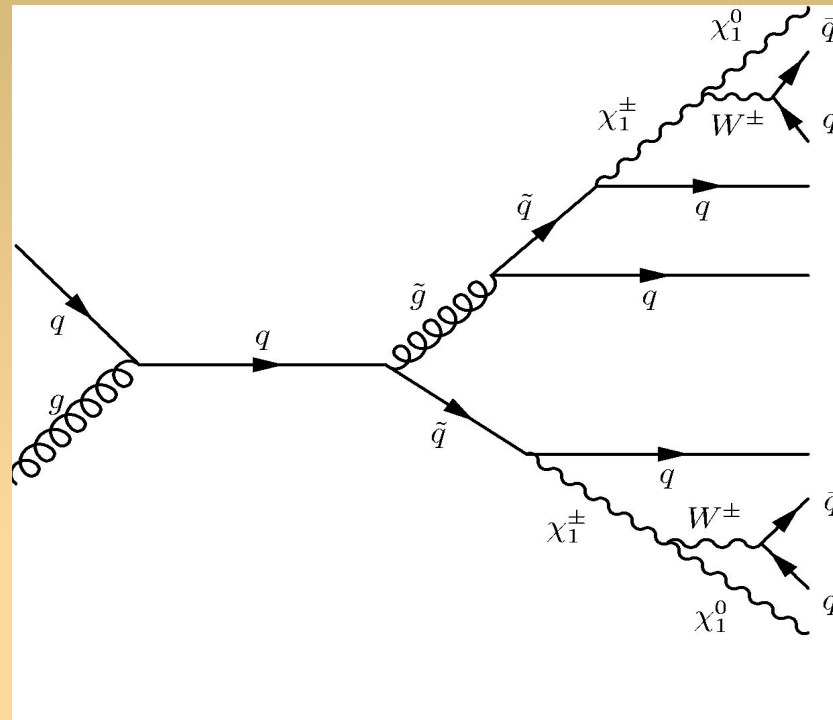


Supersymmetrie am LHC



Till Spiekermann

Proseminarvortrag

"Aktuelle Experimente in der Teilchenphysik"

20.05.2008

Inhalt

- Was ist Supersymmetrie?
- Signatur von SuSy-Signalen
- Der CMS-Detektor
- Anreicherung des Signals gegenüber des Untergrundes
- Zusammenfassung

Das Standardmodell

- Masseteilchen: Spin $\frac{1}{2}$ Fermionen (Quarks, Leptonen)
- Austauscheteilchen: Spin 1 Bosonen (γ , W^\pm , Z^0 , Gluon)
- 3 Wechselwirkungen (EM, schwach, stark + nicht im SM: Gravitation)
- Liefert präzise Vorhersagen im Bereich von $1 \text{ eV} < E < 1 \text{ TeV}$

Es gibt allerdings Probleme bzw. offene Fragen:

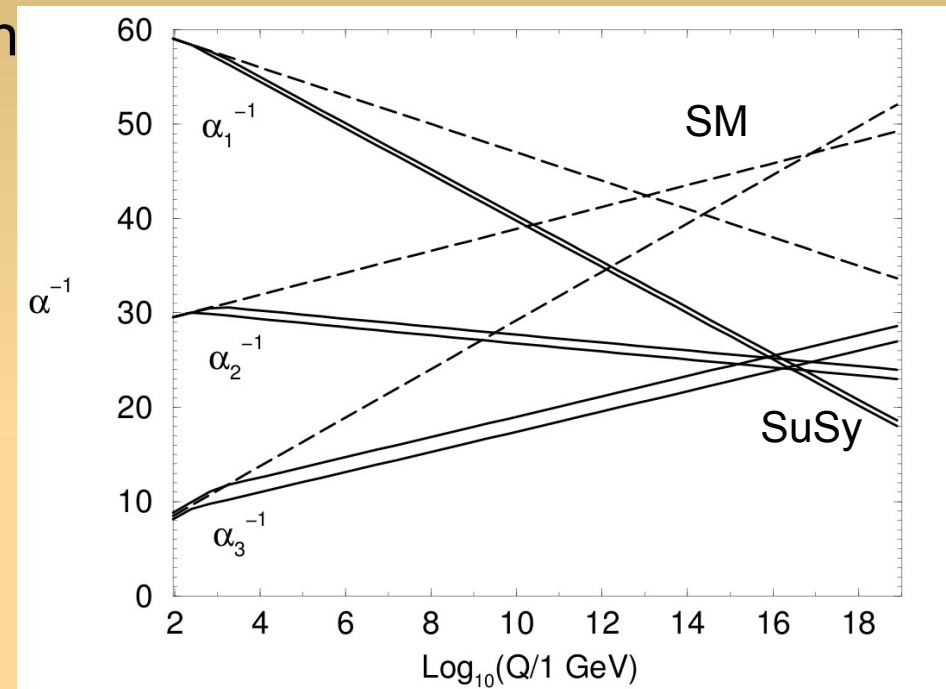
- Vereinigung der Kopplungskonstanten bei $\sim 10^{16} \text{ GeV}$ (GUT-Skala) im SM nicht möglich \rightarrow in GUT Theories erwartet
- Identität der Dunklen Materie ungeklärt
- Fine-Tuning: Strahlungskorrekturen der Higgs-Masse an der GUT-Skala um viele Größenordnungen höher als Higgs-Masse selbst
- Vereinigung mit Gravitation (Spin 2 vorhergesagt) nicht möglich

