

Physik des Top Quarks

Jan Steggemann

RWTH Aachen

Ausarbeitung Seminar SS 2005

Aktuelle Forschungsergebnisse aus Elementarteilchen-
und Astroteilchenphysik

Betreuer: Dr. Oliver Pooth

Juni 2005

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Das Top Quark	3
1.2	Vorgehensweise und Erzeugung des Top Quarks an Collidern . . .	3
2	Entdeckung (Tevatron)	4
2.1	Erzeugung von Top-Antitop-Paaren	4
2.2	Zerfall der Top Quarks	4
2.3	Nachweis entstehender Teilchen	5
2.4	Ereignisauswahl	6
2.5	Entdeckung des Top Quarks	7
3	Bestimmung der Masse und anderer Eigenschaften (Tevatron)	7
3.1	Kinematik & Zerfallskanäle	7
3.2	Komplikationen	8
3.3	Ergebnisse für die Masse des Top Quarks	9
3.4	Andere Eigenschaften	10
4	Top-Physik am LHC	12
4.1	Überblick	12
4.2	Verbesserungen und Erwartungen	12
4.3	Spinkorrelation	13
5	Erzeugung einzelner Top Quarks	13
6	Top Quark & neue Physik	14
7	Ausblick	15

1 Einleitung

1.1 Das Top Quark

Das Top Quark ist im Standardmodell der Elementarteilchenphysik der Isospin $+1/2$ -Partner des Bottom Quarks. Zusammen mit ihren Antiquarks bilden sie die dritte Generation der Quarkfamilien. Die für die aktuelle Physik wichtigste Eigenschaft ist die hohe Masse des Top Quarks, $170 - 180 \text{ GeV}/c^2$, das damit als schwerstes Elementarteilchen ungefähr so schwer wie ein Goldatom ist, und 35 mal schwerer als das Bottom Quark, das nächstschwerste Elementarteilchen. Es ist, als Konstituent der Materie, ein Fermion (Spin $\frac{1}{2}$), und trägt eine Ladung von $\frac{2}{3}e$. Seine Lebensdauer ist mit $4 \times 10^{-25} \text{ s}$ extrem kurz.

1.2 Vorgehensweise und Erzeugung des Top Quarks an Collidern

Das Top Quark wurde 1995 am Tevatron entdeckt (Abschnitt 2). Im weiteren Verlauf von Run I und im derzeitigen Run II werden die Masse bestimmt (Abschnitt 3) und weitere Eigenschaften untersucht. Weitere Untersuchungen und Verbesserungen der Ergebnisse werden am LHC stattfinden (Abschnitt 4). Zusätzlich zur Untersuchung der Top-Antitop-Paar-Erzeugung, die Grundlage für die Abschnitte 2-4 ist, gibt es noch den Prozess der Erzeugung einzelner Top Quarks (Abschnitt 5). Auf die möglichen Zusammenhänge zwischen der Physik des Top Quarks und eventueller neuer Physik wird im nächsten Teil (Abschnitt 6) hingewiesen, hier spielt besonders der LHC eine große Rolle. Zuletzt (Abschnitt 7) wird ein Ausblick gegeben; ein linearer Elektron-Positron-Collider (im Gespräch: ILC, s. Tabelle 1) wäre ideal für Präzisionsmessungen der Eigenschaften des Top Quarks.

In Tabelle 1 sind die Laufzeiten, Schwerpunktsenergien, Luminositäten, gesamte Wirkungsquerschnitte sowie die Wirkungsquerschnitte für die Top-Antitop-Paar-Erzeugung und die Einzel-Top-Erzeugung angegeben.

Collider	Tevatron Run I	Tevatron Run II	LHC	LC
Typ	$p\bar{p}$	$p\bar{p}$	pp	e^+e^-
Laufzeit	1992-1996	2001-2008 (?)	2007-?	2015(?) - ?
E_{CM} (TeV)	1.80	1.96	14.0	$< 2m_t - \sim 1.0$
L ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	1×10^{31}	1×10^{32}	$10^{33} - 10^{34}$	2×10^{34}
σ_{total} (pb)	$\sim 10^{11}$	$\sim 10^{11}$	$\sim 10^{11}$	O(10)
σ_{tt} (pb)	~ 5	~ 7	~ 825	~ 0.8
$\sigma_{singletop}$ (pb)	~ 1.08	~ 1.50	~ 315	~ 0

Abbildung 1: ÜBERBLICK: ERZEUGUNG DES TOP QUARKS AN COLLIDERN (VGL. [4]).

2 Entdeckung (Tevatron)

Das Tevatron ist ein Proton-Antiproton-Collider am Fermilab in der Nähe von Chicago. Es gibt zwei Detektoren, CDF und DØ, die zur Messung der bei einer Kollision erzeugten Teilchen geeignet sind.

Für den zweiten Lauf, der seit 2001 im Gange ist, wurden mehrere Verbesserungen gemacht. Es wurde ein Antiproton-Recycler ergänzt, sodass Antiprotonen, die nicht in den Detektoren gestreut worden sind, wieder eingeführt werden können - dies ist insbesondere wichtig, da die Luminosität am Tevatron vor allem durch die im Vergleich zur Protonenzahl wesentlich geringere Antiprotonenzahl beschränkt ist. Zusätzlich wurden Verbesserungen an den Detektoren, und Verbesserungen an einzelnen anderen Komponenten vorgenommen, sodass die Schwerpunktsenergie von 1.80 TeV auf 1.96 TeV erhöht werden konnte.

