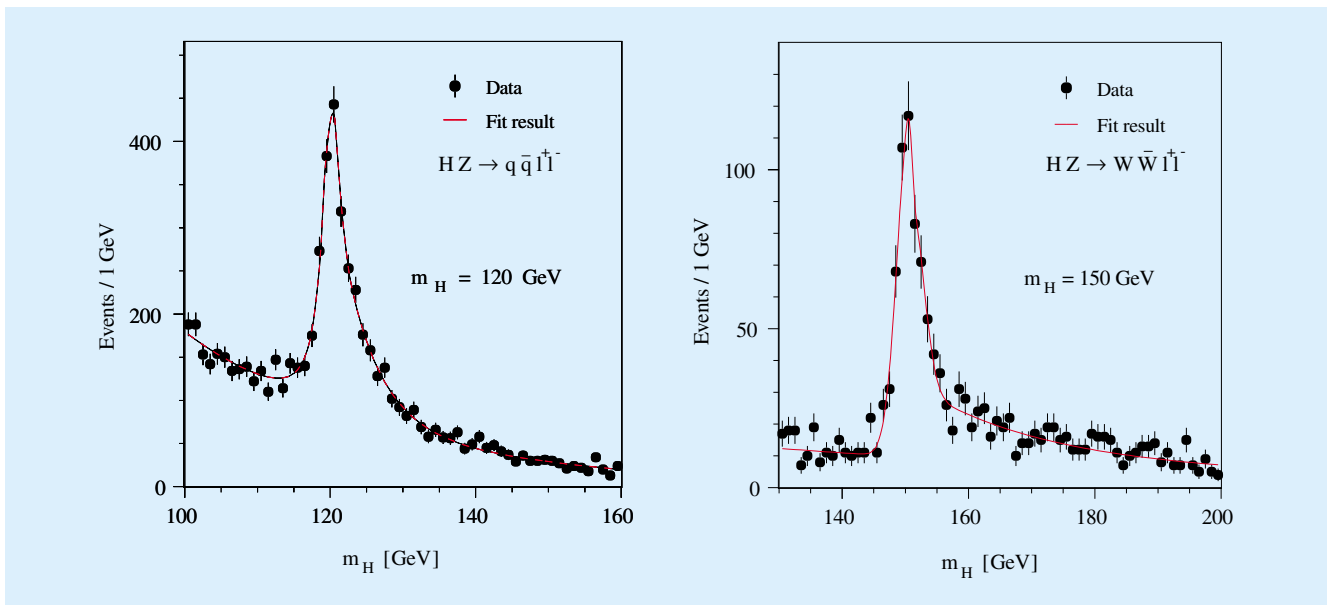


Abbildung 51: Simuliertes Higgs-Signal im Higgs-Strahlungs-Prozess,  $e^+e^- \rightarrow H^0 Z^0$ .

Ein Elektron-Positron Linear-Collider ist das ideale Werkzeug, um all diese verschiedenen Fragen anzugehen, und – hoffentlich – zu beantworten. Zusammen mit den schon im Bau befindlichen Maschinen wird TESLA uns einen entscheidenden Schritt im Verständnis der mikroskopischen Natur weiterbringen.

## Studien zum Physikpotenzial von TESLA

Die Untersuchungen des Physikpotenzials von TESLA als Elektron-Positron- und Photon-Photon-Collider finden in enger Zusammenarbeit mit Gruppen aus der theoretischen Physik sowie mit zahlreichen deutschen und internationalen Instituten statt (engere Verbindungen bestehen zum Beispiel mit der Ecole Polytechnique, Paris, mit der Universität Lund, der Universität Ottawa und dem ITEP, Moskau). Insbesondere besteht eine enge Verbindung zur Universität Hamburg. Das Projekt TESLA erfreut sich dabei bei Hamburger Studenten einer großen Attraktivität – im Berichtsjahr arbeiteten bis zu 16 Studenten an Studien zu TESLA. Die Gruppe profitiert sehr von der Beteiligung am OPAL-Experiment am LEP-Beschleuniger, wodurch viele der Machbarkeitsstudien für TESLA durch entsprechende Aus-

wertung realer Elektron-Positron-Daten untermauert werden können.

Im Technical Design Report (TDR) werden die physikalischen Fragen der Teilchenphysik bei TESLA in folgende vier Themenkreise gegliedert:

- Higgs-Bosonen,
- Supersymmetrie,
- Alternative Theorien,
- Präzisionsmessungen des Standard-Modells.

Einige wichtige und neuere Studien werden im Folgenden kurz erläutert.

Die Messung der Eigenschaften des Higgs-Bosons ist von fundamentaler Bedeutung zur Erklärung der beobachteten Brechung der elektroschwachen Symmetrie. Diese Eigenschaften sind die Masse, seine Quantenzahlen (Spin und CP), seine totale Zerfallsbreite, die Stärke der Kopplung des Higgs-Bosons an Eichbosonen und Fermionen und seine Selbstkopplung. Diese Eigenschaften lassen sich mit TESLA anhand einer großen Zahl unterschiedlicher Messungen bestimmen. Der große Vorteil von TESLA im Vergleich zu Hadron-Collidern wie dem LHC liegt vor allem im modellunabhängigen Nachweis des Higgs-Bosons (man kann

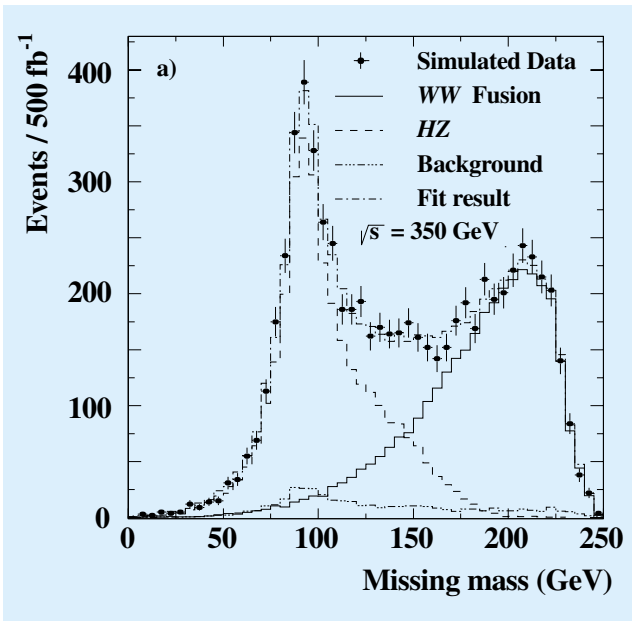


Abbildung 52: Selektion von Higgs-Bosonen aus dem WW-Fusions-Prozess. Das Signal (durchgezogene Linie) wurde für eine Higgs-Masse von 120 GeV errechnet.