Supersymmetrie

- Letzte erlaubte Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen
 - Jedes Teilchen bekommt Partner mit identischen Quantenzahlen mit Ausnahme des Spins
 - Spin 0 Sparticles (Sleptonen, Squarks), Spin $\frac{1}{2}$ gauginos
 - Neue Grösse um Leptonen- und Baryonenzahlverletzung und damit nicht beobachteten Protonzerfall auszuschliessen: R-Parität; $R = (-1)^{3(B-L)+2S}$
 - $R_{SM} = 1, R_{SuSy} = -1$
 - Wenn erhalten: SuSy-Teilchen können nicht in SM-Teilchen zerfallen!
- SuSy-Teilchen wurden noch nicht beobachtet → $m_{SuSy} > m_{SM}$
- Also ist SuSy eine gebrochene Symmetrie!
 - Brechung auf einem anderen, unbekannten Sektor mit Medium zum "hier"

Konsequenzen von SuSy

- SuSy ermöglicht Vereinigung der Kopplungskonstanten; neue Teilchen ändern das "Laufen" der Kopplungskonstanten
- Lösung des Fine-Tuning Problems: Korrekturterme für Bosonen und Fermionen haben genau entgegengesetztes Vorzeichen. Gegenseitige Aufhebung wenn $m_{\text{SuSy}} \leq 1 \text{ TeV}$



- LSP (lightest supersymmetric particle) kann nicht in SM-Teilchen zerfallen (R-Parität) → Kandidat für Dunkle Materie
- SuSy Modelle liefern automatisch Möglichkeiten zur Integration der Gravitation!

Minimal supersymmetrisches SM

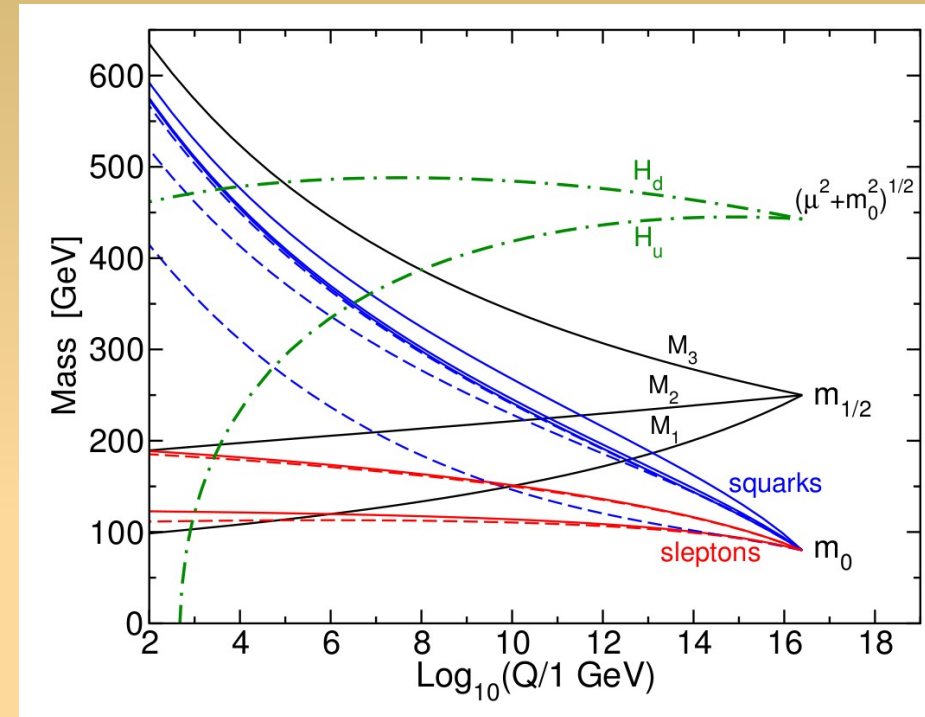
Allgemeinstes SuSy-Modell:

- Minimale Anzahl an neuen Sparticles
- Annahme von R-Paritätserhaltung
- Einführung eines zweiten Higgs-Doublets um Massengenerierung auf dem Up- bzw Down-Sektor zu gewährleisten
- Nachteil: 125 neue freie Parameter

Minimale Supergravitation

- Speziell: Brechung durch Koppeln an noch unbekannte Supergravitation
- Reduziert freie Parameter des MSSM auf 5:

- m_0 : Vereinigungsmasse der Sfermionen
- $m_{1/2}$: Vereinigungsmasse der gauginos