2.1 Erzeugung von Top-Antitop-Paaren

Da das Tevatron ein Proton-Antiproton-Collider ist, und Protonen eine innere Struktur haben (Quarks und (virtuelle) Gluonen), tragen nur Teile der Protonen zur Erzeugung von Top Quarks bei. So gibt es zwei Prozesse zur Erzeugung von Paaren von Top Quarks und Antitop Quarks:

- Vernichtung eines Quark-Antiquark-Paars
- Fusion zweier Gluonen

Die entsprechenden Feynmandiagramme finden sich in Abbildung 2. Die Prozesse tragen wie folgt bei:

- Quark-Antiquark-Vernichtung: Run I 90%, Run II 85%
- Gluonfusion: Run I 10%, Run II 15%

Das bedeutet, dass mit zunehmender Schwerpunktsenergie die Gluonfusion mehr beiträgt (vgl. auch LHC), bei beiden Läufen am Tevatron dominiert jedoch die Quark-Antiquark-Vernichtung.

2.2 Zerfall der Top Quarks

Das Top Quark zerfällt fast exklusiv in ein W-Boson und ein Bottom Quark ($t \rightarrow W^+b, \bar{t} \rightarrow W^-\bar{b}$). Letzteres hadronisiert und ist dann als Jet im Detektor feststellbar. Das W-Boson zerfällt weiter: mit 2/3 Wahrscheinlichkeit in ein Quark und ein Antiquark, mit 1/3 Wahrscheinlichkeit in ein Lepton und ein Neutrino (mit jeweils gleicher Wahrscheinlichkeit für die drei Leptonarten). Dementsprechend gibt es, je nach Zerfallsart der beiden W-Bosonen, drei Zerfallskanäle:

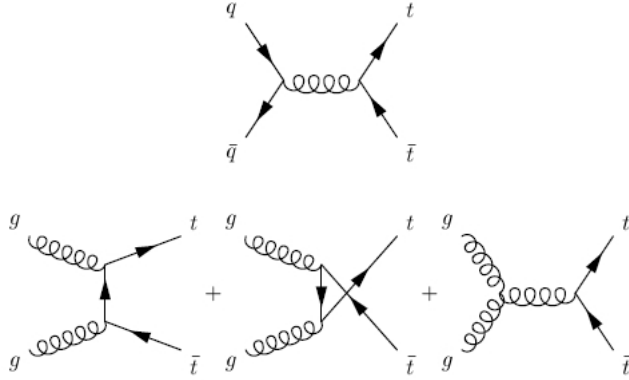


Abbildung 2: ERZEUGUNG VON TOP-ANTITOP-PAAREN.

- $t\bar{t} \rightarrow W^+bW^-\bar{b} \rightarrow q'\bar{q}b q''\bar{q}''\bar{b}$ (voll-hadronisch, 44%)
- $t\bar{t} \rightarrow W^+bW^-\bar{b} \rightarrow q'\bar{q}b \bar{\nu}b\bar{b}$ oder $\bar{\nu}b q'\bar{q}b$ (semileptonisch, 30%)
- $t\bar{t} \rightarrow W^+bW^-\bar{b} \rightarrow \bar{\nu}b \bar{\nu}b\bar{b}$ (dileptonisch, 5%)

In den Angaben zu den Anteilen der Zerfallskanäle fehlen die Kanäle, in denen ein auftretendes Lepton (oder beide) ein Tau-Lepton ist, da diese Kanäle in der Analyse wegen des schwierigen Nachweises der Tau-Leptonen i. A. nicht betrachtet werden.

2.3 Nachweis entstehender Teilchen

Die entstehenden Teilchen bzw., im Fall von Quarks, deren Zerfallsprodukte (als Jets), werden in den beiden Detektoren nachgewiesen, CDF und DØ. Die Spuren der geladenen Teilchen werden in der Spurkammer aufgezeichnet, Elektronen/Positronen und Photonen im elektromagnetischen Kalorimeter nachgewiesen, die Teile der Jets im Hadron-Kalorimeter und zuletzt die Myonen in den Myonenkammern. Neutrinos bleiben wegen ihrer geringen elektroschwachen Wechselwirkung unbeobachtet; der transversale Gesamtimpuls aller Neutrinos kann nur indirekt über den fehlenden transversalen Impuls (Impulserhaltung) festgestellt werden. Der Impuls in Flugrichtung der Protonen/Antiprotonen kann nicht festgestellt werden, da aufgrund der Quark- und Gluonstruktur der Protonen/Antiprotonen der Impuls der Top-Antitop-Reaktion in Flugrichtung nicht bekannt ist.

Zur Nachweiseffizienz der einzelnen Teilchen [4]: Jets von Gluonen und leichteren Quarks sind mit nahezu 100% Effizienz nachweisbar, Elektronen und Myonen mit ungefähr 90%. Tauonen zerfallen entweder leptonisch (36% der Fälle) oder hadronisch (64%). Wegen der beiden entstehenden Neutrinos ist der erste Fall kaum nachweisbar, letzterer auch nur mit 50% Effizienz und dabei, u. a.

wegen des entstehenden Neutrinos, nur schwer vom Untergrund unterscheidbar; insgesamt lässt man wegen dieser Schwierigkeiten im Allgemeinen (s. o.) Kanäle mit Tau-Leptonen aus der Betrachtung heraus.

