

Abbildung 49: *Simuliertes Top-Anti-Top-Ereignis bei einer Schwerpunktsenergie von 380 GeV im TESLA-Detektor. Gezeigt sind in der Projektion senkrecht zur Strahlachse (oben) nur die innerhalb der Magnetspule gelegenen Komponenten, von innen nach außen: die zentralen Spurdetektoren (Vertexdetektor und Time Projection Chamber) und Kalorimeter (elektromagnetischer und hadronischer Teil). Die Balken an der Peripherie repräsentieren die Energien einzelner rekonstruierter Teilchen und ihre Richtungen am Wechselwirkungspunkt. Dabei wurde für geladene Teilchen (rot) die Spurkammer-Messung verwendet, für neutrale (grün) das Kalorimeter.*

Forschung an Lepton Collidern

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

Sprecher: T. Behnke, F. Sefkow, DESY und R.-D. Heuer, Univ. Hamburg

Die Vorbereitungen für das Forschungsprogramm bei TESLA waren im Jahre 2002 durch weiter intensivierte internationale Zusammenarbeit geprägt.

Im Rahmen der erweiterten ECFA-DESY-Studie wurden die Untersuchungen zur Physik und zum Detektor an einem e^+e^- -Linear-Collider wie TESLA vertieft. Die Auslotung des Synergiepotentials, das sich im Wechselspiel mit Forschungen an anderen künftigen Beschleunigern ergibt, rückte dabei als ein neuer Schwerpunkt ins Blickfeld, während bei der Detektorentwicklung die Vorbereitung gemeinsamer Testaufbauten internationaler Gruppen konkretisiert wurde.

Die Studien finden eine von Jahr zu Jahr wachsende Resonanz auf regionalen und internationalen Linear-Collider Konferenzen, im Jahr 2002 in Frankreich, Tschechien und Korea, zu denen Mitglieder der Gruppe FLC zentrale und führende Beiträge geliefert haben.

Der Linear-Collider TESLA

Es besteht inzwischen innerhalb der Gemeinschaft der Hochenergiephysiker ein globaler Konsens, dass als nächstes Beschleunigerprojekt der Teilchenphysik ein Elektron-Positron-Linearbeschleuniger mit einer Energie von $\sqrt{s} = M_Z$ bis zu etwa 1 TeV benötigt wird. Auf diesem Konsens aufbauend sind weitere Schritte in Richtung Realisierung des Projekts als international koordinierte Aktivitäten unternommen worden. Bei der Detektorentwicklung in Europa, Asien und Amerika beispielsweise werden die Projekte bereits in der

Begutachtungsphase auf die Aktivitäten in den jeweils anderen Regionen abgestimmt, und die Ergebnisse werden bei regelmäßigen interregionalen Arbeitstreffen ausgetauscht.

Für den Linear-Collider selbst werden verschiedene technische Varianten entwickelt. Das International Committee for Future Accelerators (ICFA) hat eine international besetzte Expertenkommission einberufen, um diese Vorschläge auf noch ungelöste Fragen hin zu untersuchen und miteinander zu vergleichen. Dabei wurde das TESLA-Konzept als das am weitesten entwickelte bewertet und als das einzige Projekt eingestuft, bei dem es keine grundsätzlichen Probleme mehr gibt, die einer Realisierung im Wege stehen.

Auch auf nationaler Ebene ist das TESLA-Projekt mit hervorragenden Noten ausgezeichnet worden. Der von der Bundesregierung beauftragte Wissenschaftsrat hat DESY eine bestmögliche Vorbereitung attestiert und TESLA zur Realisierung empfohlen, sofern der Weg zur internationalen Finanzierung konkretisiert werden kann.