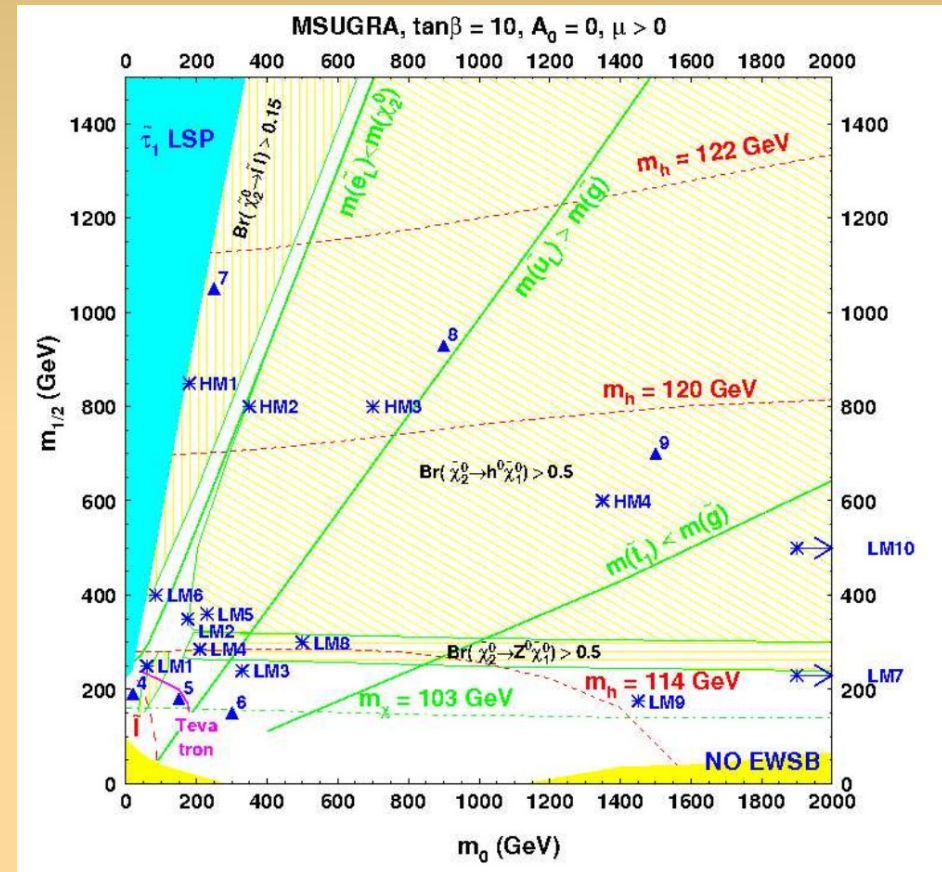


- $\tan\beta$: Verhältnis der Vakuumerwartungswerte der beiden Higgs-Doublets
- A_0 : trilinearere Kopplungsparameter an der GUT-Skala
- $\text{sign}(\mu)$: Vorzeichen des Higgs-Mischungsparameters

SuSy Testpunkte für CMS

Für SuSy Suche am CMS sind 14 Testpunkte definiert:

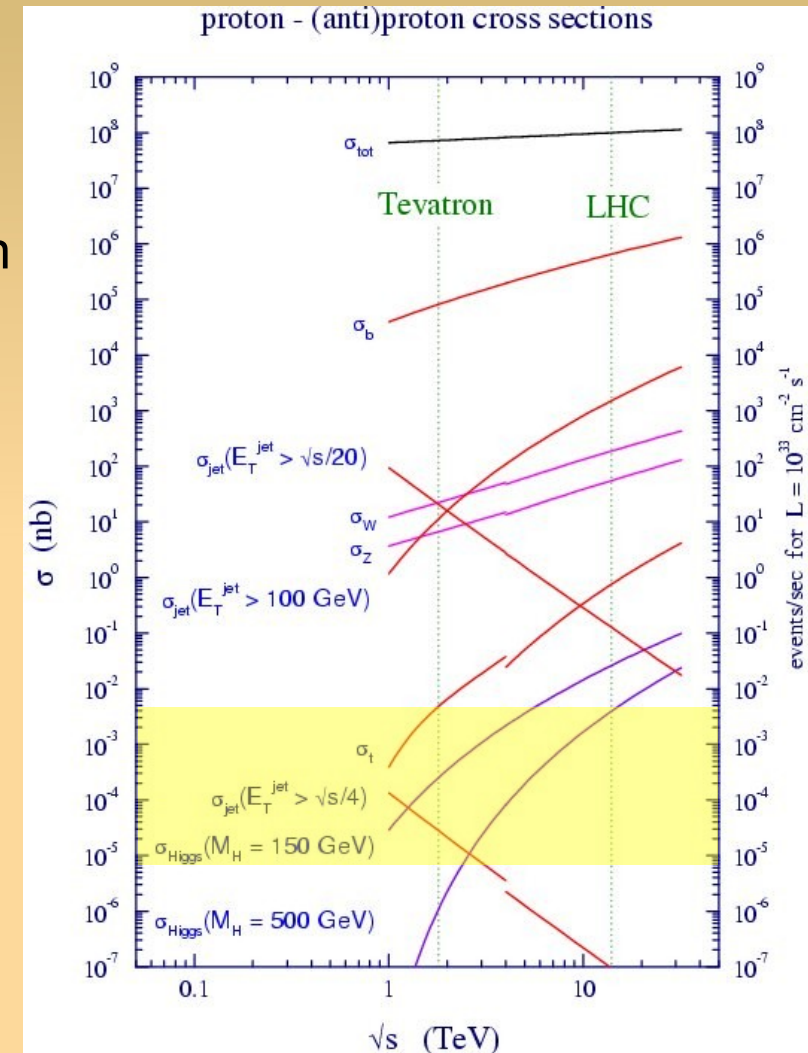
- LM 1-10: Testpunkte mit relativ kleinen Massen, durch höheren Wirkungsquerschnitt früher erreichbar
- HM 1-4: hohe Massen und niedriger WQ, dadurch erst später überprüfbar