Am wichtigsten ist der Nachweise der Bottom Quarks, da sie sehr charakteristisch für Top-Ereignisse sind. Bottom Quarks hadronisieren fast sofort in B-Mesonen, die im Mittel ungefähr 0.5 mm vom Haupt-Vertex entfernt in einen Jet zerfallen. Die Bestandteile des Jets sind dann auf den gemeinsamen, im Vergleich zum Haupt-Vertex versetzten Ursprung zurückzuführen. Man nennt dies *Bottom-Markierung* / *B-Markierung* oder *b-tagging*.

Alternativ zerfallen Bottom Quarks (20% der Fälle) in unter anderem ein Lepton, das einen niedrigeren Impuls als das Lepton aus dem Zerfall des W-Bosons hat. Zusammen beträgt die Nachweis-Effizienz für Bottom Quarks ungefähr 60%.

2.4 Ereignisauswahl

Im Folgenden werden die Kriterien beschrieben, nach denen die Ereignisse ausgewählt werden, die auf die Entstehung eines Top-Antitop-Paares hindeuten.

Zunächst ist ein hoher transversaler Impuls der Zerfallsprodukte ($p_T > 15 - 20$ GeV) typisch für Top-Antitop-Ereignisse, vor allem da das Top Quark wegen seiner großen Masse relativ langsam ist ($\beta \ll 1$). Dies führt dazu, dass die Teilchen häufig in die zentraleren Teile des Detektors gehen, ein hoher transversaler Impuls ist das erste Kriterium für ein Top-Antitop-Ereignis.

Dann wird die B-Markierung eines der Bottom Quarks oder der beiden Bottom Quarks gefordert. Je nach Zerfallskanal wird eine entsprechende Anzahl hochenergetischer Jets gefordert. Hinzu kommen andere topologische Effekte.

Je nach Strenge der angelegten Kriterien (z. B. Markierung eines B-Quarks oder beider) verbleiben verschieden viele der vorhergesagten $t\bar{t}$ -Ereignisse, und verändert sich das Verhältnis von Signal zu Untergrund für die ausgewählten Ereignisse. Für die einzelnen Kanäle ergibt sich dann folgendes Bild (in aufsteigender Qualität) [4]:

- vollhadronisch: es verbleiben ungefähr 5% der $t\bar{t}$ -Ereignisse bei einem Signal:Untergrund-Verhältnis von 1:5-1:1
- semileptonisch: ungefähr 1% der $t\bar{t}$ -Ereignisse bleiben, Verhältnis Signal:Untergrund zwischen 1:1 und 4:1
- dileptonisch: es verbleiben wieder ungefähr 1% der Ereignisse; das Signal:Untergrund-Verhältnis ist 1:2 ohne Forderung von B-Markierung, und wird groß mit Forderung von B-Markierung

Im vollhadronischen Kanal tragen zum Untergrund hauptsächlich falsche Zuordnung von Jets und falsche Markierung von Jets als Jets aus B-Zerfällen bei. Insgesamt liefert dieser Kanal die schlechtesten Ergebnisse. Beim semileptonischen Kanal sind der Haupt-Untergrund Ereignisse mit W-Bosonen und Jets, beim dileptonischen Kanal gibt es keinen offensichtlich wichtigsten Beitrag zum

Untergrund, da dieser wesentlich kleiner ist - allerdings leidet dieser Kanal unter der geringsten Ereigniszahl.

2.5 Entdeckung des Top Quarks

1994 veröffentlichte die Kollaboration des CDF-Detektors [1], dass sie einen Hinweis (bzw. Evidenz) auf Top Quarks gefunden haben. Dabei beziehen sie sich auf 12 Ereignisse, wobei die Wahrscheinlichkeit, dass diese Ereignisse nur Untergrund sind, 0.26% ist - d. h. umgekehrt, dass diese Ereignisse mit einer Wahrscheinlichkeit von 99.24% von $t\bar{t}$ -Ereignissen herrühren, also im Rahmen von mehr als drei Standardabweichungen ($> 3\sigma$).

Für eine offizielle Entdeckung ist eine Bestätigung innerhalb von mehr als fünf Standardabweichungen nötig ($> 5\sigma$). 1995 wurde diese Entdeckung dann von beiden Kollaborationen, CDF [2] und DØ [3], zusammen bekanntgegeben. DØ vermeldete dabei 17 Ereignisse vor einem Untergrund von 3.8 ± 0.6 Ereignissen, eine Bestätigung innerhalb von 4.6σ . CDF veröffentlichte eine Zahl von 37 Ereignissen, darunter 27 mit B-Markierung ("SVX", Secondary Vertex Tagging) vor einem Untergrund von 6.7 ± 2.1 Ereignissen; 23 mit einem Lepton mit niedrigerer Energie (s. o.; "SLT", Soft Lepton Tagging), Untergrund 15.4 ± 2.0 ; und zudem 6 Ereignisse im dileptonischen Kanal, Untergrund 1.3 ± 0.3 . Das CDF-Ergebnis liefert eine Bestätigung innerhalb von 4.8σ . Zusammen bestätigte dies die Existenz des Top Quarks mit einer Gewissheit von 5σ . Zusätzliche Evidenz wird durch einen Peak bei der Massenbestimmung geliefert.