Physikstudien bei TESLA

Untersuchungen zum Physikpotential von TESLA haben zwei Motivationen: Erstens wird untersucht, inwieweit man von TESLA Sensitivität auf bekannte und neue theoretische Szenarien erwarten kann. Zweitens dienen die Studien auch zur Optimierung des Detektorkonzepts, da die zu erwartenden Physikprozesse die benötigte Detektorauflösung definieren. Die Gruppe FLC hat im Jahr 2002 weiterhin eine führende Rolle bei

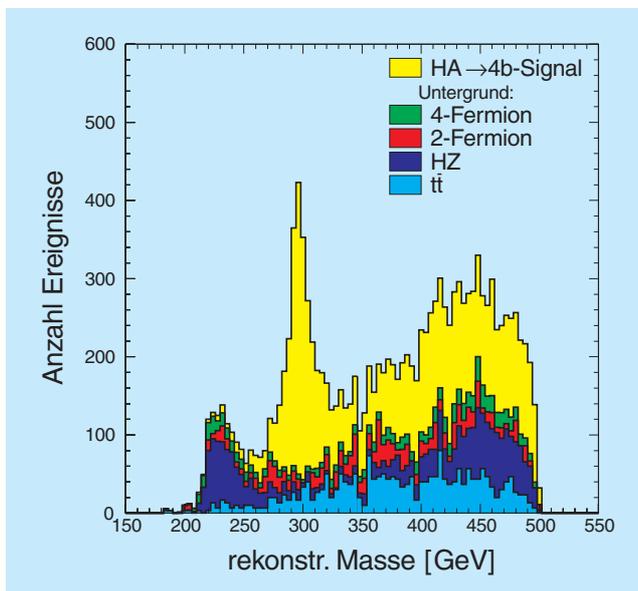


Abbildung 50: Produktion schwerer Higgs-Bosonen: Rekonstruktion der Masse im Endzustand mit 4 b-Quarks.

den Physikstudien innerhalb der ECFA/DESY-Studie gespielt. Schwerpunkte bildeten Untersuchungen im Bereich der Higgs-Bosonen und der Supersymmetrie. Auch auf dem Gebiet der elektroschwachen Präzisionsphysik und der Physik des Top-Quarks gibt es wichtige Beiträge.

Higgs-Physik

Ein Bereich der Higgs-Physik, der im Technical Design Report (TDR) noch nicht ausreichend untersucht wurde, ist die Produktion der schweren Higgs-Bosonen A^0 und H^0 , die in supersymmetrischen Erweiterungen des Standardmodells vorhergesagt werden. Der wichtigste Prozess ist die Paarproduktion von A^0 und H^0 . Dieser Prozess wird momentan in den Endzuständen mit vier b-Quarks und mit zwei b-Quarks und zwei Tau-Leptonen simuliert. Es zeigt sich, dass sich das Signal klar vom Untergrund abtrennen lässt (Abb. 50).

Von besonderer Wichtigkeit ist hier, wie für viele Higgs-Analysen, die Identifikation von b-Quarks mit Hilfe des Vertex-Detektors. Algorithmen sind in den letzten Jah-

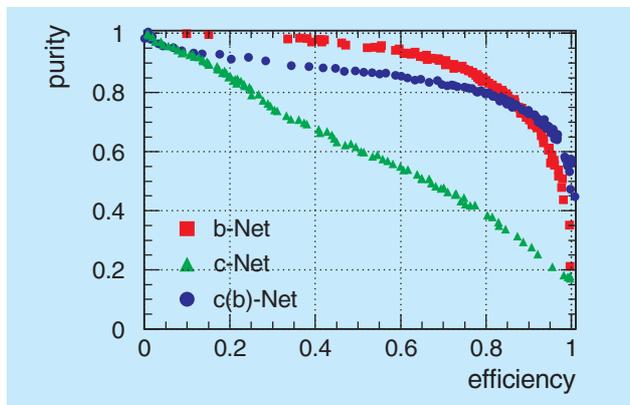


Abbildung 51: Effizienz und Reinheit für die Identifikation von b- und c-Quarks aus Z^0 -Zerfällen in der schnellen Detektorsimulation SIMDET.

ren entwickelt worden, die unter Verwendung neuronaler Netze eine exzellente Nachweiswahrscheinlichkeit für b- und c-Quarks erlauben. Im letzten Jahr wurde eine realistische Version des Algorithmus in der schnellen Detektorsimulation SIMDET implementiert, die allen Arbeitsgruppen zur Verfügung steht. Die Effizienz der neuen b- und c-Quark-Identifikation in der schnellen Simulation SIMDET ist in Abbildung 51 gezeigt. Weitere Studien beschäftigen sich mit der Rekonstruktion der CP-Eigenschaften aus Winkelkorrelationen in Zerfällen von Higgs-Bosonen in Tau-Lepton-Paare.

