

Abbildung 42: Perspektivische Ansicht des TESLA Detektors. Nicht gezeigt ist das Myon-System, das den Detektor komplett umschließt.

# Forschung an Lepton Collidern

Im Jahre 1999 sind am DESY die Arbeiten für die Vorbereitung des Linearbeschleuniger-Projektes TESLA weiter vorangetrieben worden. Daran beteiligt sind Mitglieder und Gäste der Gruppe FLC sowie im Rahmen der ECFA/DESY Studie etwa 66 Institute aus 17 Ländern. Seit dem Frühjahr 1998 veranstalten ECFA und DESY eine gemeinsame Studie, in der die teilchenphysikalischen Fragestellungen, die mit TESLA angegangen werden sollen, untersucht werden und nach Lösungen für einen Detektor an einer solchen Maschine gesucht wird. An dieser Studie nehmen zahlreiche Wissenschaftler aus vielen europäischen und außereuropäischen Ländern teil.

Ein Höhepunkt des Jahres war die internationale LCWS99 Konferenz, die in Sitges, Spanien, im Mai abgehalten wurde und einen Überblick über den Stand der Entwicklungen der verschiedenen Linearcollider Projekte in der Welt gab. In einer Serie von Treffen wurden physikalische und technische Fragestellungen bearbeitet.

Seit der Veröffentlichung des „Conceptual Design Report“ im Jahre 1997 hat es erhebliche Entwicklungen bei der Konzeption der Maschine gegeben. Die erwartete Luminosität ist deutlich höher als bisher angenommen. Eines der Hauptziele der ECFA/DESY Studie ist es, zu untersuchen, welche Möglichkeiten diese hohe Luminosität eröffnet. Ein weiterer Schwerpunkt der Studie ist es, ein realistisches Detektormodell für TESLA (Abb. 42) zu erstellen, das den hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit entspricht.

DESY hat im Berichtszeitraum im Bereich der Physik und der Detektorentwicklungen für einen zukünftigen Linearcollider intensiv an der Studie mitgearbeitet. Physikerinnen und Physiker beider DESY Labore und der am DESY existierenden Experimente nehmen aktiv an den Arbeiten teil.

## Physik am Linearbeschleuniger TESLA

Das Standard-Modell der Teilchenphysik ist eine außerordentlich erfolgreiche Theorie, die die Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen beschreibt. Viele Experimente haben in den letzten Jahren die Gültigkeit und die Grenzen dieser Theorie erforscht. Trotz aller Bemühungen fehlt aber nach wie vor ein ganz zentraler Teil der Theorie. Das Standard-Modell sagt ein weiteres Teilchen, das Higgs-Boson, voraus, dessen Existenz notwendig ist, um die beobachteten Massen der verschiedenen Teilchen zu erklären. Dieses Teilchen ist bisher experimentell nicht nachgewiesen worden. Darüber hinaus gibt es eine ganze Reihe von Argumenten, weshalb das Standard-Modell in seiner heutigen Form nicht die „endgültige“ Theorie der Elementarteilchen sein kann.

An einem Linearbeschleuniger wie TESLA werden alle bekannten Teilchen, wie zum Beispiel Eichbosonen und top-Quarks, in großer Zahl produziert. Die zumindest theoretisch weitgehend untergrundfreien Bedingungen an einer solchen Maschine ermöglichen viele verschiedene Untersuchungen an diesen Teilchen, mit denen neue und verbesserte Einsichten in das Standard-Modell gewonnen werden können. LEP und andere Beschleuniger haben in den letzten Jahren demonstriert, wie mächtig Präzisionsmessungen bekannter Prozesse und Teilchen sein können, wenn es darum geht, die Grenzen bekannter Theorien zu erkunden. Der Linearbeschleuniger wird in der Lage sein, diese Studien in einen neuen Bereich auszudehnen, und damit das Standard-Modell genauer als bisher möglich zu überprüfen. Vieles deutet darauf hin, dass in dem Energiebereich bis etwa 1 TeV, der mit TESLA zugänglich sein wird, viele offene Fragen des Standard-Modells beantwortet werden können, oder dass Abweichungen auftreten, die richtungweisend für ein tieferes Verständnis der elementaren Materie sein werden.