SuSy-Produktion in pp-Prozessen

Starke WW dominant in SuSy relevanten Prozessen

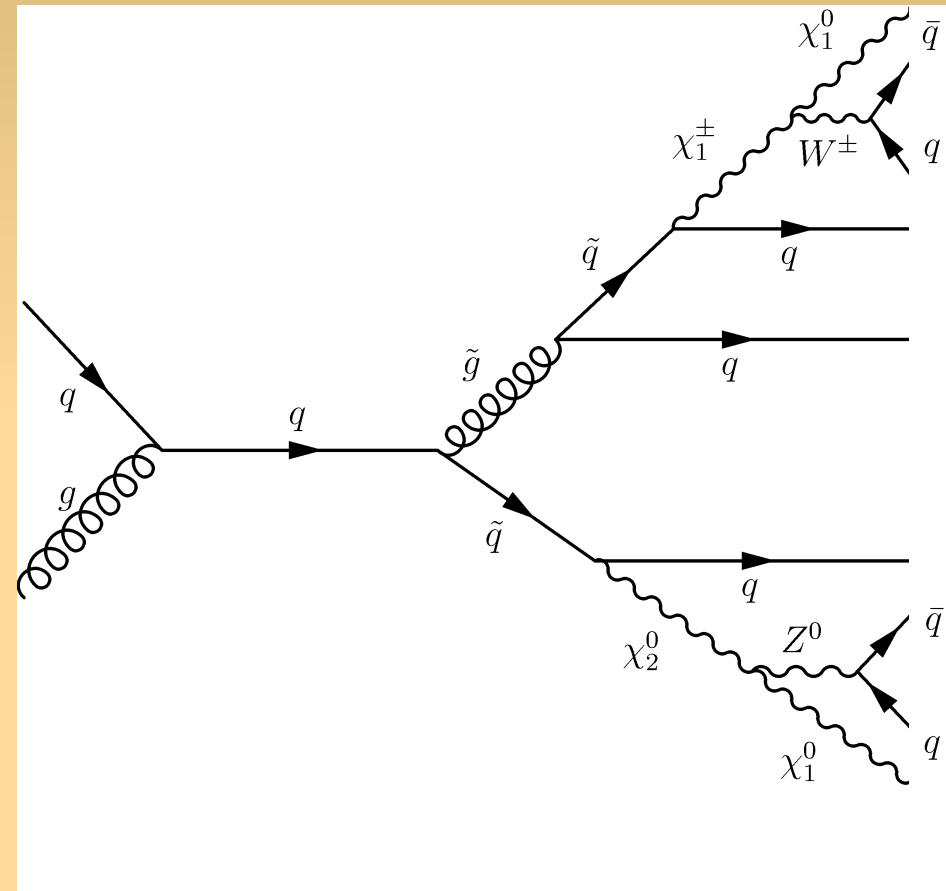
- Hauptsächlich Squark- und Gluinoproduktion
 - Produktionskanal ist abhängig von m_0 und $m_{1/2}$, WQ nimmt ab mit steigendem $m_0/m_{1/2}$
 - Produktion in Paaren (R-Parität)
 - SuSy-WQ um viele Größenordnungen kleiner als SM-WQ
- Sehr hohe Schwerpunktsenergie wird benötigt um Squarkpaare zu erzeugen
- LHC