es im sogenannten Higgs-Strahlungs-Prozess anhand eines gleichzeitig produzierten  $Z^0$ -Bosons erkennen), und in der hohen Effizienz für praktisch alle möglichen Higgs-Zerfälle. Die Simulation eines Higgs-Boson-Signals im Higgs-Strahlungs-Prozess für zwei unterschiedliche Higgs-Massen ist in Abbildung 51 gezeigt. Aus diesen Verteilungen lässt sich die Higgs-Masse mit einer Präzision von etwa einem halben Promille bestimmen. Aus der beobachteten Rate für diesen Prozess bestimmt man die Kopplung des Higgs-Bosons an das  $Z^0$  mit einer Genauigkeit von etwa zwei Prozent nach ein bis zwei Jahren TESLA-Laufzeit.

Eine neue Studie beschäftigt sich mit dem Prozess der WW-Fusion von Higgs-Bosonen. Bei größeren Higgs-Massen bekommt die Produktion von Higgs-Bosonen in diesem Prozess eine große Bedeutung. Es wurde gezeigt, dass der Wirkungsquerschnitt für diesen Prozess mit hoher Präzision bestimmt werden kann. In Abbildung 52 ist eine Simulation dieses Prozesses gezeigt.

Diese Messung ist für die indirekte Bestimmung der totalen Zerfallsbreite des Higgs-Bosons von Bedeutung und kann darüber hinaus die Extraktion der Higgs-

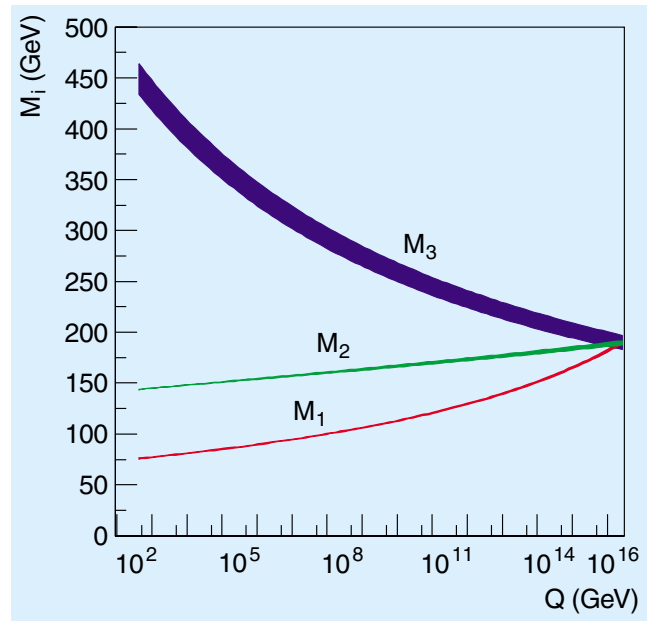


Abbildung 53: Extrapolation der bei TESLA ( $M_1, M_2$ ) und dem LHC ( $M_3$ ) bestimmbaren Massenparameter der supersymmetrischen Partner der Eichbosonen. Die Hypothese einer Vereinheitlichung bei Energien oberhalb von  $10^{15}$  GeV kann getestet werden.  $M_1, M_2$  und  $M_3$  sind Parameter, die mit den Massen der supersymmetrischen Partner der Eichbosonen verknüpft sind.

Kopplungen aus der Messung von Verzweigungsverhältnissen und anderen Produktionsquerschnitten deutlich verbessern. Mittels einer globalen Anpassung der bei TESLA möglichen Messungen lassen sich alle wesentlichen Kopplungen an Fermionen und Bosonen auf dem Prozentniveau bestimmen. Dieses Gesamtbild stellt einen hochempfindlichen Test des Mechanismus der elektroschwachen Symmetriebrechung dar und erlaubt es, unterschiedliche Realisierungen dieses Mechanismus, zum Beispiel supersymmetrische, zu unterscheiden.

Eine weitere in Hamburg durchgeführte Studie befasst sich mit der Sensitivität auf Verletzung der Teilchen-Anteilchen-Symmetrie (CP) in der Produktion von Higgs-Bosonen. Mithilfe einer empfindlichen Methode ist es möglich, solche CP-verletzenden Beiträge auf dem Prozentniveau zu vermessen bzw. auszuschließen.

Supersymmetrie, eine der am besten motivierten Erweiterungen des Standard-Modells, stellt möglicherweise

den Schlüssel zu einer Vereinheitlichung aller Kräfte bei extrem hohen Energien dar. Nur die präzise Vermessung der Massen und Kopplungen der bei TESLA zugänglichen supersymmetrischen Teilchen erlaubt eine Überprüfung dieser Vereinheitlichungs-Hypothese.

Diese Überprüfung basiert auf der Extrapolation der Messungen bei TESLA und beim LHC über viele Größenordnungen hinweg. Eine solche Extrapolation ist in Abbildung 53 gezeigt. Erst die sehr genaue Bestimmung von Parametern, wie sie mit TESLA möglich ist (die mit  $M_1$  bzw.  $M_2$  bezeichneten Kurven in Abb. 53), erlaubt es, eine Aussage über die Gültigkeit spezifischer Modelle zu machen. Dies zeigt, wie durch die in Elektron-Positron-Kollisionen erreichbare Präzision ein Fenster für Physik weit oberhalb der tatsächlich verfügbaren Energie geöffnet wird.