In diesem Jahrzehnt werden mit dem Tevatron II und dem LHC zwei Maschinen fertiggestellt werden, die erste Schritte in diese neuen Energiebereiche unternehmen werden. In vieler Hinsicht wird dies aber nicht ausreichen. Das grundlegende Verständnis der Physik hängt nicht nur von der Entdeckung neuer Teilchen ab, sondern ebenso davon, ihre Eigenschaften präzise zu bestimmen. Ein Elektron-Positron-Linearbeschleuniger, der aufgrund der sehr hohen Brillianz und des gut definierten Ausgangszustandes prädestiniert für Präzisionsmessungen ist, ist die logische Ergänzung der geplanten Maschinen.

Ein Schlüssel zum tieferen Verständnis des Standard-Modells ist das Higgs-Boson. Aus den bis heute bekannten Daten kann man ableiten, dass das Higgs-Boson eine Masse haben sollte, die in dem Bereich liegt, der von LEP II, dem Tevatron, oder spätestens dem LHC abgedeckt werden kann. Die Entdeckung kann aber nur der erste Schritt sein. Um seinen Platz in der Theorie der Elementarteilchen zu definieren, ist eine detaillierte Untersuchung der Eigenschaften dieses Teilchens notwendig. Die Masse, die Breite, und die verschiedenen Zerfälle des Higgs-Bosons müssen mit möglichst guter Genauigkeit vermessen werden. Nur so kann die Natur des Higgs-Bosons bestimmt werden, nur so kann entschieden werden, ob es ein oder mehrere Higgs-Bosonen gibt, und wie sie sich in die Theorie einordnen. Viele dieser Untersuchungen sind nur mit großen Schwierigkeiten oder gar nicht an Hadron-Maschinen durchzuführen. Ein Linearbeschleuniger wird hier sehr viel leisten können und helfen, die Theorie besser zu verstehen.

Trotz aller Erfolge des Standard-Modells sind aber viele Physiker davon überzeugt, dass dieses Modell nicht die endgültige Theorie sein kann. Dazu existieren zu viele Probleme in den verschiedensten Bereichen. Viele dieser Schwierigkeiten lassen sich in erweiterten Theorien lösen. Ein besonders attraktives Konzept ist das der Supersymmetrie. Allerdings fehlt bisher jegliche experimentelle Evidenz dafür, dass Supersymmetrie in der Natur verwirklicht ist. Es gibt aber viele Argumente dafür, dass Supersymmetrie – oder eine ähnliche Theorie – in der Natur realisiert ist. Supersymmetrie sagt ein reichhaltiges Spektrum an neuen Teilchen voraus. Unterschiede zwischen verschiedenen supersymmetrischen Theorien spiegeln sich in den Spektren dieser Teilchen wider. Sollte es Supersymmetrie geben, so ist es sehr

wichtig, möglichst viele dieser Teilchen möglichst genau zu vermessen. Nur so kann eine Entscheidung getroffen werden, welche der möglichen Theorien in der Natur realisiert ist. Die Fähigkeit eines Linearbeschleunigers, die Energie der Kollision stufenlos zu variieren und damit kontrolliert Teilchen verschiedener Masse zu erzeugen, kann sich als ein ganz entscheidendes Element herausstellen, Supersymmetrie experimentell zu untersuchen.

Natürlich kann es sein, dass keine der Vorstellungen, die wir heute haben, in der Natur verwirklicht ist. Vielleicht gibt es kein Higgs-Boson, 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 der bekannten Prozesse bei möglichst hohen Energien die einzige Möglichkeit sein, unsere Erkenntnisse über die fundamentalen Kräfte und Teilchen zu erweitern und zu entscheiden, welches der verschiedenen theoretischen Modelle stimmt.

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

## Physikalische Studien

Im Rahmen des ECFA/DESY Workshops werden viele Studien durchgeführt, um das Potential von TESLA zu untersuchen. In Hamburg werden die Arbeiten in enger Zusammenarbeit mit Gruppen der theoretischen Physik und auswärtigen Arbeitsgruppen, speziell Gruppen von der Universität Hamburg, durchgeführt. Hier sollen nur einige wenige ausgewählte Ergebnisse erwähnt werden.