Supersymmetrie

Supersymmetrie (SUSY), wenngleich bisher nicht entdeckt, bildet ein sehr attraktives Modell für Physik jenseits des Standardmodells. Suchen nach supersymmetrischen Teilchen bei LEP haben den erlaubten Parameterraum für viele Modelle stark eingegrenzt. In der letzten Zeit finden Theorien, in denen der supersymmetrische Partner des Higgs-Bosons in Endzustände mit Tau-Leptonen zerfällt, vermehrt Aufmerksamkeit. Diese Zustände sind von den LEP-Suchen bisher nur wenig eingeschränkt. Im TESLA TDR wurden zwar Zerfälle in Elektronen und Myonen ausführlich untersucht, Zerfälle mit Tau-Leptonen im Endzustand weniger. Diese Zustände, die besondere Herausforderungen an den Detektor stellen, sind im letzten Jahr studiert worden.

Eine Studie beschäftigte sich mit der Produktion von Neutralinos, den neutralen supersymmetrischen Partnern von Photon, Z-Boson und neutralen Higgs-Bosonen. Es wurde gezeigt, dass sich das Signal vom Standardmodell-Untergrund abtrennen lässt, dass jedoch andere SUSY-Prozesse als Untergrund berücksichtigt werden müssen. Eine Präzisionsbestimmung der Neutralino-Masse erfordert in einem solchen Szenario eine Messung an der Produktionsschwelle, da sie sich im Kontinuum wegen der auftretenden Tau-Neutrinos nicht genauer als etwa 2 GeV bestimmen lässt.

LHC/LC Arbeitsgruppe

Im Jahr 2002 begann eine internationale Arbeitsgruppe, zu untersuchen, wie sich der Large Hadron Collider (LHC) und der Linear-Collider (LC) gegenseitig ergänzen. In vielen Studien ist in den letzten Jahren immer wieder auf die Komplementarität der beiden Maschinen hingewiesen worden. Ziel der Arbeitsgruppe ist es, diese allgemeinen Aussagen zu konkretisieren und in enger Zusammenarbeit mit Physikern der LHC- und der LC-Arbeitsgruppen auszuarbeiten, wie eine solche Komplementarität konkret aussieht. Ein besonderes Interesse findet dabei die Frage, wie, wenn beide Maschinen gleichzeitig operieren, Ergebnisse der einen Maschine das Messprogramm an der anderen Maschine beeinflussen können.

Beispiele für die Komplementarität finden sich in fast allen Physikbereichen, die am LC oder am LHC untersucht werden sollen: im Bereich der Higgs-Studien wird die präzise Messung von Verzweigungsverhältnissen der einzelnen Higgs-Zerfälle am LC dem LHC erlauben, seine Messung des Wirkungsquerschnittes assoziierter Higgs-Top-Quark Produktion direkt als Messung der Kopplungsstärke des Top-Quarks an das Higgs-Boson zu interpretieren.

Im Bereich von Supersymmetrie lässt sich durch die Präzisions-Massenbestimmung der leichteren SUSY-Teilchen am LC eine deutliche Verbesserung für die nur am LHC zugänglichen schwereren SUSY-Teilchen erzielen. Die LHC/LC Arbeitsgruppe plant, im Laufe des Jahres 2003 einen ersten Zwischenbericht mit quantitativen Ergebnissen zu veröffentlichen.

Detektorstudien

Das Physik-Programm bei TESLA stellt sehr hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Detektors, die den gegenwärtigen Stand der Technik teilweise übertreffen. Zwar ist in den vergangenen Jahren die Entwicklung von Detektoren für Hadron-Maschinen mit großem Aufwand vorangetrieben worden, doch standen dabei die hohe Ereignisrate und die starke Strahlenbelastung im Vordergrund. Da ein e^+e^- -Linear-Collider von solchen Problemen weitgehend verschont bleibt, scheinen die Detektor-Anforderungen auf den ersten Blick leicht erfüllbar. Doch das in den Physikstudien aufgezeigte Potential von Präzisionsmessungen verlangt nach Nachweisgeräten, die bisher unerreichten Ansprüchen an die Messgenauigkeit genügen.