Signatur von SuSy-Signalen

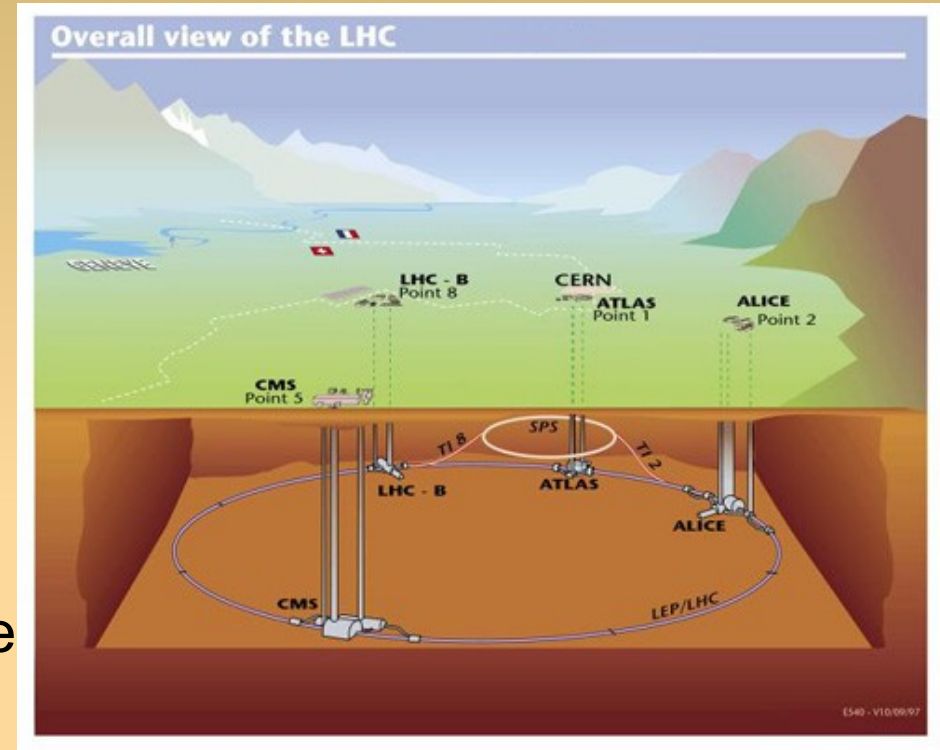
Hier: vollhadronischer Zerfallskanal

- Hohe fehlende Transversalenergie durch nicht gemessene Neutralinos (LSP)
- Viele Jets mit hohem E_T



Der Large Hadron Collider

- Am Cern bei Genf
- Umfang: 27 km
- pp-Prozesse mit Schwerpunktsenergie von 14 TeV
- Detektoren:
 - ALICE: Untersuchung von Quark-Gluon-Plasma
 - ATLAS: Vielzweckdetektor, Suche nach Higgs, neuer Physik
 - LHCb: Messung der CP-Verletzung bei B-Mesonen
 - CMS: Vielzweckdetektor



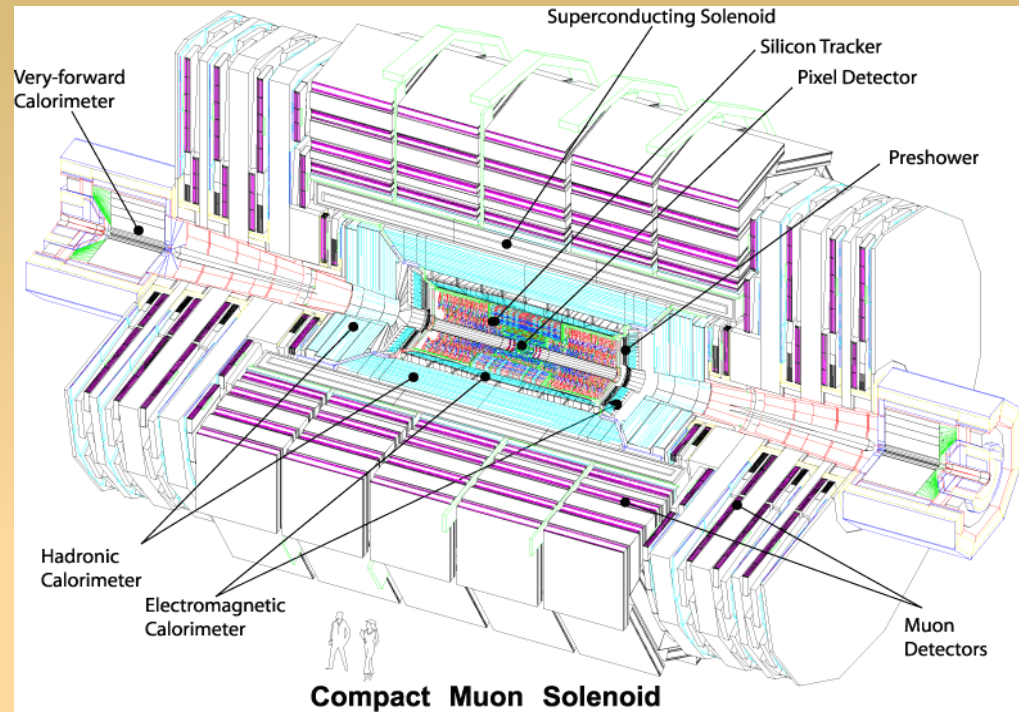
Der CMS-Detektor

Compact Muon Solenoid

- Vielzweckdetektor
- Solenoid kann Magnetfeld bis 4 Tesla erzeugen
- Kompakter als ATLAS
- Optimiert auf Myonmessung
- Primäre Ziele:
 - Entdeckung des Higgs
 - Erforschung der Physik jenseits des Standardmodells (SuSy)
- Weitere Ziele:
 - Vermessung des Top Quarks
 - Präzisionsvermessung des Standardmodells

Der CMS-Detektor

- Aufbau: (von innen nach aussen)
 - Silizium-Tracker: Spurmessung
 - Blei-Wolfram ECAL: Messung der Energien von EM-WW Teilchen
 - Messing-Szintillator HCAL: Messung der Energien von Hadronen
- Supraleitender Solenoidmagnet: Magnetfeld von 4 T um anhand von Bahnkrümmung Impuls der Teilchen zu bestimmen
- Äusseres Kalorimeter: Messung der Energie von Jets, die noch nicht ihre komplette Energie verloren haben haben
- Myonkammern: Messung der Energien von Myonen



Datennahme

- LHC Bunchcrossing-rate: 40 MHz
- Datenmenge eines Events: ca. 250 kb
- Datenfluss von 1Tb/s!