In Abbildung 43 sind Ergebnisse von Studien zusammengefasst, in denen bei verschiedenen Beschleunigern die Kopplungen zwischen W und Z Bosonen untersucht wurden. Die genaue Kenntnis dieser Kopplungen erlaubt es, weitreichende Rückschlüsse über den Gültigkeitsbereich des Standard-Modells zu ziehen, und bietet damit ein Fenster für neue Physik, das sogar bis zu

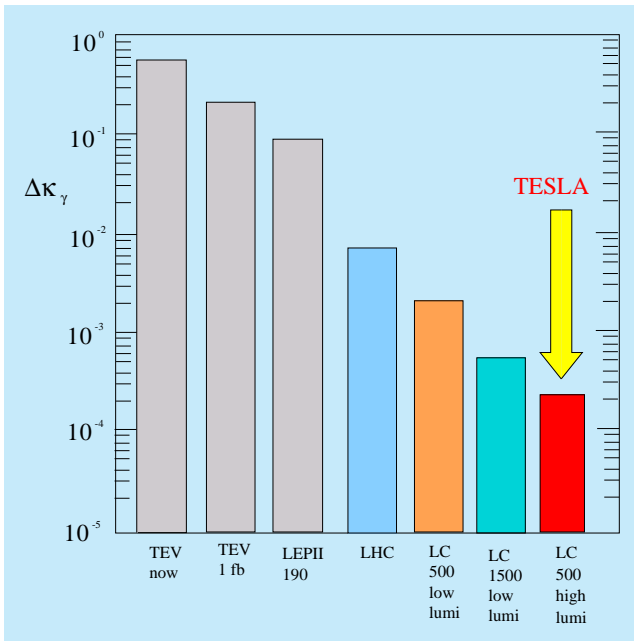


Abbildung 43: Vergleich der Genauigkeit, mit der W-Z Kopplungen an verschiedenen Beschleunigern gemessen werden können.

Energien oberhalb der Schwerpunktsenergie des Beschleunigers reicht. Aus der Abbildung ist der Vorteil eines Elektron-Positron-Linearbeschleunigers gegenüber anderen Maschinen klar ersichtlich.

An TESLA werden die bekannten Elementarteilchen allesamt in großer Zahl erzeugt. Damit können Präzisionsmessungen, zum Beispiel der Eigenschaften der W-Bosonen oder des top-Quark, durchgeführt werden, die in dieser Form an keiner anderen Maschine möglich sind. Dies wird unser Wissen über die Gültigkeit des Standard-Modells vertiefen.

Wie im vorigen Abschnitt ausgeführt, ist die Untersuchung des Higgs-Mechanismus eine der wesentlichen Messungen, die an TESLA durchgeführt werden soll. An TESLA ist es möglich, viele verschiedene Zerfallsmodi des Higgs-Bosons zu untersuchen. Dies ist in Abbildung 44 gezeigt, in der die Genauigkeit, mit der die Verzweigungsverhältnisse in verschiedene Endzustände bei TESLA gemessen werden können, gezeigt ist. Da die Zerfallswahrscheinlichkeit des Higgs-Bosons als proportional zur Masse der Zer-

fallsteilchen vorausgesagt wird, erlaubt diese Messung die detaillierte Prüfung der Vorhersagen.

Exotische Theorien sagen manchmal ganz besondere Signaturen beispielsweise für Zerfälle voraus und stellen damit eine sehr gute Möglichkeit dar, zu überprüfen, ob der vorgeschlagene Detektor den Anforderungen genügt. Ein Beispiel für eine solche Theorie ist die sogenannte GMSB-Theorie, die eine Alternative zum Higgs-Mechanismus des Standard-Modells vorschlägt. Eine der herausragenden Voraussagen dieses Modells ist, dass es hochenergetische Photonen geben muss, die nicht zum Ursprung der Reaktion, dem Wechselwirkungspunkt, zurückzeigen. Die Rekonstruktion dieser Photonen ist detailliert untersucht worden. In Abbildung 45 ist ein Ereignis im simulierten Detektor gezeigt, in dem zwei solcher Photonen aufgetreten und gefunden worden sind. Aus den Studien geht hervor, dass TESLA mit dem vorgeschlagenen Detektor auch solche exotischeren Theorien sehr gut überprüfen kann.