Die Impulsauflösung des Spurdetektors etwa sollte zehnmal besser als die existierender Detektoren sein. Sie entscheidet darüber, wie gut sich verschiedene Ereignisarten voneinander trennen lassen und wie genau sich die Massen möglicher neuer Teilchen bestimmen lassen. Dies soll zum einen durch ein höheres Magnetfeld erreicht werden, zum anderen ist aber eine präzisere Messung der Spurpunkte vonnöten.

Die Jetenergie-Auflösung des Kalorimeters muss doppelt so gut sein wie die der besten bisher gebauten, um zum Beispiel hadronisch zerfallende W- und Z-Bosonen voneinander unterscheiden zu können. Dazu müssen die Detektoren um mehrere Größenordnungen feiner unterteilt sein. Neben der Entwicklung kostengünstiger und zuverlässiger Auslesesysteme für die daraus resultierende hohe Zahl von elektronischen Kanälen ist auch ein vollkommen neuer Ansatz in der Rekonstruktion der Ereignisse erforderlich, der dem einer Spurkammer ähnlicher ist als dem eines konventionellen Kalorimeters.

Bisher unerreichte Anforderungen an die Messgenauigkeit gelten auch für weitere Detektorkomponenten, beispielsweise die Vertexdetektoren, die c-Quarks erkennen müssen, oder die strahlennahen Kalorimeter, die aufgrund der am Linear-Collider erstmals signifikant auftretenden Beamstrahlung neue Herausforderungen darstellen.

Die Gruppe FLC ist aktiv beteiligt an der Entwicklung der Haupt-Spurkammer und des Hadron-Kalorimeters. Ein Wissenschaftler arbeitet darüber hinaus mit an der

Auslegung der Wechselwirkungszone, die Randbedingungen sowohl der Maschine als auch des Detektors zu berücksichtigen hat.

Time Projection Chamber

Als zentraler Spurdetektor bei TESLA wurde im TDR eine großvolumige „Time Projection Chamber“ (TPC) vorgeschlagen. Solche Kammern bestehen aus einem Minimum an störendem Material und liefern entlang der Bahnen geladener Teilchen eine große Zahl dreidimensionaler Raumpunkte zur Spurrekonstruktion. Das Materialbudget und die Ortsauflösung der einzelnen Punkte sollen gegenüber existierenden Detektoren weiter verbessert werden, indem zur Auslese anstelle der bisher eingesetzten Drahtkammern neuartige Mikrostrukturen, zum Beispiel „Gas Electron Multiplier“ (GEM) Folien verwendet werden. GEM-Folien weisen insbesondere bei den angestrebten hohen Magnetfeldern geringere Messfehler durch Feldverzerrungen auf, und sie unterdrücken den Rückfluss positiver Ionen aus der Verstärkungsstruktur in das Kammervolumen, so dass der Detektor totzeitfrei betrieben werden kann. Auf diese beiden Vorteile konzentrieren sich auch die TPC-Forschungsarbeiten der Gruppe FLC.

Um die hohe intrinsische Auflösung der GEM-Folien ausschöpfen zu können, ohne die Segmentierung der Auslesefläche und damit die Zahl der kostspieligen elektronischen Kanäle zu sehr zu erhöhen, sollte das Ladungssignal einer Spur möglichst so auf benachbarte Anodenfelder verteilt sein, dass Schwerpunktsmethoden zur Koordinatenbestimmung verwendet werden können. Bereits durchgeführte Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass sich durch eine zickzackförmige Unterteilung der Auslesestruktur eine deutliche Verbesserung der Auflösung erreichen lässt. Im Berichtsjahr konnte dieser Effekt auch erstmals experimentell nachgewiesen werden.