Zu hoch, um verarbeitet werden zu können!

Lösung: Trigger:

Das Triggersystem des CMS hat zwei Stufen:

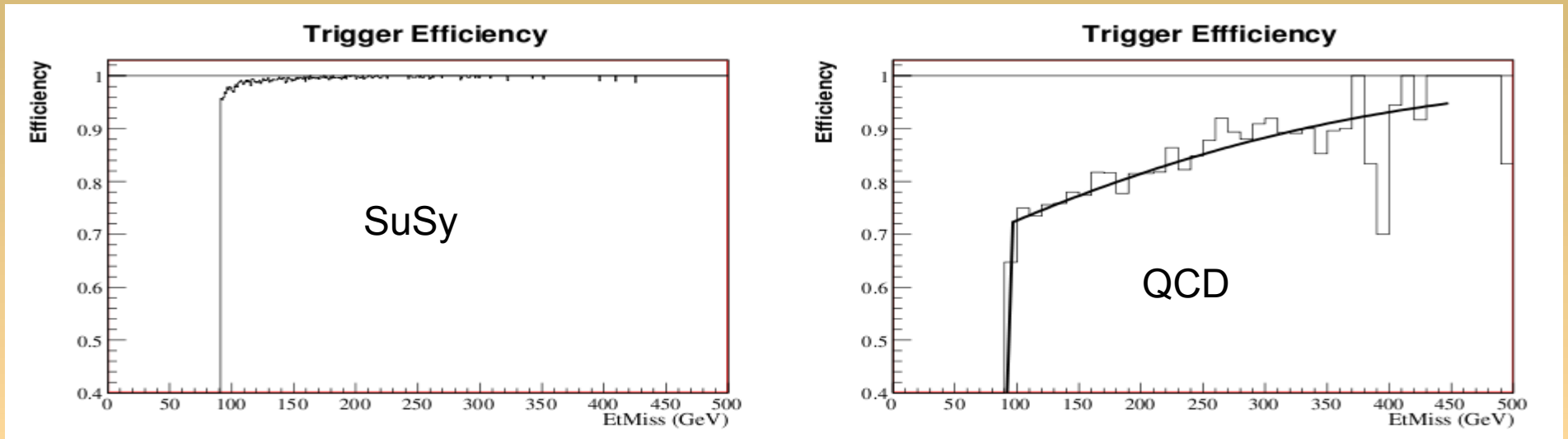
- Level 1 Trigger (Hardware)
- High Level Trigger (Software)

Triggersystem bei CMS

- Triggern auf Transversalenergie
- Level 1:
 - Fokus auf schneller Entscheidungsfähigkeit
 - Legt Kalorimeterzellen zusammen um Gesamtenergie abzuschätzen
 - Reduziert Datenrate auf ca. 30 kHz ($\sim 10^{-3}$)
- High Level Trigger:
 - Hat mehr Zeit zur Verfügung, deswegen genauere Eventrekonstruktion
 - Reduziert Datenrate auf 100 Hz ($\sim 10^{-5}$)

Datenfluss nun bei 25 Mb/s → kann nun gespeichert werden

Triggersystem bei CMS



- Hohe Triggereffizienzen sind wichtig, damit Ereignisse richtig interpretiert werden (hier am Beispiel fehlender Transversalenergie)
- Für SuSy: ab 150 GeV fehlender Transversalenergie ist das Triggersystem voll effizient
- Keine SuSy Ereignisse gehen durch den Trigger verloren
- QCD: bei hohem P_T geht L1 Trigger im HCAL in Sättigung, was durch die Triggerlogik nicht richtig gehandhabt wird, deswegen schlechte Effizienzen

Triggersystem bei CMS

Beispiele für Triggerentscheidungen:

- Einzelnes, isoliertes Myon:
 - Minimale Transversalenergie: 11 GeV
 - Finale Datenrate: 18 Hz
- Zwei Jets:
 - Minimale Transversalenergie: 150 GeV (pro Jet)
 - Finale Datenrate: ~ 11 Hz

Jet-Algorithmen

Vollhadronischer Kanal → im Endzustand viele Jets

Separierung durch Algorithmen

Beispiel: Midpoint-Cone Algorithmus

- Um jedes Objekt mit $E > 30\text{GeV}$ wird ein Kegel gelegt (proto-jets)
- Wenn ein Kegel sich mit keinem weiteren überlappt: Übernahme in Jet-Liste
- Bei Überlappen von 2 oder mehr Kegeln:
 - Wenn zwei Kegel sich um mehr als 50% der Gesamtenergie überlappen werden sie zu einem Jet vereinigt
 - Andernfalls werden die Jets in der Mitte gesplittet
- Andere Algorithmen: Iterative Cone, inclusive k_T