3 Bestimmung der Masse und anderer Eigenschaften (Tevatron)

Da die Lebensdauer des Top Quarks mit 4×10^{-25} s sehr klein ist, zerfällt es im Gegensatz zu den fünf anderen Quarks, bevor es hadronisiert. Daher kann die Masse des Top Quarks (als einzige Quarkmasse) direkt aus der Kinematik rekonstruiert werden, da der Zerfall wegen der kurzen Lebensdauer als der eines freien Teilchens angenommen werden kann. Die Masse des Top Quarks ist die relativ genauest bekannte aller Quarkmassen.

3.1 Kinematik & Zerfallskanäle

Zur Rekonstruktion der Kinematik benötigt man die Viererimpulse der sechs Zerfallsprodukte, das sind zusammen **24** Komponenten. **9** Einschränkungen kommen von den Teilchenmassen, davon **6** von den Zerfallsprodukten (deren Massen gleich Null gesetzt werden können), **2** von den Massen der intermediären W-Bosonen und **1** Einschränkung daher, dass die Top-Masse gleich der Antitop-Masse ist. Zusätzlich kann angenommen werden, dass der transversale Gesamtimpuls gleich Null ist, da er sehr klein ist. Dies gibt **2** zusätzliche Einschränkungen, insgesamt also **11**.

Gemessen werden können die Dreierimpulse der sechs Zerfallsprodukte, die keine Neutrinos sind (da die Neutrinos unentdeckt bleiben). Wenn n die Zahl der Zerfallsprodukte ist, die keine Neutrinos sind, muss damit $3n + 11 - 24 > 0$ gelten, um die Kinematik rekonstruieren zu können. Für den voll-hadronischen Kanal mit $n = 6$ und für den semileptonischen Kanal mit $n = 5$ ist jeweils die Bedingung erfüllt; für den dileptonischen Kanal ($n = 4$) ist die Bedingung jedoch nicht erfüllt, das heißt, die Top-Masse kann nicht aus der Kinematik rekonstruiert werden.

Im Folgenden wird für die einzelnen Zerfallskanäle beschrieben, wie die Bestimmung aussieht und wo die spezifischen Probleme liegen:

Voll-hadronischer Kanal: Alle sechs Zerfallsprodukte sind Hadronen und werden somit als Jets gemessen. Die sechs höchstenergetischen Jets müssen den einzelnen Quarks zugeordnet werden, dies ist im Allgemeinen sehr schwierig. Zusätzlich führt der große QCD-Multijet-Untergrund zu großen Ungenauigkeiten. Die Zuordnung geschieht über Wahrscheinlichkeitsfits, wodurch dann indirekt ein wahrscheinlichster Wert für die Top-Masse bestimmt werden kann. Insgesamt ist dieser Kanal allerdings mit großen Fehlern behaftet.

Semileptonischer Kanal: Es müssen nur noch vier Jets per Wahrscheinlichkeitsfit zugeordnet werden, wobei man sich zunutze machen kann, dass die Zuordnung bei bestimmten Verteilungsgeometrien einfacher ist. Zusätzlich kann man sich auf Fälle mit vier (sehr) hochenergetischen Jets beschränken. Insgesamt ist das Signal hier klarer, für die Wahrscheinlichkeitsfits werden verschiedene Strategien benutzt (z. B. multidimensionale Fits).

Dileptonischer Kanal: Da hier die Bestimmung der Top-Masse nicht über die Kinematik geschehen kann, müssen alternative Methoden benutzt werden. Hierbei gibt es zwei Klassen von Methoden: Die erste stellt eine Hypothese für die Top-Masse an den Anfang und berechnet dann die Wahrscheinlichkeit, dass die beobachtete Kinematik von einem entsprechenden Ereignis (d. h. einem Ereignis mit dieser Masse des Top Quarks) kommt. Die zweite arbeitet damit, dass die Energien der beiden Bottom Quarks im Ruhesystem der Top Quarks festgelegt sind.

3.2 Komplikationen

Es gibt bei der Messung neben den kombinatorischen Problemen noch viele andere Gründe für Fehler.

Mehrere davon haben direkt mit den Detektoren zu tun: Es gibt unweigerlich Lücken, Modulgrenzen und andere Eigenschaften der Detektorgeometrie, die beachtet werden müssen und deren Ausmaß auf die Messungen, auch durch Vergleichsmessungen, bestimmt werden muss. Am wichtigsten sind die Fehler in der Kalorimeterskala: Die Ungenauigkeiten in der absoluten Energieskala sind relativ groß, weshalb die Jet-Energien ungenau bestimmt werden. Z. B. kann aber auch ein Jet durch das Strahlrohr verloren gehen.

Dann gibt es Probleme, die eher mit dem Prozess als solchen zu tun haben: Die Reste des Protons und des Antiprotons bilden einen recht großen Untergrund, und sie können auch Einfluss auf die Messungen beim Hauptereignis

führen. So können zwei Jets als einer gemessen werden (der zweite beispielsweise resultierend aus Untergrundprozessen); aber auch der umgekehrte Fall, dass sich ein Jet in zwei Jets aufspaltet, kann auftreten.

Die Effekte zusammen können in außergewöhnlichen Gesamtereignissen resultieren, in jedem Fall müssen sie als Fehlerquellen beachtet werden.