Als nächstes ist vorgesehen, die Studien zur Detektorentwicklung unter realistischen Bedingungen fortzuführen. Dazu wurde in Zusammenarbeit mit den Gruppen F1, MKS und MKK ein Teststand mit einem supraleitenden Magneten aufgebaut, der ein Feld bis zu 5 T erzeugt. Der Magnet wurde im Zuge der HERA-Umbauten beim ZEUS-Experiment ausgebaut und in der HERA-Kältehalle in den Kühlkreislauf inte-



Abbildung 52: Test-TPC in der Öffnung des supraleitenden Magneten.

griert und wieder in Betrieb genommen. Abbildung 52 zeigt einen Teil des Magneten zusammen mit einer Test-TPC bei den ersten Messungen. Die Testkammer samt Messelektronik wurde von einer Aachener Partnergruppe zum Studium des Ladungstransfers in den GEM-Strukturen gebaut.

Die gemeinsam durchgeführten Messungen der verschiedenen Ionisationsströme als Funktion des Magnetfelds sind in Abbildung 53 dargestellt. Sie sind im Be-

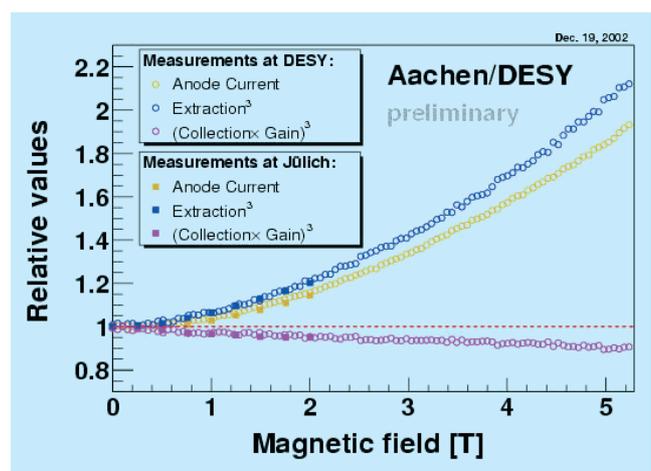


Abbildung 53: Ionisationsströme in der Test-TPC als Funktion des Magnetfelds (relative Werte bezogen auf $B = 0$). Der Anodenstrom (mittlere Kurve) ist ein Maß für die effektive Verstärkung der GEM-Struktur.

reich niedriger Felder in Übereinstimmung mit Messungen an einem normalleitenden Magneten.

Eine wesentliche Aussage dieser ersten Daten ist, dass die effektive Verstärkung der untersuchten GEM-Struktur auch im Bereich des für den TESLA-Detektor vorgesehenen Feldes von 4 T mit der Feldstärke zunimmt und damit deutlichere Signale liefert. Dies ist am Anstieg des Anodenstroms (mittlere Kurve) zu erkennen, die anderen Kurven stellen Details des Ladungstransfers dar. Weitere, noch nicht abgeschlossene Messungen werden darüber Auskunft geben, ob der unerwünschte Ionenrückfluss bei ausreichender Verstärkung klein genug gehalten werden kann.

Eine weitere Test-TPC, mit der die Spurauflösung im 4 T-Feld studiert werden kann, wird derzeit bei DESY in Leichtbauweise gefertigt, wie sie für den späteren großen Detektor erforderlich ist. Außerdem ist bereits geplant, dass weitere Testkammern, die an den europäischen und amerikanischen Partnerinstituten der internationalen Linear-Collider-TPC-Gruppe gebaut wurden, zu Messungen im Magneten installiert werden.