Eine grundlegende Vorhersage des Standard-Modells ist die Selbstwechselwirkung der schweren Eichbosonen  $W^\pm$  und  $Z^0$ . Diese Kopplungen können bei TESLA mit hoher Genauigkeit gemessen werden. Insbesondere wird durch die große Anzahl von Ereignissen und durch die Möglichkeit, die Elektronen- bzw. Positronenstrahlen zu polarisieren, eine simultane Untersuchung aller Parameter zur Beschreibung anomaler Kopplungen möglich. Die Sensitivität liegt im Subpromille-Bereich und ist damit deutlich größer als beim LHC. Anomale Kopplungen sind Beispiele für sehr empfindliche Observablen, mit deren Hilfe nach Physik jenseits des Standard-Modells in Massenbereichen gesucht werden kann, die weit über die am Beschleuniger direkt erreichbaren Energien hinausgehen.

Die genaue Untersuchung des schwersten bekannten Quarks, des top-Quarks, das bei Schwerpunktsenergien oberhalb von etwa 350 GeV paarweise produziert werden kann, stellt einen weiteren wichtigen Bereich dar, der mit TESLA erschlossen werden kann. Die Studien haben gezeigt, dass sich die top-Masse auf 100 MeV genau durch Messung des Wirkungsquerschnitts nahe der Produktionsschwelle bestimmen lässt (Abb. 54). Des Weiteren lassen sich aus der Messung der Zerfallswinkelverteilungen des top-Quarks sein elektrisches und magnetisches Dipolmoment sowie mögliche CP-verletzende Effekte untersuchen. Damit wird das top-Quark zu dem am genauesten vermessenen Quark. Damit wird es eine entscheidende Rolle in der Überprüfung der Konsistenz des Standard-

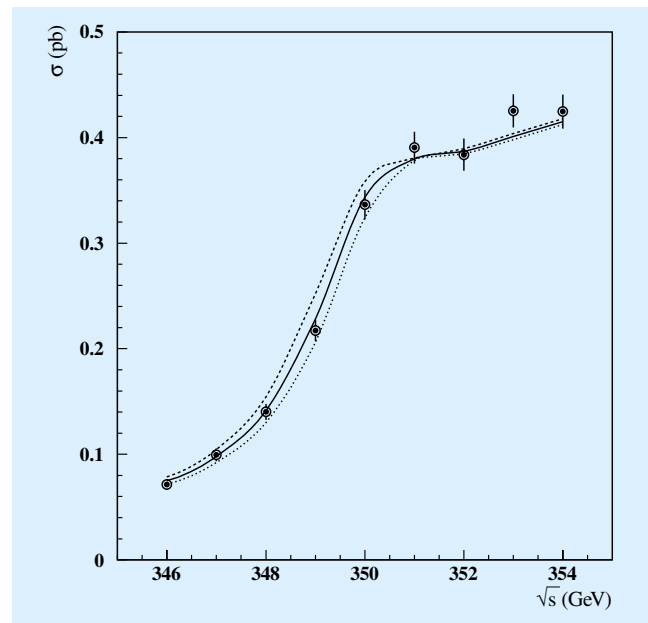


Abbildung 54: Simulation der Bestimmung der Masse des top-Quarks aus dem Schwellenverhalten des Wirkungsquerschnitts für top-Paarproduktion.

Modells und in der Suche nach Abweichungen vom Standard-Modell spielen.

Zwei weitere Optionen für den TESLA Beschleuniger wurden im Berichtsjahr untersucht:

- Giga-Z: der Betrieb von TESLA auf der Z-Resonanz mit einer Produktionsrate von  $10^9$  Z-Bosonen in 50–100 Tagen, etwa der 1000-fachen des LEP-Beschleunigers.
- $\gamma\gamma$ -Option: der Betrieb von TESLA als Photon-Photon-Collider durch Compton Streuung von Laserlicht am Elektronen-Strahl.

Mit Giga-Z lassen sich viele der LEP-Präzisionsmessungen deutlich verbessern. Insbesondere in einer Situation, in der bei hoher Energie „nur“ ein Higgs-Boson und keine weiteren Teilchen beobachtet werden, erlaubt eine verbesserte Messung des elektroschwachen Mischungswinkels bei Giga-Z in Verbindung mit einer verbesserten Messung der Massen von W-Boson und top-Quark eine indirekte Vorhersage der Higgs-Masse mit 5% Präzision. Diese kann dann mit der direkten Messung bei hoher Energie konfrontiert werden. Abweichungen der beiden Massenbestimmungen wären richtungweisend für jegliche Art neuer Physik.