3.3 Ergebnisse für die Masse des Top Quarks

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse des ersten Runs des Tevatron dargestellt. Hierbei sind statistische und systematische Fehler schon kombiniert. Die Ergebnisse resultieren aus einer verbesserten Analyse der Daten des ersten Laufs ([8], durch die Re-Analyse verschob sich der Mittelwert für die Masse des Top Quarks etwas nach oben). Für die Kombination der systematischen Fehler auf die Ergebnisse, die die Auswertung der Messdaten der beiden Detektoren ergeben, gibt es eine spezielle Gruppe am Fermilab (vgl. z. B. [7]).

Den größten Anteil des Gesamtfehlers macht im semileptonischen Kanal der Fehler auf die Jet-Energie-Skala aus (~ 4 GeV), in den beiden anderen Kanälen dominiert der statistische Fehler. Da der semileptonische Kanal die besten Werte liefert, ist der Fehler auf die Jet-Energie-Skala somit für das kombinierte Ergebnis der größte Fehler. Für Run II wurde deshalb versucht, speziell hier zu Verbesserungen zu kommen. Das kombinierte Ergebnis aus Run I ist $m_t = 178.0 \pm 4.3$ GeV/c².

Zum Vergleich: Eine indirekte Bestimmung der Masse des Top Quarks erfolgte am LEP aus Strahlungskorrekturen, es ergab sich für die Masse: $m_t = 177 \pm 22$ GeV/c².

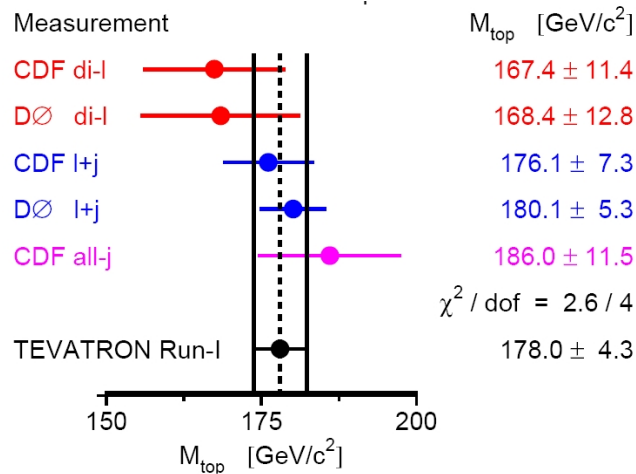


Abbildung 3: TOP-MASS - ERGEBNISSE RUN I [7].

In Abbildung 4 sind vorläufige (!) Ergebnisse des zweiten Runs dargestellt, wobei die erste Fehlerangabe für den statistischen, die zweite für den systematischen Fehler steht. Besonders fällt der vorletzte Wert auf, am CDF im semi-leptonischen Kanal, der die bisher beste Einzelmessung ist ($m_t = 173.5 \pm 4.1$ GeV/ c^2) und dessen Fehler sogar geringer sind als die des kombinierten Gesamtergebnisses für die Top-Masse aus Run I.

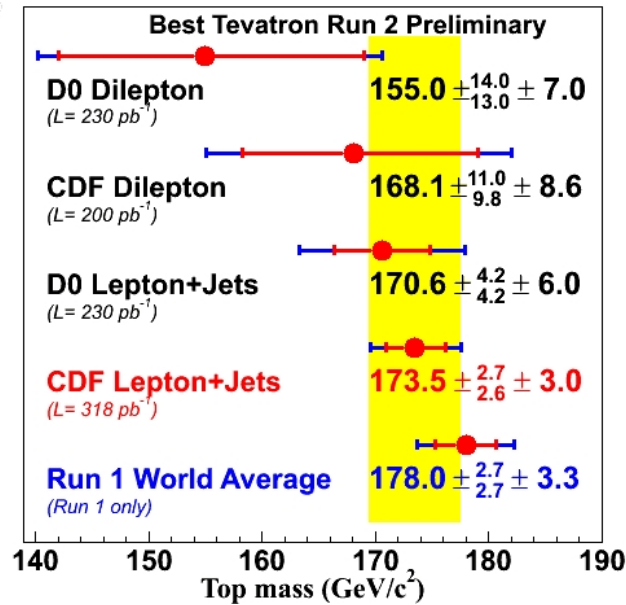


Abbildung 4: TOP-MASS - VORLÄUFIGE ERGEBNISSE RUN II [10].

Abbildung 5 zeigt die Einschränkungen der Higgs-Masse, die sich unter anderem aus der neuen Top-Massen-Bestimmung ergeben. Es gibt Korrekturen zur Masse der W-Bosonen, die proportional zum Quadrat der Top-Masse und proportional zum Logarithmus des Higgs-Bosons sind. Higgs-Massen bis 113 GeV/ c^2 (in der Abbildung links des grünen Bandes) sind durch direkte Suchen bereits ausgeschlossen. Mit den Daten von Run I lag der wahrscheinlichste Wert für die Higgs-Masse bei 117 GeV/ c^2 , mit den vorläufigen Daten aus Run II verschiebt er sich nach unten, die Abhängigkeit ist exponentiell und daher recht empfindlich auf Änderungen der Top-Masse. Durch die exponentielle Abhängigkeit sind allerdings die Fehler auch recht groß, sodass mit den Run I-Daten die obere Grenze für die Higgs-Masse (95% Wahrscheinlichkeitslevel) bei 251 GeV/ c^2 liegt.