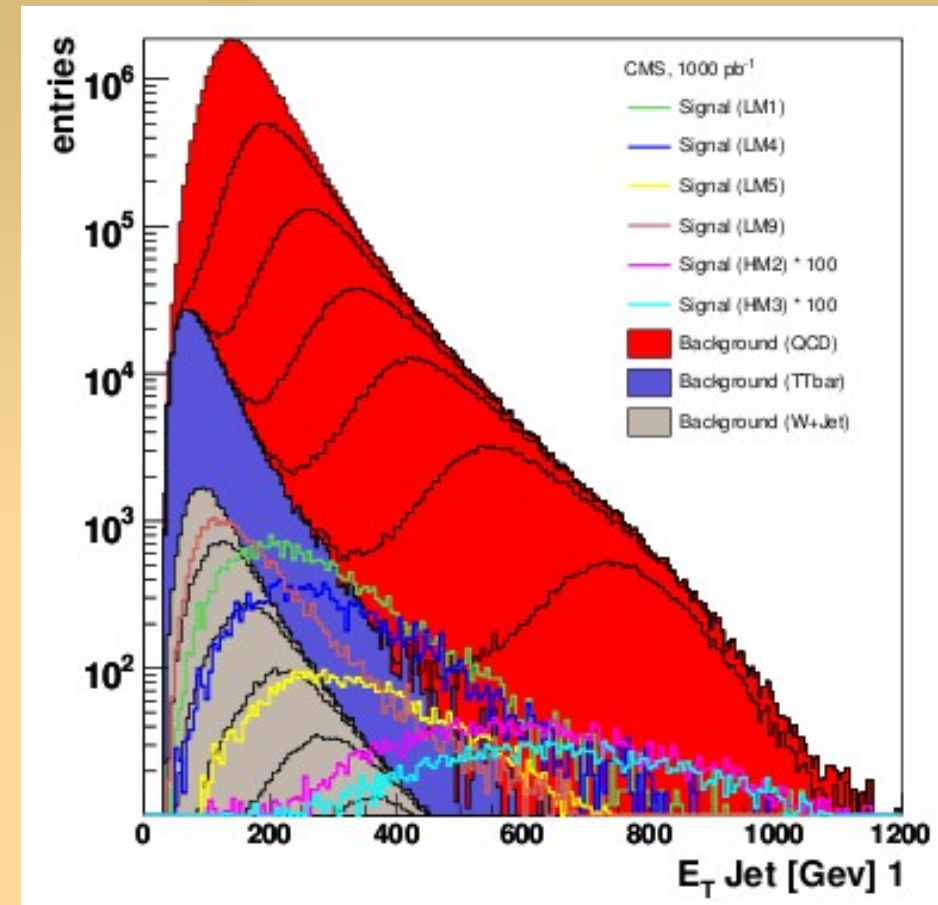
Fehlende Transversalenergie

- Bestimmung:
 - Vektorielle Summation der Energie in allen Kalorimeterzellen
 - Fehlende Transversalenergie ist gerichtete Grösse
- In QCD fehlende Transversalenergie bei fehlgemessenen Jets (fake $E_{T,miss}$)
- Großteil des Untergrundes QCD Ereignisse
- ansonsten $t\bar{t}$, W +Jet
- Unterdrückung von QCD!

Reduktion des Untergrundes

Vorauswahl:

- Min. 3 Jets mit $E > 30$ GeV im Barrel ($|\eta| < 3$)
- $|\eta| < 1,7$ für Jet mit höchster Energie
- $|\eta| < 3$ für Jet mit zweithöchster Energie
- Anteil Energie im ECAL $> 10\%$ (Bereinigung von Störeinflüssen)



Def: η : Pseudorapidität, $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$, θ in Ebene des Strahlrohrs. $\Delta\eta$ ist für masselose Teilchen invariant unter Lorentzboost!