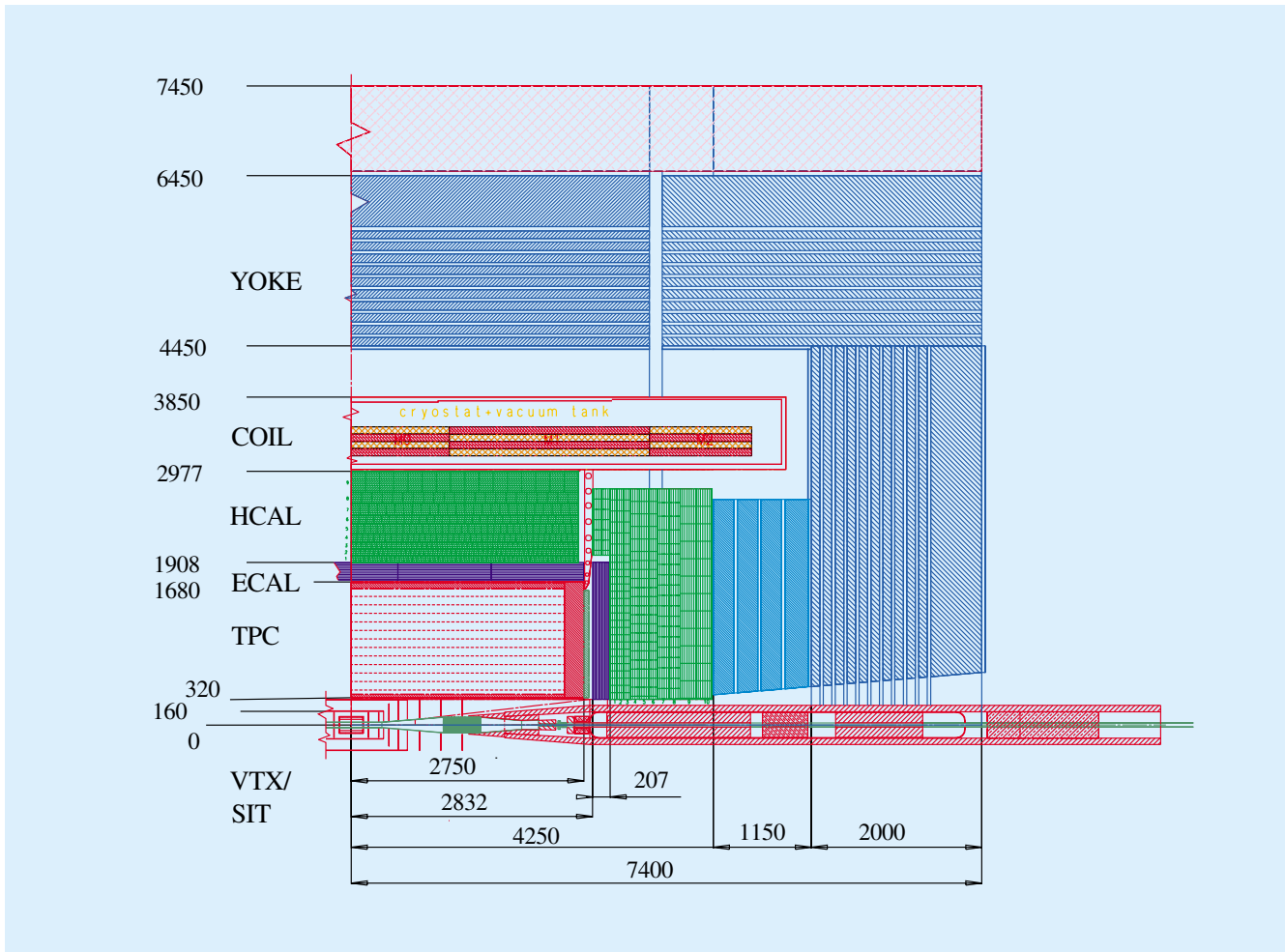


Abbildung 55: Ansicht eines Viertels eines Detektors für TESLA.

Der Untersuchung der  $\gamma\gamma$ -Option war der „International Workshop on High Energy Photon Colliders“ gewidmet, der im Juni 2000 am DESY stattfand. Das Physikpotenzial dieser Option ist ebenfalls im TDR dargestellt. Ein Vorteil gegenüber Elektron-Positron-Kollisionen besteht in der Möglichkeit, Higgs-Bosonen resonant zu erzeugen. Dies ermöglicht die Bestimmung der effektiven Higgs-Photon-Kopplung mit deutlich größerer Präzision als in Elektron-Positron-Kollisionen. Darüber hinaus ist die Produktion schwerer supersymmetrischer Higgs-Bosonen bis zu Massen dicht an der Schwerpunktsenergie des Beschleunigers möglich.

Mit der rechtzeitigen Fertigstellung der Studien für den TESLA TDR zum März 2001 wurde die physikalische Motivation von TESLA als nächstes großes In-

strument zur Erforschung der Mikrophysik umfassend dokumentiert.

## Detektorstudien

TESLA stellt ganz besondere Anforderungen an einen Detektor für die Teilchenphysik, die sich deutlich von denen für einen Detektor an einer Hadron-Maschine, wie zum Beispiel dem LHC oder auch HERA, unterscheiden. An einer Lepton-Maschine ist der Anteil von Untergrund-Ereignissen deutlich geringer, und die Ereignisse haben eine einfachere Struktur. Beides zusammen ermöglicht es, erheblich mehr Informationen aus den einzelnen Ereignissen zu extrahieren und alle physikalisch interessanten Ereignisse aufzuzeichnen.

Technisch heißt das, dass ein Detektor daraufhin optimiert werden muss, die physikalischen Ereignisse präzise zu vermessen, weniger daraufhin, den Untergrund zu verstehen und zu tolerieren.

Das Detektorkonzept, das für TESLA gewählt wurde, ist das eines „großen Detektors“, in dem die Rekonstruktion der Spuren in einem großen Volumen stattfindet, und damit der gesamte Detektor entsprechend große Ausmaße bekommt. Außerhalb der Spurkammersysteme sind Kalorimeter mit sehr guter Ortsauflösung angeordnet. Sowohl die Spurkammersysteme als auch die Kalorimeter befinden sich in einem magnetischen Feld von 4 T. Außerhalb der Spule, die als supraleitende Spule ausgeführt ist, schließt ein Eisenjoch den magnetischen Fluss. Es ist mit mehreren Lagen von Detektoren für Myonen ausgestattet. Spezielle Detektorelemente sorgen dafür, dass der Nachweis von Teilchen bis hin zu sehr kleinen Winkeln zum Strahl möglich ist. Ein Querschnitt durch den Detektor ist in Abbildung 55 gezeigt.

Beim LHC spielt die Strahlenhärte der verschiedenen Detektorkomponenten eine sehr wichtige Rolle, die manchmal sogar entscheidend für die Wahl der Technologie ist. Dies ist bei TESLA nicht der Fall. Untergrund und damit Strahlenbelastungen sind relativ gering und stellen in der Regel kein wesentliches Problem dar.

Die Detektorarbeiten, die unter Beteiligung des DESY stattgefunden haben, berühren im Wesentlichen alle Detektorteile innerhalb der Spule: Spurdetektoren, Kalorimeter und Instrumentierung in der Vorwärtsrichtung.