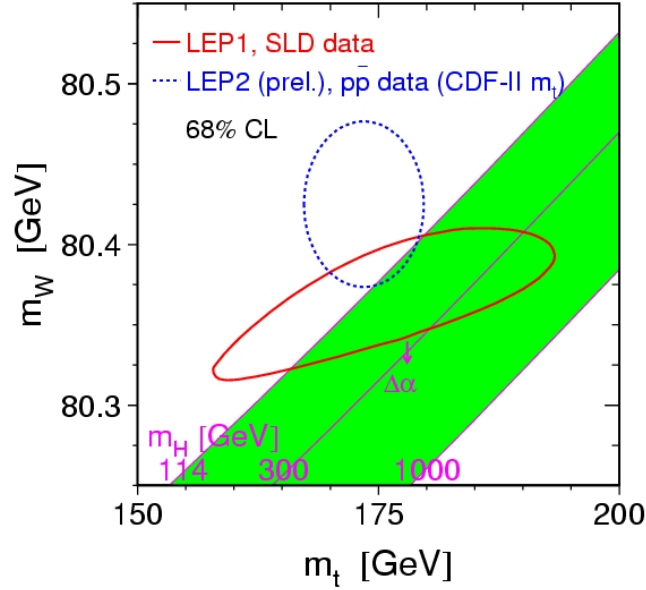


Abbildung 5: EINSCHRÄNKUNG DER HIGGS-MASSE MIT DEN VORLÄUFIGEN DATEN VON RUN II [10].

3.4 Andere Eigenschaften

Die sehr kurze Lebensdauer, und die damit zusammenhängende große Zerfallsbreite, können am Tevatron nicht bestimmt werden. Allerdings erlaubt die kurze Lebensdauer eine Untersuchung des Spins mithilfe der Spinkorrelation (dazu mehr in einem eigenen Abschnitt). Falls der Spin nicht $1/2$ sein sollte, müsste es allerdings noch ein unbeobachtetes Zerfallsprodukt geben.

Die Ladung des Top Quarks ($\frac{2}{3}e$) kann über Untersuchung von Photonstrahlung bestimmt werden. Es gibt exotische Theorien, in denen das Top Quark eine Ladung von $-\frac{4}{3}e$ hat. Es wird geschätzt ([4]), dass Run II die Ladung $\frac{2}{3}e$ mit 95% Vertrauensniveau bestätigen könnte.

Die Untersuchung der verschiedenen Eichkopplungen ist interessant, da in Modellen mit dynamischem elektroschwachen Symmetriebruch anomale Eichkopplungen des Top Quarks auftauchen. Am Tevatron konnte, z. B. durch die Betrachtung der stattfindenden Zerfälle des Top Quarks, bestätigt werden, dass die Kopplungen an g, W^\pm, Z, γ grob dem Standardmodell entsprechen.

4 Top-Physik am LHC

4.1 Überblick

Am LHC (Large Hadron Collider), vgl. Abb. 1, der ein Proton-Proton-Collider ist, wird es im Vergleich zum Tevatron eine wesentliche Erhöhung der Schwerpunktsenergie (auf 14 TeV), der Luminosität und der Top-Erzeugungs-Wirkungsquerschnitte geben. Der LHC wird eine wahre Top-Maschine werden: Es wird pro Detektor (die Detektoren sind: ATLAS und CMS) ca. 8 Millionen Top-Antitop-Ereignisse im ersten Jahr geben, danach ist eine bis zu 10-fache Erhöhung geplant/erwartet. Im Vergleich dazu gab es im gesamten Run I des Tevatron nur 600 Ereignisse, in Run II wird eine ungefähr 100-fache Erhöhung erwartet. Die Erzeugungsrate liegt dann am LHC im Bereich von 1-10 Hz, am Tevatron liegt sie in der Größenordnung 10^{-4} Hz.

Im Unterschied zum Tevatron wird am LHC die Gluon-Gluon-Fusion mit einem Anteil von 90% an der Top-Paar-Erzeugung dominieren, die Quark-Antiquark-Vernichtung trägt nur zu 10% bei.

4.2 Verbesserungen und Erwartungen

Es gibt am LHC im Vergleich zum Tevatron diverse Vorteile, die vor allem mit der wesentlich erhöhten Datenmenge zusammenhängen. Ein entscheidender Vorzug ist, dass man vorteilhafte Ereignisse auswählen kann:

- Man kann Ereignisse mit hohem transversalen Impuls auswählen, die zudem durch die erhöhte Schwerpunktsenergie am LHC häufiger werden. Bei diesen Ereignissen liegen die Zerfallsprodukte des Top Quarks und des Antitop Quarks auf verschiedenen Seiten, dies führt zu einer Verbesserung der Kombinatorik und der Systematik (Jet-Energie-Skala).
- Im di-/semileptonischen Kanal haben Ereignisse, bei denen ein Bottom Quark in ein J/Ψ zerfällt, vorteilhafte Eigenschaften.

Es ist am LHC auch eine genauere Kalibration der Kalorimeter möglich, die am Tevatron einen großen Anteil zum systematischen Fehler beitragen. Es wird erwartet, dass nach einem Jahr die Top-Masse auf 2 GeV bestimmt werden kann, und später bis auf 1 GeV ([5]).