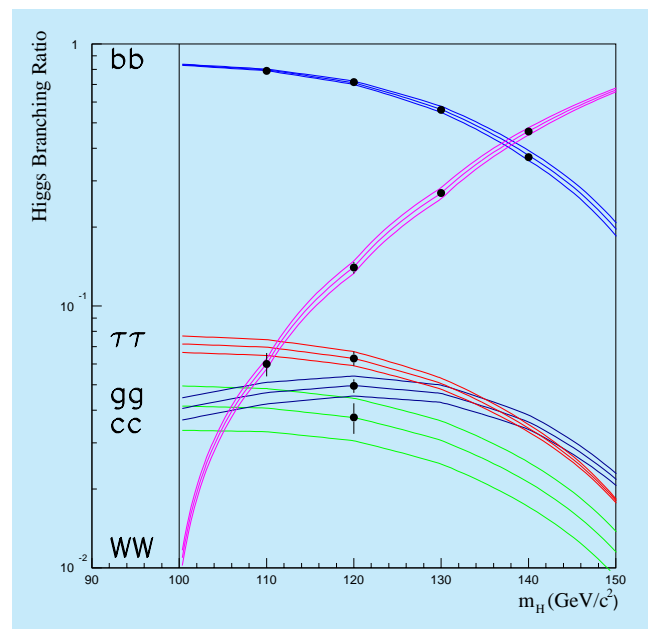


Abbildung 44: Verzweigungsverhältnisse des Higgs-Teilchens als Funktion seiner Masse. Die Kurven stellen Ergebnisse theoretischer Voraussagen dar, die Bänder geben die theoretischen Unsicherheiten wieder. Punkte mit Fehlerbalken sind Ergebnisse der simulierten Analyse am geplanten Detektor für TESLA.

Durch verhältnismäßig geringe Modifikationen kann TESLA bei einer Energie von etwa 91 GeV betrieben werden. Das erlaubt es, TESLA als eine „ $Z^0$ -Fabrik“ zu betreiben, in der innerhalb weniger Monate  $10^9$   $Z^0$ -Zerfälle aufgezeichnet werden können. Dies ist etwa hundertmal mehr als im gesamten Betrieb von LEP an einem der vier LEP-Experimente aufgezeichnet worden ist. Damit kann TESLA die Präzisionsmessungen von LEP nochmal deutlich verbessern und wesentliche Informationen über die Parameter des Standard-Modells liefern. Besonders interessant ist die Verbesserung der Genauigkeit, mit der die Kopplungsparameter der schwachen Wechselwirkung  $\mathcal{A}_e$  bzw.  $\mathcal{A}_b$  gemessen werden können. Hieraus kann der schwache Mischungswinkel  $\sin^2 \theta_W^{\text{eff}}$  mit einer Präzision von  $\pm 0.000013$  bestimmt werden, eine Größenordnung besser als bisher möglich. Diese Messungen liefern darüber hinaus interessante Informationen über die Konsistenz des Standard-Modells. Wenn ein Higgs-Teilchen existiert, und zum Zeitpunkt, wenn dies Experiment durchgeführt wird, gefunden worden ist, erlauben diese Messungen präzise Überprüfungen der Konsistenz des Standard-Modells.

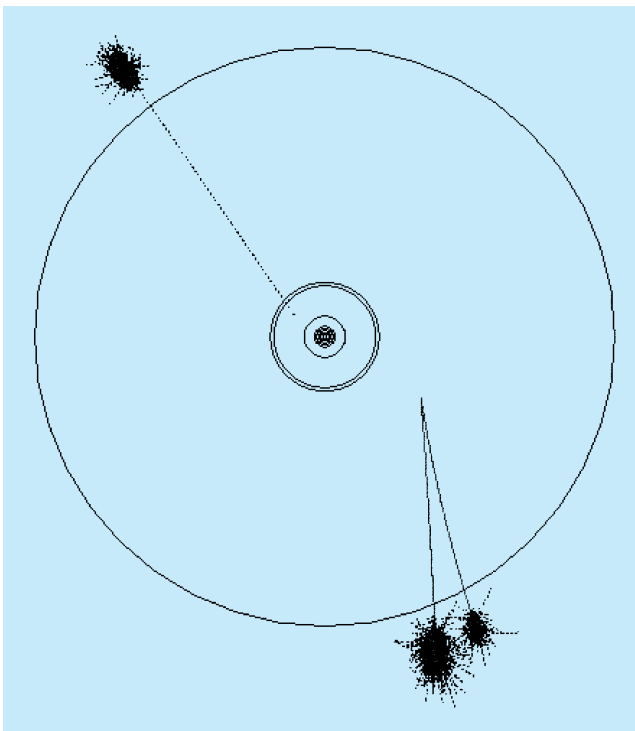


Abbildung 45: *Simuliertes Ereignis mit zwei Photonen, die nicht zum Wechselwirkungspunkt zurückzeigen.*

Physik an einem Linearbeschleuniger ist Präzisionsphysik. Die bisherigen Studien, die im Rahmen der ECFA/DESY Studie durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass ein Linearbeschleuniger durch seine Fähigkeit, Messungen mit hoher Präzision zu ermöglichen, erheblich dazu beitragen wird, den Energiebereich bis hin zu etwa 1 TeV zu verstehen.