### Der zentrale Spurdetektor

Der zentrale Spurdetektor bei TESLA hat zwei wesentliche Komponenten: eine großvolumige „Time Projection Chamber“ (TPC) und ein System hochpräziser Silizium-Detektoren innerhalb der TPC bis unmittelbar an den Wechselwirkungspunkt. Aufgabe der Spurkammern ist es, Spuren geladener Teilchen mit hoher Präzision zu vermessen, die Zerfallsvertices langlebiger Teilchen zu rekonstruieren und einen Beitrag zur Teilchenidentifikation mittels der Messung des spezifischen Energieverlustes,  $dE/dx$ , zu leisten. Neben der Auflösung ist ein weiteres wichtiges Design-Kriterium, dass das gesamte System an Spurkammern aus möglichst wenig Material bestehen sollte, so dass die zu

vermessenden Teilchen wenig durch Wechselwirkung mit dem Material beeinflusst werden. Der volumenmäßig größte Teildetektor des inneren Spurdetektorsystems ist die TPC. Sie 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. Eine der wesentlichen neuen Entwicklungen für eine TPC bei TESLA ist die Art der Auslese. Bisher sind dort Drahtkammern zum Einsatz gelangt, in denen die im TPC-Volumen erzeugte Ladung verstärkt und dann mittels hinter den Drähten angeordneten Elektroden („Pads“) nachgewiesen wird. In den letzten Jahren hat die Entwicklung leistungsfähiger Gas-Mikrodetektoren andere Optionen ermöglicht. In Hamburg wird untersucht, ob GEM- („Gas Electron Multiplier“-)Folien für eine TPC-Auslese geeignet sind. GEMs versprechen, eine Endplatte bauen zu können, die eine bessere Auflösung ermöglicht bei gleichzeitig geringeren systematischen Effekten durch Feldverzerrungen und weniger Material. Eine Test-TPC mit GEM-Auslese ist in Hamburg aufgebaut worden und wird seit etwa einem Jahr stabil betrieben.

In Abbildung 56 ist der Zusammenhang zwischen der angelegten Verstärkungsspannung und der Gasverstärkung zu sehen. Die Sättigung bei hohen Spannungen

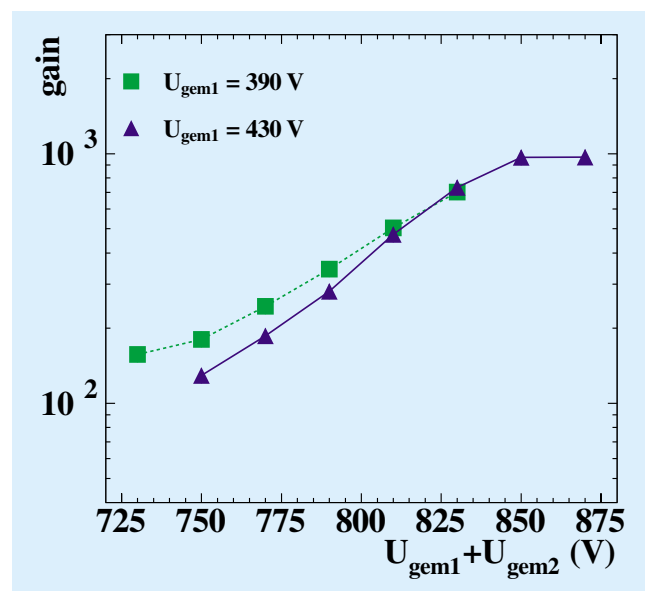


Abbildung 56: Abhängigkeit der Gasverstärkung in einer 2-fach GEM Struktur von den angelegten Spannungen.



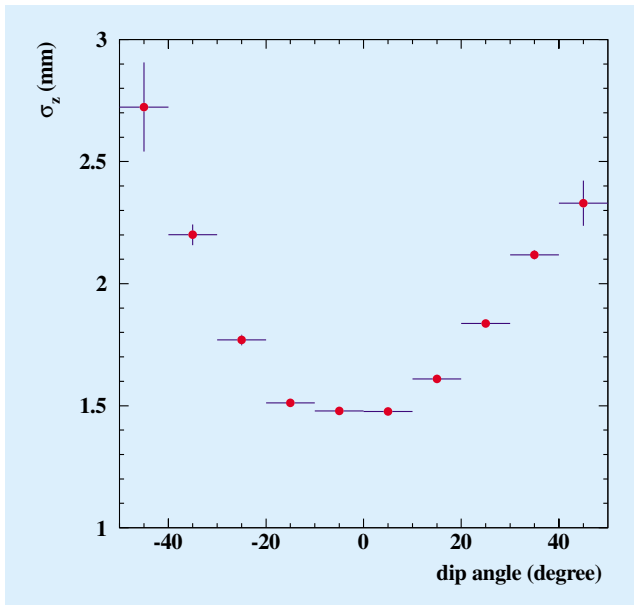


Abbildung 57: Gemessene  $z$ -Auflösung in der TPC als Funktion des Winkels zwischen Spur und Elektron-Driftrichtung.

ist ein Ergebnis der Ausleseelektronik. Eine Verstärkung von etwa 1000 ist erreicht worden, ausreichend für einen stabilen Betrieb der Kammer. Für einen Betrieb in einem realistischen Experiment ist eine etwas höhere Verstärkung angestrebt.

Die Ortsauflösung entlang der Elektron-Driftrichtung ( $z$ ) in der TPC wurde mit kosmischen Myonen bestimmt. Sie ist in Abbildung 57 gezeigt, als Funktion des Winkels zwischen der Spur und der Elektron-Driftrichtung. Der Wert von etwa 1.5 mm bei senkrechtem Einfall ist mit den theoretischen Erwartungen aufgrund der Diffusion der Elektronen im Gas und der Zeitauflösung der Elektronik in Übereinstimmung.

Ein interessantes technisches Problem ist es, wie die intrinsisch hohe Granularität der GEM-Folien genutzt werden kann, ohne dass die Zahl der Auslesekanäle extrem groß wird. Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass eine Möglichkeit der Einsatz komplizierterer Auslesegeometrien ist, in denen Pads in einer Art und Weise angeordnet und geformt sind, dass die Verteilung von Ladung auf verschiedene Pads optimiert wird. In Simulationen konnte damit eine Punktauflösung von 100 bis 150  $\mu\text{m}$  erreicht werden, fast unabhängig von der Drift-