Hadron-Kalorimeter

Ziel des Detektors ist es, alle Teilchen, die in einem Ereignis produziert worden sind, möglichst einzeln zu rekonstruieren, und zwar sowohl geladene als auch neutrale. Der Anspruch, damit auch die innere Struktur von dichten Jets aufzulösen, stellt eine ganz besondere Herausforderung an die Kalorimeter dar. Sie müssen eine bisher unerreichte Granularität sowohl entlang der Teilchenrichtungen als auch senkrecht dazu aufweisen, um geladene von neutralen Teilchen zu trennen und im Spurdetektor gemessenen Trajektorien zuzuordnen. Mit solchen „Energy Flow“-Algorithmen lässt sich die Energieauflösung für Jets erheblich verbessern, da man dann für die typischerweise 60% der Energie, die auf geladene Teilchen fällt, von der überlegenen Impulsauflösung der TPC profitiert und auch für den im elektromagnetischen Kalorimeter identifizierten Photon-Anteil die Präzision dieser Komponente optimal nutzt. Damit kommt der bildgebenden („imaging“) Funktion eine vergleichbar große Bedeutung zu wie der intrinsischen Energieauflösung für einzelne Teilchen. Allerdings liefert selbst im Idealfall perfekter Teilchenidentifikation der kleine Anteil neutraler Hadronen, der

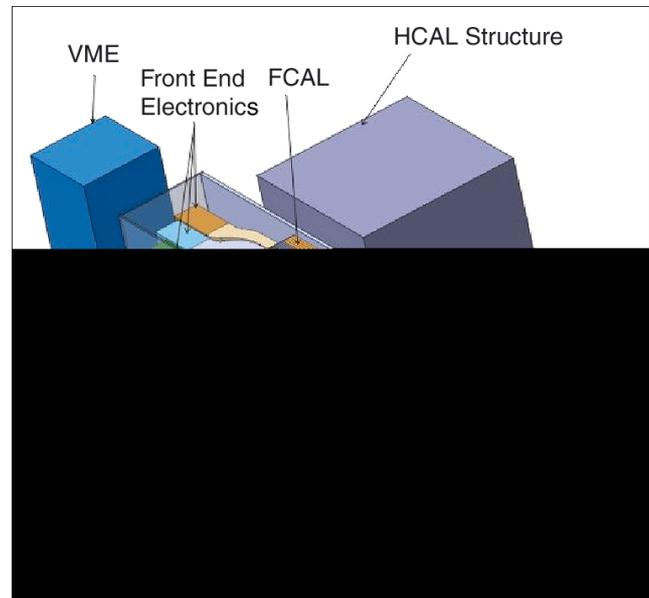


Abbildung 54: Geplanter Teststrahl-Aufbau des elektromagnetischen und hadronischen Kalorimeter-Prototyps.

nur im Hadron-Kalorimeter gemessen wird, noch den dominanten Beitrag zur Jetenergieauflösung.

Für das Hadron-Kalorimeter des TESLA-Detektors werden zwei Varianten diskutiert.

Das Tile-HCAL basiert auf der bereits erprobten Technologie eines Sandwich-Kalorimeters mit Eisen-Absorber und Szintillator-Kacheln („Tiles“). Allerdings stellt die hohe Granularität mit $5 \times 5 \text{ cm}^2$ eine Extrapolation in noch unbekanntes Gebiet dar. Die Gruppe FLC arbeitet hier zusammen mit russischen und tschechischen Partnerinstituten an der Optimierung des Systems aus Szintillator, Glasfaser-Auslese und Photo-Detektor. Die im letzten Jahr berichteten Studien zur Lichtausbeute wurden systematisch fortgeführt und im vergangenen Herbst vom PRC anerkennend begutachtet.

Eine noch stärkere Betonung der Ortsauflösung stellt die zweite Variante dar: das digitale Kalorimeter hat 1 cm^2 kleine Zellen, aber dafür werden die etwa 50 Millionen Kanäle aus Kostengründen nur binär ausgelesen. Für die Auslese kommen verschiedene Techniken in Frage: Szintillatoren, GEM-Folien oder so genannte „Resistive Plate Chambers“. Simulationsstudien deuten an,

dass sich mit diesem Detektorkonzept durchaus kompetitive Energieauflösungen auch für einzelne Teilchen erreichen lassen.

Beide Optionen werden im Rahmen der CALICE-Kollaboration als Teile eines integrierten Systems aus elektromagnetischem und hadronischem Kalorimeter verfolgt. Die internationale Gruppe – 168 Wissenschaftler aus 9 Ländern aller 3 Regionen – bereitet einen Strahltest mit einem solchen System im Vollmaßstab vor. Dazu wird ein Kalorimetervolumen von 1 m^3 mit mehreren 100 000 Auslesekanälen bestückt werden. Der geplante Aufbau ist in Abbildung 54 dargestellt.