## Detektorstudien

Einer der Aufträge, die der ECFA/DESY Studie auf den Weg gegeben wurden, ist es, einen Detektor für TESLA zu konzipieren. Dieser Detektor muss in der Lage sein, in der Umgebung, die durch die Maschinenparameter definiert ist, zu operieren und Messungen mit sehr hoher Präzision zu ermöglichen.

Im folgenden Abschnitt wird auf einige Themen, die in den letzten Monaten am DESY bearbeitet worden sind, näher eingegangen.

Zum ersten Mal wird bei TESLA Untergrund eine signifikante Rolle spielen, der durch die gegenseitige Wechselwirkung der beiden Strahlen hervorgerufen wird. Dieser Untergrund erzeugt eine sehr große Anzahl relativ niederenergetischer Photonen und Elektron-Positron Paare, die ein erhebliches Problem darstellen können. Durch geeignete Optimierung des Detektors in unmittelbarer Nähe des Strahlrohres konnte eine Konfiguration gefunden werden, die einerseits die Zahl der Untergrundteilchen, die in den Hauptteil des Detektors eindringen, auf ein erträgliches Maß reduziert, die aber andererseits eine Instrumentierung bis sehr dicht an das Strahlrohr heran ermöglicht. Dieser letzte Punkt ist speziell wichtig, weil dadurch der Bau eines Detektors mit sehr großer Akzeptanz möglich ist.

Die physikalischen Fragestellungen, die mit dem Detektor angegangen werden sollen, erfordern, dass geladene und neutrale Teilchen sehr genau vermessen werden können. Die gesamte Energie, die in einer Reaktion frei wird, muss exakt rekonstruiert werden können. Das bedeutet, dass der Detektor eine sehr feine Granularität haben muss, so dass einzelne Teilchen individuell rekonstruiert und verfolgt werden können.

Das Detektorkonzept sieht vor, dass ein System von Detektoren zur Vermessung geladener Spuren durch ein

Kalorimeter mit extrem guter Ortsauflösung ergänzt wird. Sowohl das Kalorimeter als auch die Spurkammersysteme befinden sich in einem solenoiden magnetischen Feld, das eine Stärke von 3–4 T haben wird.

Der Zentraldetektor ist eine große gasgefüllte TPC („Time Projection Chamber“), ergänzt von einem Vertexdetektor (VTX), der unmittelbar in der Umgebung der Wechselwirkungszone Messungen mit hoher Genauigkeit durchführen kann, sowie einem System von Silizium-Detektoren (SIT), die zwischen dem Vertexdetektor und der TPC angeordnet sind. Als ein Beispiel ist in Abbildung 46 die Impulsauflösung gezeigt, die im Detektor erreicht wird. Ebenfalls gezeigt ist die Zielvorgabe, die im Wesentlichen durch die benötigte Massenauflösung in der Rekonstruktion von Z-Bosonen gegeben ist. Deutlich ist, dass erst die Kombination verschiedener Detektorelemente, wie in der Zeichnung angedeutet, eine ausreichende Präzision ermöglicht.

Bereits im Abschnitt über die physikalischen Studien wurden in Abbildung 44 die Verzweigungsverhältnisse für die verschiedenen Zerfallsarten des Higgs-Bosons gezeigt. Die Rekonstruktion der Zerfallsprodukte hängt wesentlich von der hervorragenden Auflösung des Vertexdetektors ab, der es erlaubt, Teilchen mit Lebensdauern unter 1 ps gut nachzuweisen.

Verschiedene Entwürfe eines Kalorimeters sind im Rahmen der Studie diskutiert worden. Allen ist gemeinsam, dass der größte Teil des Gerätes innerhalb der Spule angeordnet ist, um eine möglichst gute Energieauflösung zu erreichen. Für den elektromagnetischen Teil ist ein Kalorimeter aus Wolfram Absorbern mit Silizium-Detektor Auslese vorgesehen. Diese Technologie bietet ein Optimum an Segmentierung sowohl transversal als auch longitudinal zur Teilchenrichtung. Gleichzeitig kann die Auslese so kompakt gehalten werden, dass kaum Löcher in der Akzeptanz des Kalorimeters entstehen. Das Kalorimeter soll etwa 30 Strahlungslängen im elektromagnetischen Teil haben, oder in etwa eine hadronische Wechselwirkungslänge.