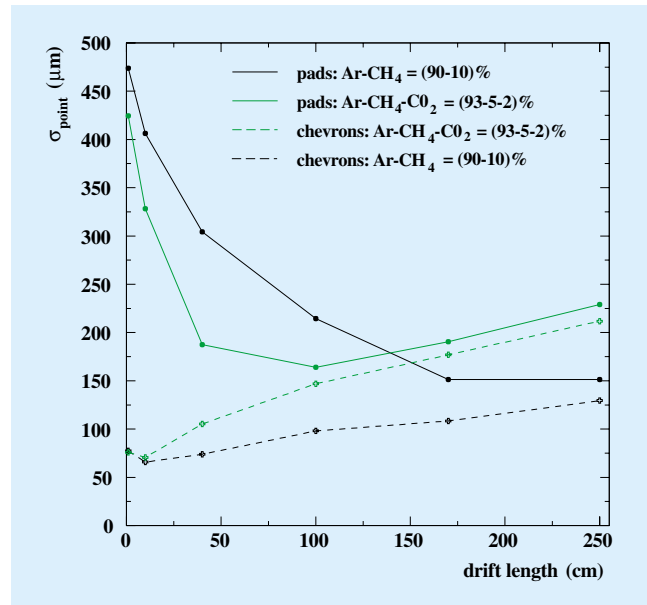


Abbildung 58: Simulierte  $r$ - $\phi$  Auflösung in einer GEM-TPC, für normale rechteckige Ausleseelektroden („Pads“), und für eine kompliziertere Elektrodengeometrie („Chevron Pads“). Die Anzahl der Kanäle ist für beide Geometrien gleich.

strecke. Dieses Konzept soll in den nächsten Monaten experimentell überprüft werden (Abb. 58).

Für den TDR ist ein erstes technisches Design entwickelt worden, wie eine TPC mit GEM-Auslese realisiert werden kann. Die Grundeinheit dabei ist ein sogenannter „GEM Tower“, in dem zwei GEMs zur Gasverstärkung und eine GEM zur Unterdrückung des Ionenrückflusses kombiniert sind. Ein GEM Tower erreicht eine Höhe von etwa 2 cm. Die gesamte Endplatte soll aus etwa 40 solcher Türme aufgebaut werden. Am DESY wird zur Zeit ein erster Prototyp eines solchen GEM Towers gebaut, der dann in der Test-TPC betrieben werden soll.

Erhebliche Anstrengungen wurden im Jahr 2000 unternommen, um eine realistische Rekonstruktion von Ereignissen im vorgeschlagenen Spurdetektorsystem zu ermöglichen. Dies ist wichtig, um die Leistungsfähigkeit des Detektors zu demonstrieren und um zu zeigen, ob das Design den sehr hohen Anforderungen der physikalischen Analysen gerecht wird. In Abbildung 59 ist die erreichte Effizienz gezeigt, mit der Spuren im ge-

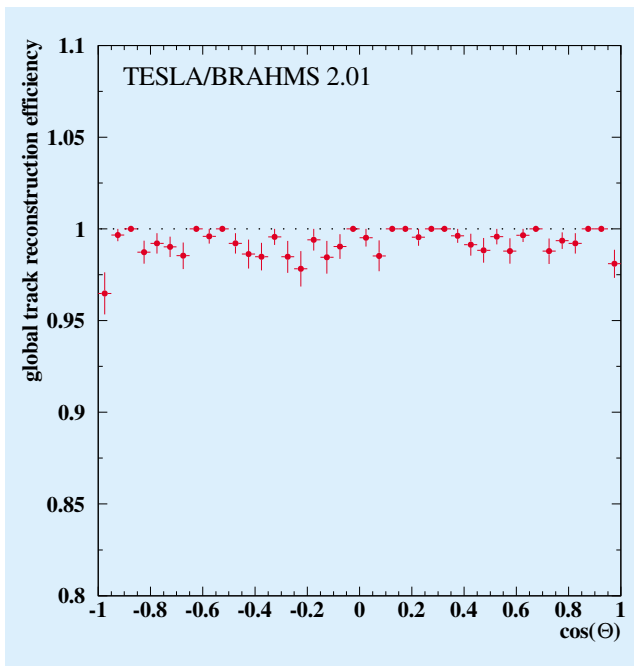


Abbildung 59: Simulierte Spurrekonstruktionseffizienz im zentralen Spurrkammersystem des TESLA-Detektors, als Funktion des Winkels zwischen Spur und Strahlachse.

samt System gefunden und rekonstruiert werden können. Eine mittlere Rekonstruktionseffizienz von über 99% wurde in hadronischen  $Z$ -Zerfällen erreicht.

## Die Kalorimeter

Für viele der Messungen, die bei TESLA gemacht werden sollen, werden komplexe hadronische Endzustände vorausgesagt. Häufig werden diese in mehrstufigen Kaskadenzerfällen entstehen. Um neue Physik zu erkennen, müssen deren Signaturen von denen typischer Standard-Modell Prozesse wie  $t \rightarrow Wb$ ,  $W \rightarrow q\bar{q}'$  oder  $Z \rightarrow q\bar{q}$  unterschieden werden. Um diese Aufgabe erfüllen zu können, ist es notwendig, die Impulse der Jets bzw. der Partonen genau zu vermessen. Dazu braucht man Kalorimeter mit den folgenden Eigenschaften:

- Hervorragende Energieauflösung für Jets,
- sehr gute Hermetizität bis hin zu kleinsten Polarwinkeln,
- hervorragende Winkelauflösung,

- die Fähigkeit, die Photonenrichtung genau zu rekonstruieren,
- gute Zeitauflösung, um zu verhindern, dass sich mehrere Ereignisse im Kalorimeter überlagern.

Bei LEP und SLC wurde gezeigt, dass die Messung des so genannten „Energy Flow“ ein wesentliches Werkzeug in der Rekonstruktion von Ereignissen darstellt. „Energy Flow“ heißt, dass die Energie und die Richtung des Energieflusses im Ereignis präzise durch eine Kombination von Spurrkammern und Kalorimetern gemessen werden. Die Spurrkammern und die Kalorimeter messen die Energie der geladenen Teilchen, die Kalorimeter die der neutralen Teilchen. Entscheidend dabei ist die Fähigkeit des Systems, einzelne Teilchen zu vermessen. Das bedeutet, dass die normalerweise für ein Kalorimeter zitierte Energieauflösung, die eine Eigenschaft für viele Teilchen beschreibt, weniger wichtig ist als die Granularität und das Verhalten bei einzelnen Teilchen.