Die Erwartungen für die Bestimmung der anderen Eigenschaften des Top Quarks am LHC sind wie folgt:

Die Ladung von $\frac{2}{3}e$ könnte zu fast 100% Sicherheit bestimmt werden, z. B. über die Photonstrahlung in $gg \rightarrow t\bar{t}\gamma$. Die Yukawa-Kopplung ist über den Prozess $t\bar{t}H$ (im Gegensatz zum Tevatron) direkt messbar (falls die Higgs-Masse, wie erwartet wird, hinreichend klein ist), für die anderen Eichkopplungen gibt es noch keine guten Schätzungen, bis zu welcher Präzision sie bestimmt werden können. Für die Lebensdauer und Zerfallsbreite wird es zwar eine Verbesserung der Statistik geben und somit eine Verbesserung z. B. der oberen Grenze der Lebensdauer geben, aber präzise Messungen sind nur an einem linearen Collider möglich.

4.3 Spinkorrelation

Das Top Quarks zerfällt, bevor sein Spin sich ändert oder es hadronisiert, und hinterlässt seinen Spin in der Winkelverteilung der Zerfallsprodukte. Da LHC und Tevatron beide unpolarisierte Strahlen benutzen, kann man nur die Korrelation der Spins des Top Quarks und des Antitop Quarks beobachten. Man kann nun, wenn man in eine bestimmte Spinbasis übergeht, einen Korrelationskoeffizienten κ definieren, der die Art der Korrelation angibt. κ hängt sowohl von der Basis als auch von der Art der Top-Erzeugung (d. h. auch von den Parton-Funktionen der Protonen) ab. Im wesentlichen ist $\kappa = 1$, wenn die Spins in die gleiche Richtung zeigen und $\kappa = -1$, wenn die Spins in entgegengesetzte Richtung zeigen - also ist im Mittel $\kappa = 0$, falls es keine Spinkorrelation gibt.

Besonders groß ist die Korrelation im dileptonischen Kanal (immer in einer bestimmten Spinbasis). Am Tevatron ergibt die Rechnung bis zur 2. Ordnung $\kappa = 0.8$, durch die Messungen kann bisher mit 95% Wahrscheinlichkeit $\kappa > -0.15$ bestimmt werden, das bedeutet eine schwache Bevorzugung von positiver Spinkorrelation über keine. Am Tevatron liefert die Vorhersage im dileptonischen Kanal $\kappa \sim 0.31$, und es wird erwartet, dass die Korrelation hier gut bestimmt werden kann.

5 Erzeugung einzelner Top Quarks

Neben der dominanten Erzeugung von Paaren von Top Quarks und Antitop Quarks gibt es auch die Erzeugung einzelner Top Quarks. Die Wirkungsquerschnitte sind in Abb. 1 dargestellt. Der Anteil an der gesamten Top-Erzeugung beträgt am Tevatron ungefähr 1/6, am LHC ungefähr 1/4, bei einem linearen Collider kommt sie praktisch nicht vor.

Die Beobachtung einzelner Top Quarks ist im Großen und Ganzen schwieriger als die von Top-Paaren, bisher gibt es am Tevatron noch keine Funde. Sie ist die einzige Methode, um das CKM-Übergangsmatrix-Element V_{tb} , das im 3-Generationen-Modell nahe 1 liegt (s. nächster Abschnitt), direkt zu bestimmen.

In Abbildung 6 sind die verschiedenen Kanäle der Einzel-Top-Erzeugung dargestellt.

Dabei ist (a) der s-Kanal, der durch ein zeitartiges W-Boson charakterisiert wird. Die Beobachtung wird durch große Untergründe behindert. Am Tevatron vergrößert sich der s-Kanal-Wirkungsquerschnitt von Run I zu Run II um ungefähr 30%, am LHC wird der Wirkungsquerschnitt noch mal um einen Faktor von 24 größer sein. Dort wird dann auch erwartet, die Erzeugung einzelner Top Quarks im s-Kanal zu beobachten.

Die Teile (b) und (c) zeigen den t-Kanal, der durch ein raumartige W-Boson ausgezeichnet wird. Die Rechnungen sind hier ungenauer, der t-Kanal profitiert jedoch von einer um einen Faktor 3 größeren Erzeugungsrate, sowohl am Tevatron als auch am LHC.

Bei der assoziierten Erzeugung ((d) und (e)) wird ein reales W-Boson erzeugt. Der Wirkungsquerschnitt ist am Tevatron vernachlässigbar klein; die as-

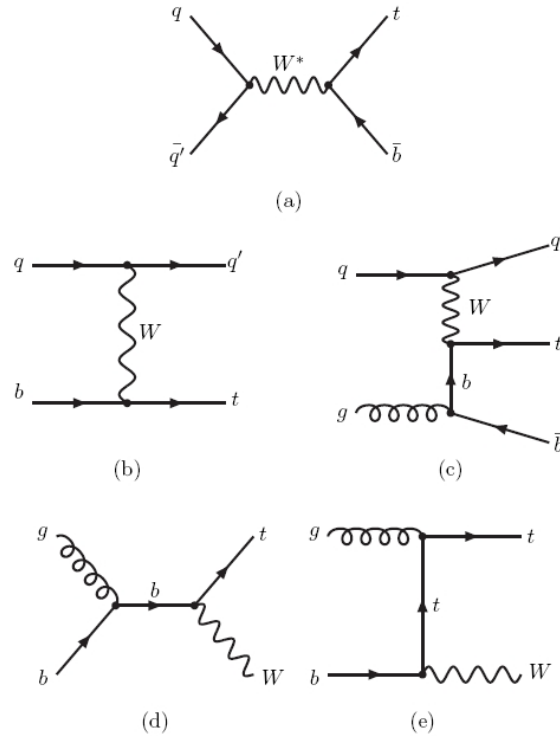


Abbildung 6: ERZEUGUNG EINZELNER TOP QUARKS.

soziierte Erzeugung macht am LHC immerhin 20% der Einzel-Top-Erzeugung aus, ist aber insgesamt eher unwichtig.