Das Ziel ist, neben der Erprobung der Technologien, realistische Daten von hochauflösenden Hadron-Kalorimetern im Zusammenspiel mit dem elektromagnetischen Teil zu erhalten, um so die Simulationen zu validieren, die zur weiteren Optimierung des Detektors und zur Fortentwicklung der Energy Flow-Algorithmen nötig sind.

Software-Entwicklung

Bei der Vorbereitung des TESLA-Programms stehen zwei Bestrebungen im Mittelpunkt der Software-Aktivitäten: zum einen geht es darum, eine modernen Standards entsprechende, auf Objekt-orientierten Technologien basierende Umgebung für die Simulation und Rekonstruktion der Physik-Ereignisse zu schaffen, die eine tragfähige Grundlage für die eigentliche Experimentierphase bildet. Zum anderen werden Werkzeuge zur detaillierten Detektorsimulation benötigt, um die bisher meist auf Parametrisierungen beruhenden Studien zum Physikpotential in kritischen Fällen zu prüfen bzw. zu erhärten, und um die Rekonstruktionsalgorithmen weiterzuentwickeln.

Diese Entwicklungslinien miteinander zu verbinden ist wichtig, um eine möglichst fehlerfreie Übertragung der bereits entwickelten Methoden zu gewährleisten. Ein wesentlicher Schritt dahin gelang kürzlich. Die von französischen Gruppen bereits im Objekt-orientierten

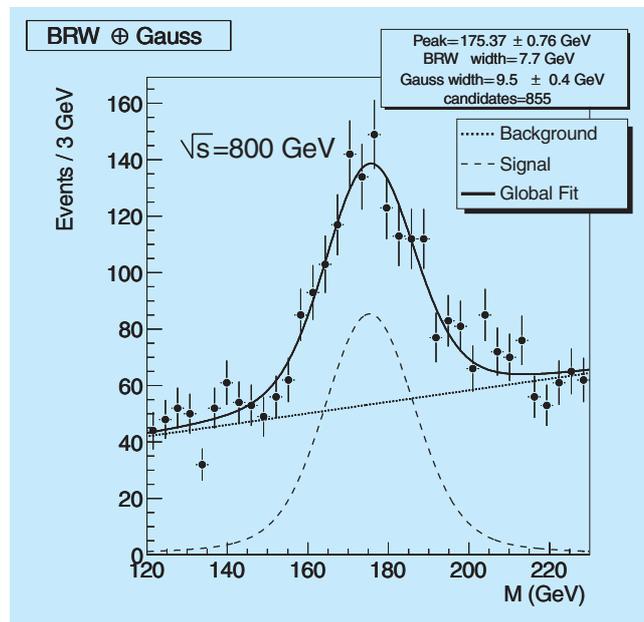


Abbildung 55: Invariante 3-Jet-Masse mit Top-Signal.

GEANT4-Rahmen entwickelte Simulations-Software wurde mit dem mit starker DESY-Beteiligung erstellten, FORTRAN-basierten Rekonstruktionsprogramm kombiniert. Damit steht die moderne Simulation verschiedener Detektorvarianten für vergleichende Physikstudien zur Verfügung. Diese Arbeiten werden in enger Kooperation zwischen den Gruppen FLC und IT ausgeführt.

Eine Physikstudie, bei der es auf die Qualität der Energy Flow-Analyse und damit auf detaillierte Detektorsimulation besonders ankommt, ist in Abbildung 55 gezeigt. Dargestellt ist die Messung der Top-Quark-Masse in $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$ Ereignissen, in denen beide Quarks in je drei Hadron-Jets zerfallen (siehe auch Abb. 49).

Die Top-Quark-Masse geht in viele Berechnungen im Standardmodell ein; ihre präzise Messung ist ein zentraler Punkt im TESLA-Programm und nur ein Beispiel, das die Bedeutung eines leistungsfähigen Detektors mit entsprechender Software unterstreicht.