Ein Konzept, das diesen Anforderungen am nächsten kommt, ist das eines „sampling“ Kalorimeters mit hoher transversaler (das heißt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Schauers) und longitudinaler Segmentierung, dessen Absorberplatten aus einem dichten Medium, wie zum Beispiel Wolfram, hergestellt sind.

Für TESLA ist deshalb ein Kalorimeter vorgeschlagen worden, das eine sehr hohe transversale und longitudinale Segmentierung aufweist, und in dem sowohl das elektromagnetische als auch das hadronische Kalorimeter innerhalb der Spule angeordnet sind.

Die Zellgröße im elektromagnetischen Kalorimeter soll in transversaler Richtung etwa  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  sein, longitudinal sind 40 Lagen geplant, bei einer Tiefe des Gerätes von 24 Strahlungslängen. Die Absorberplatten sind aus Wolfram hergestellt, die Sensoren sind dünne Silizium-Detektoren.

Das hadronische Kalorimeter hat naturgemäß eine etwas größere Segmentierung. Die Zellen beginnen am inneren Radius mit einer Größe von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  und wachsen bis auf etwa  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  am äußeren Radius. Aus Kostengründen scheidet Wolfram als Absorber für dieses Kalorimeter aus, statt dessen ist Stahl vorgesehen. Die Signale werden mit Szintillatoren gemessen, die mittels Wellenlängenschiebern und langer klarer Glas-

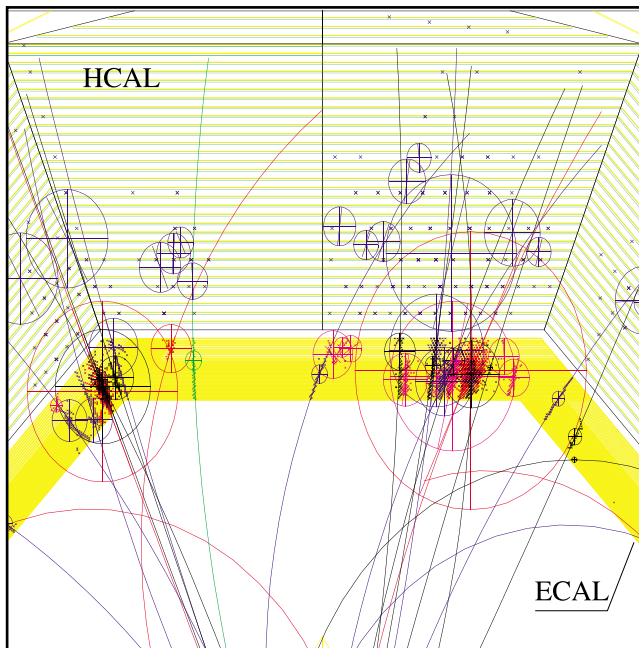


Abbildung 60: Ausschnitt aus einem hadronischen Ereignis, rekonstruiert im Kalorimeter. Ein Modul des Kalorimeters (1/8 des Umfanges) mit elektromagnetischem (ECAL) und hadronischem (HCAL) Teil ist sichtbar, der Wechselwirkungspunkt liegt unterhalb des Bildes. Die Punkte sind simulierte Signale in den Sensoren. Die Kreise geben die Position der rekonstruierten „cluster“ an, die Spuren die Ergebnisse der Rekonstruktion der Impulse der Teilchen, die die „cluster“ erzeugt haben. Nur kalorimetrische Information wurde verwendet.

fibern ausgelesen werden. In longitudinaler Richtung sind neun Ausleseebenen vorgesehen. Ein simuliertes Ereignis im Kalorimeter ist in Abbildung 60 gezeigt.

Ziel ist es, ein Kalorimeter mit einer Auflösung für den Energy Flow von  $30\%/\sqrt{E}$  zu bauen. Bei den LEP-Experimenten, die das Konzept der Energy Flow Analyse intensiv angewendet haben, konnte eine Auflösung von etwa  $60\%/\sqrt{E}$  erreicht werden.

In Rahmen der ECFA/DESY Studie sind intensive Studien zu einem solchen Kalorimeter begonnen worden. Gruppen aus Frankreich haben eine führende Rolle beim elektromagnetischen Kalorimeter übernommen, Gruppen vom DESY und aus Russland studieren das hadronische Kalorimeter. Auf die mechanischen und elek-

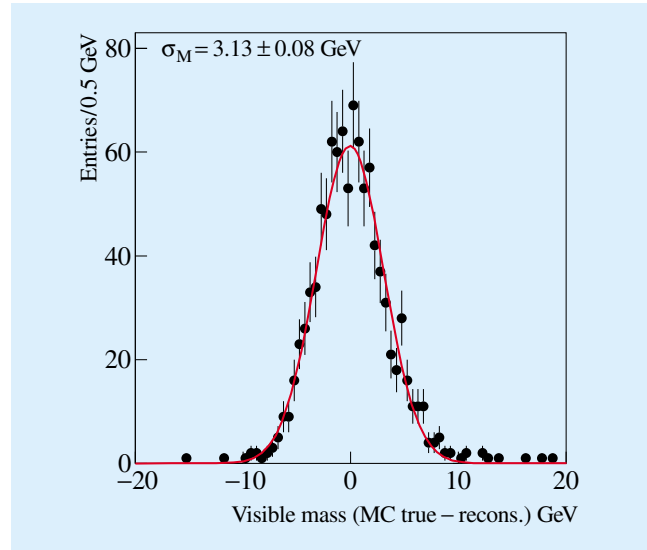


Abbildung 61: Massenverteilung für das Z-Boson, rekonstruiert in hadronischen Zerfällen.

trischen Probleme bei der Konstruktion eines solchen Gerätes soll hier nicht näher eingegangen werden.

Eine besondere Herausforderung ist es, ein möglichst hermetisches Kalorimeter zu bauen. Das bisher beschriebene Kalorimeter deckt den Bereich bis zu etwa  $5^\circ$  zur Strahlachse ab. Bei kleineren Winkeln steigt der Untergrund sehr schnell an. Zwei spezialisierte Kalorimeter sind in diesem Bereich vorgesehen.