Hinter dem elektromagnetischen Kalorimeter, aber noch innerhalb der Spule, ist ein hadronisches Kalorimeter vorgesehen. Hier ist geplant, die deponierte Energie mit Szintillationszählern zu messen, die mit Hilfe von klaren Fasern ausgelesen werden.

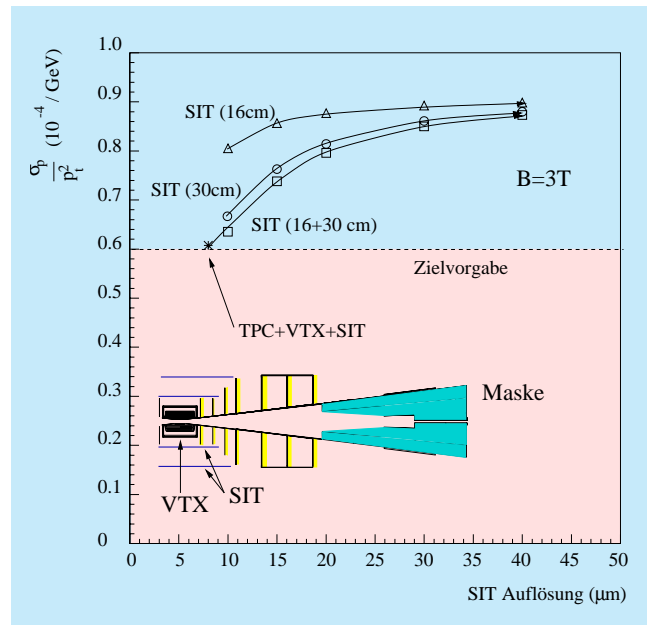


Abbildung 46: Impulsauflösung für verschiedene Zentraldetektorsysteme (siehe Legende) als Funktion der Auflösung des SIT Detektors.

Außerhalb der Spule befindet sich im Wesentlichen das Eisen, welches den magnetischen Fluss der Spule zurückführt. Es ist mit einem einfachen System von Kammern instrumentiert und dient als Kalorimeter und als Myon-Nachweissystem.

Ein wesentlicher Vorteil eines Elektron-Positron-Beschleunigers, verglichen mit einem Hadron-Beschleuniger, ist es, dass die Ereignisse relativ sauber sind und dass es kaum Ereignisse gibt, die nicht interessant sind. Dies wird im Entwurf des Trigger-Systems für den Detektor berücksichtigt. Überspitzt formuliert, soll auf einen Trigger im klassischen Sinne verzichtet werden und jedes Ereignis zunächst aufgezeichnet werden. Die Entscheidung, welche der Ereignisse letztendlich in der Physik-Analyse verwendet werden, wird erst in einer Rechnerfarm getroffen, in der bereits die vollständige Rekonstruktion der Ereignisse zur Verfügung steht.

Dieses Konzept hat eine Reihe bestechender Vorteile. Es erlaubt es, das Experiment totzeitfrei zu betreiben. Damit kann die gesamte Luminosität, die von der Maschine geliefert wird, ausgenutzt werden. Es erlaubt einen außerordentlich flexiblen Betrieb, in dem schnell auf unerwartete Ereignisse reagiert werden kann, ohne

dass größere Modifikationen der Hardware notwendig sind. Ein solches System ist auch relativ einfach skalierbar, sollte die Luminosität der Maschine größer sein als ursprünglich angenommen.

Abschätzungen haben ergeben, dass ein solches System zwar eine Herausforderung für die heutige Technologie darstellt, aber durchaus realisierbar ist. Sowohl erwartete Datenmenge als auch Rechneranforderungen sind ähnlich dem, was heute von bereits genehmigten Experimenten wie HERA-B oder am LHC geplant ist.

Am DESY und an anderen an der Studie beteiligten Instituten haben erste Untersuchungen begonnen, um die

technische Machbarkeit verschiedener Detektorkomponenten zu untersuchen. In Hamburg wird im Moment eine Test-TPC gebaut und betrieben, mit der eine neuartige Auslesetechnologie überprüft wird, die es ermöglichen soll, eine TPC im Dauerbetrieb zu betreiben. Bisher war es notwendig, solche Detektoren regelmäßig „auszutakten“, um eine Akkumulation zu großer Ladungsmengen im Detektorvolumen zu verhindern. Diese Studien sollen helfen, herauszufinden, wo noch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig sind, um einen realistischen Detektor vorschlagen zu können, der den hohen Anforderungen genügt.