6 Top Quark & neue Physik

Das Top Quark ist aus mehreren Gründen besonders interessant im Zusammenhang mit "neuer" Physik:

- Die hohe Masse liegt eventuell im Bereich neuer Teilchen, z. B. supersymmetrischer Teilchen. Das bedeutet, dass das Top Quark möglicherweise in neue Teilchen zerfällt, oder dass neue Teilchen bevorzugt in unter anderem ein Top Quark zerfallen.
- Die Masse liegt zudem nahe der Energieskala des elektroschwachen Symmetriebruchs, und die Yukawa-Kopplung ist erstaunlich nahe bei 1 ("erstaunlich", da ganze Zahlen (hier 1) auf eine mögliche fundamentalere Eigenschaft hindeuten). Beides weist auf einen Zusammenhang mit dem

Higgs-Mechanismus hin, durch den die Teilchen im Standardmodell ihre Massen erhalten.

- Auch in sog. Technicolor-Theorien (Technicolor (TC) ist eine mögliche neue Wechselwirkung) spielt das Top Quark oft eine zentrale Rolle.

Am Tevatron gibt es bisher nur einige Ausschlüsse. Am LHC wird dann die Physik des Top Quarks, vor allem dessen Masse, wichtig auch als Untergrund bei der Suche nach neuer Physik.

Ein Bereich bei der Suche nach neuer Physik im Zusammenhang mit dem Top Quark ist der Bereich der seltenen Zerfälle.

Im Standardmodell zerfällt das Top Quark zum größten Teil (das sind fast 100%) in ein Bottom Quark und ein W-Boson. Zusätzlich gibt es einige seltene Zerfälle.

Neue Physik in diesem Bereich würde sich durch neue seltene (d. h. Nicht-SM-) Zerfälle oder durch einen veränderten Anteil der SM-seltenen-Zerfälle kenntlich machen. Ein möglicher neuer Zerfall ist der in ein Bottom Quark und ein geladenes Higgs-Teilchen, der in manchen Theorien erforderlich ist. Ausschlüsse dazu wird es in Run II des Tevatron sowie am LHC geben. Ein anderer neuer Zerfall wäre der in den SUSY-Partner des Top Quarks. Insgesamt gibt es eine große Bandbreite von neuen Zerfällen in diversen Theorien.

7 Ausblick

Die Physik des Top Quarks bleibt auch nach seiner Entdeckung interessant.

Eine präzise Massenbestimmung ist aus mehreren Gründen notwendig, vor allem, da das Top Quark am LHC bei der Suche nach dem Higgs-Teilchen und möglicher neuer Physik viel zum Untergrund beiträgt. Vielleicht hilft ein besseres Verständnis auch bei der Erklärung des Higgs-Mechanismus, oder der Zahl der Quarkgenerationen. Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, ist das Top Quark auch eine mögliche Verbindung zu neuer Physik. Für die Arbeit am LHC müssen außerdem noch einige Berechnungen durchgeführt werden.

Zusammenfassend hat das Tevatron für die Entdeckung und der Verbesserung der Bestimmung der Masse des Top Quarks gedient, und es gibt einige gute Aussichten für den weiteren Verlauf von Run II. Der LHC öffnet, vor allem wegen der sehr hohen Erzeugungsraten, ein weites Feld für die Top-Physik. Ein linearer Collider (im Moment als ILC (International Linear Collider) im Gespräch) wäre, wegen des geringen Untergrunds und der variablen Schwerpunktsenergie, exzellent geeignet für Präzisionsmessungen.

Literatur

- [1] F. Abe *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **73** (1994) 225 [arXiv:hep-ex/9405005].
- [2] F. Abe *et al.* [CDF Collaboration], Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 2626 [arXiv:hep-ex/9503002].
- [3] S. Abachi *et al.* [D0 Collaboration], Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 2632 [arXiv:hep-ex/9503003].
- [4] D. Chakraborty, J. Konigsberg and D. L. Rainwater, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **53** (2003) 301 [arXiv:hep-ph/0303092].
- [5] M. Beneke *et al.*, arXiv:hep-ph/0003033.
- [6] M. Mangano and T. Trippe, S. 482-487 aus: S. Eidelman *et al.* [Particle Data Group], Phys. Lett. B **592** (2004) 1.
- [7] P. Azzi *et al.* [CDF Collaboration], arXiv:hep-ex/0404010.
- [8] V. M. Abazov *et al.* [D0 Collaboration], Nature **429** (2004) 638 [arXiv:hep-ex/0406031].
- [9] http://www-cdf.fnal.gov/physics/new/top/2005/mass/ljets_template/2Dtemplate/index.html, 10.05.2005.
- [10] <http://www-cdf.fnal.gov/physics/new/top/top.html>, 10.05.2005.