Der sogenannte „Low Angle Tagger“ deckt den Bereich bis etwa  $1.5^\circ$  durch ein hoch-segmentiertes Silizium-Wolfram Kalorimeter ab. Dieses Kalorimeter ist in ein System von Wolfram-Masken integriert, die verhindern sollen, dass Untergrund, der von der Maschine erzeugt wird, in den Detektor gelangt.

Bei noch kleineren Winkeln ist ein Luminositäts-Monitor vorgesehen. Hier wird untersucht, ob Standard-Technologien dem Strahlenuntergrund standhalten, oder ob alternative Methoden verwendet werden müssen. In Hamburg wird der Einsatz von künstlichem Diamant als aktivem Medium im Gerät untersucht. Diamant zeichnet sich durch eine extreme Strahlenhärte aus, ist aber technisch schwerer zu beherrschen als Silizium und ist im Moment zumindest auch noch erheblich teurer. Ziel der Arbeiten ist es, zu untersuchen, ob Diamant den Anforderungen genügt, und die technischen Pro-

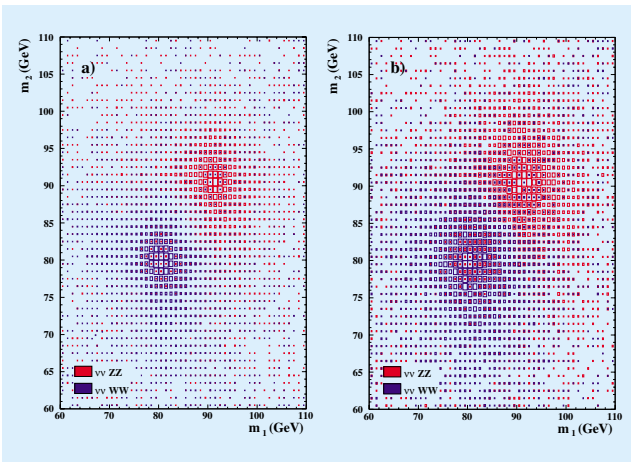


Abbildung 62: Rekonstruierte Masse für Ereignisse des Typs  $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}WW$  und  $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}ZZ$ , für eine Energy Flow Auflösung von a)  $30\%/\sqrt{E}$ , b)  $60\%/\sqrt{E}$ .

bleme im Zusammenhang mit der Konstruktion eines Kalorimeters mit Diamant-Auslese zu lösen.

Für einen vollständigen Entwurf sind umfangreiche Studien über das erwartete Verhalten des Kalorimeters notwendig. Dazu müssen die einzelnen Parameter in Simulationen optimiert werden. Erhebliche Arbeit ist deshalb in die Entwicklung geeigneter Simulations- und Analyse-Algorithmen geflossen. Institute aus Frankreich, aus den Niederlanden, aus Russland und vom DESY und von der Universität Hamburg waren an diesen Arbeiten beteiligt. In Abbildung 60 ist ein simuliertes Ereignis im Kalorimeter gezeigt. Die große Anzahl der Teilchen, die Dichte der einzelnen Schauer und der Überlapp zwischen benachbarten Schauern sind deutlich sichtbar. In dem Bild sind ebenfalls die Ergebnisse der Rekonstruktion gezeigt. Die Spuren entsprechen einzelnen Teilchen, die nur mit dem Kalorimeter rekonstruiert wurden, die Krümmung der Spuren ist ein Maß für ihren Impuls, gemessen nur mit dem Kalorimeter. Deutlich sichtbar ist, wie die hohe Granularität hilft, einzelne Spuren zu separieren, und den Einfluss durch überlappende Schauer klein zu halten.

Die Ergebnisse einer umfassenden Simulation des Kalorimeters sind noch nicht endgültig verfügbar. Erste Ergebnisse sind allerdings sehr ermutigend. In Abbildung 61 ist die Massenauflösung für Z-Zerfälle

gezeigt, wenn die Z Bosonen rein hadronisch zerfallen. Die gemessene Breite ist  $3.1 \text{ GeV}$ , in Übereinstimmung mit der Erwartung für eine Energy Flow Auflösung von  $30\%/\sqrt{E}$ . Der Einfluss auf physikalische Analysen ist in Abbildung 62 gezeigt. Untersucht wird hier, wie Ereignisse vom Typ  $\nu\bar{\nu}WW$  von Ereignissen des Typs  $\nu\bar{\nu}ZZ$  getrennt werden können. In der rechten Abbildung ist die Situation für eine Energy Flow Auflösung von  $60\%/\sqrt{E}$  gezeigt, links für die angestrebten  $30\%/\sqrt{E}$ . Die Separation ist deutlich verbessert.

In den nächsten Monaten werden die Arbeiten zur Entwicklung einer kompletten Rekonstruktions-Software im Kalorimeter weiter fortgesetzt werden. Darüber hinaus ist eine Reihe von Entwicklungsarbeiten geplant, um die Realisierbarkeit des vorgestellten Konzeptes im Detail zu demonstrieren.

## Zusammenfassung

Die ECFA/DESY Studie und die Anfertigung des TDR haben zu einer sehr dynamischen Entwicklung der Studien des physikalischen Potenzials und der technischen Realisation eines Experiments bei TESLA geführt. Wesentliche Fortschritte konnten im Verständnis der Physik gemacht werden, wobei die einmaligen Forschungsmöglichkeiten bei TESLA und ihre Komplementarität zu den Forschungen beim LHC klar herausgearbeitet wurden. Die Realisierung der physikalischen Ziele stellt hohe Anforderungen an einen Detektor. Simulationsarbeiten sind bereits weit fortgeschritten, und Forschungs- und Entwicklungsarbeiten haben begonnen. Die Arbeiten sind umfassend im TDR dokumentiert worden und bilden den Ausgangspunkt für zukünftige Entwicklungen.

Eine große Zahl von Gruppen aus vielen Ländern auch außerhalb Europas hat an der Fertigstellung der Arbeiten mitgewirkt. Die große Bandbreite und die grundlegende Natur der Physik, die bei TESLA erforscht werden kann, kombiniert mit den vielen unterschiedlichen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, bilden den wesentlichen Anreiz, der die Attraktivität dieses Projektes erklärt.