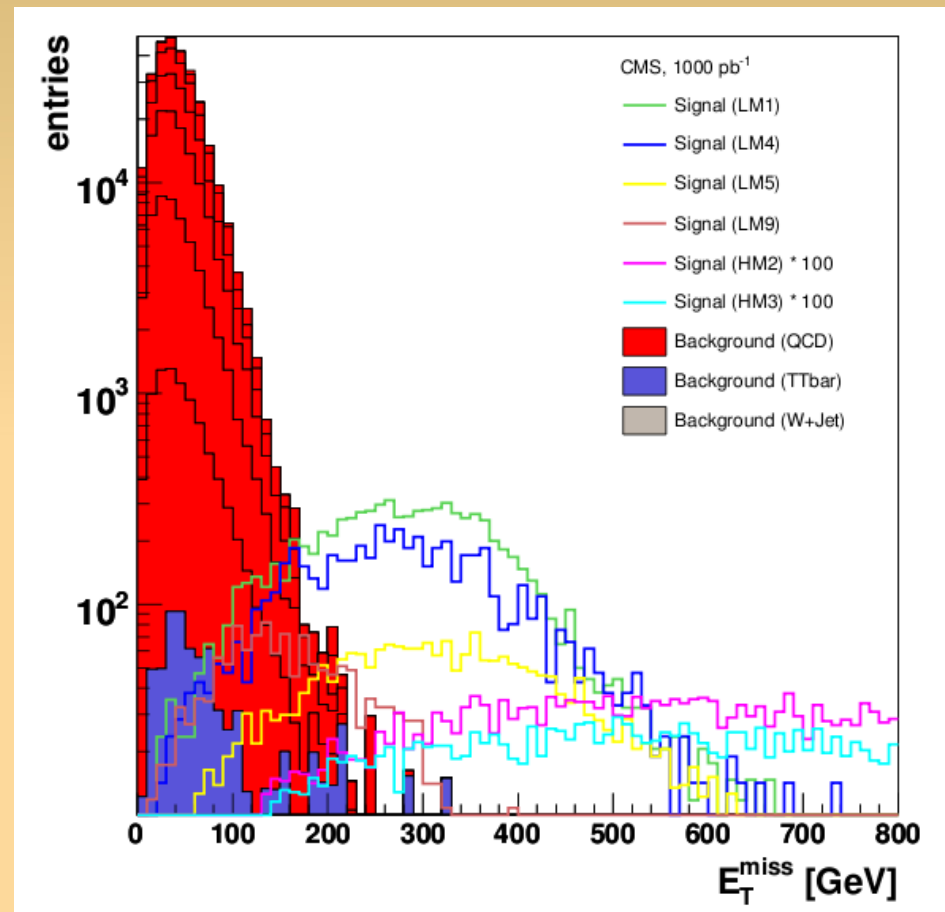
Reduktion des Undergrundes

Weitere Schritte nach Vorauswahl:

- $E_{T,\text{miss}}$
- Schnitt auf $\Delta\Phi$ (Azimuthalwinkel zwischen $E_{T,\text{miss}}$ und Jet):
Unterdrückung von QCD
- Mindesthärte der Jets: Unterdrückung von QED
- Indirektes Lepton Veto: Unterdrückung von W+Jet

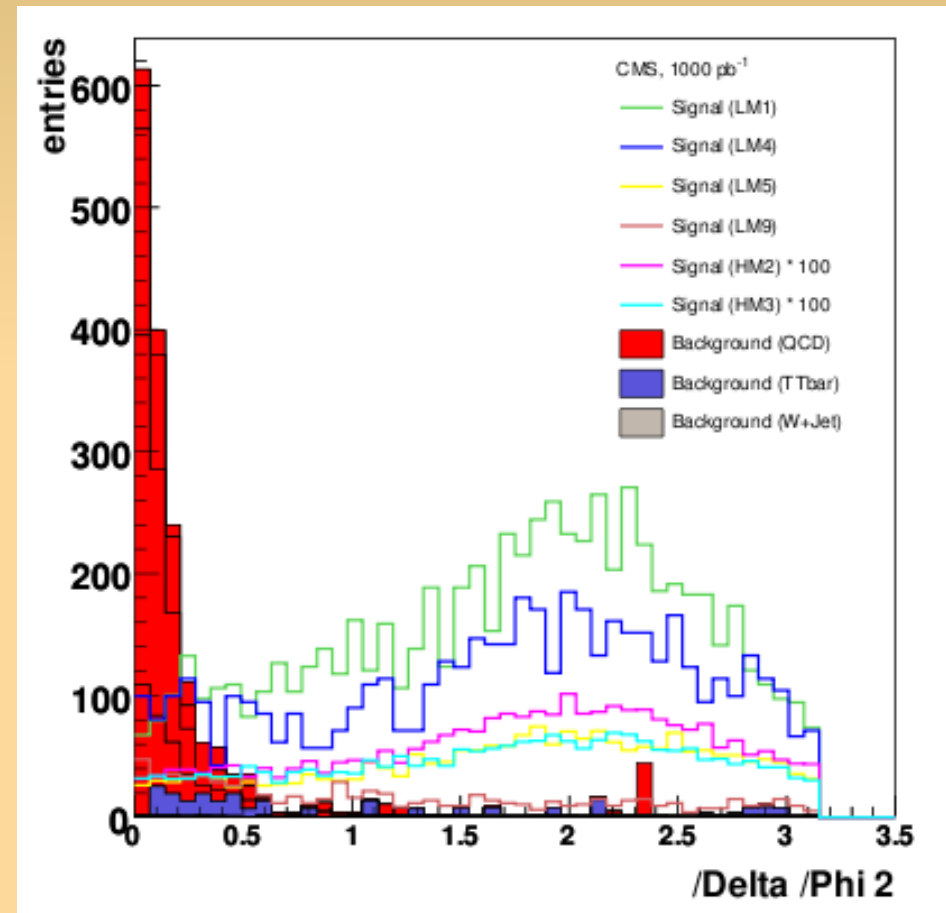
Schnitt auf $E_{T,miss}$

- Schnitt auf $E_{T,miss}$ von 200 GeV
- Entfernt einen Großteil des Untergrundes, hauptsächlich QCD



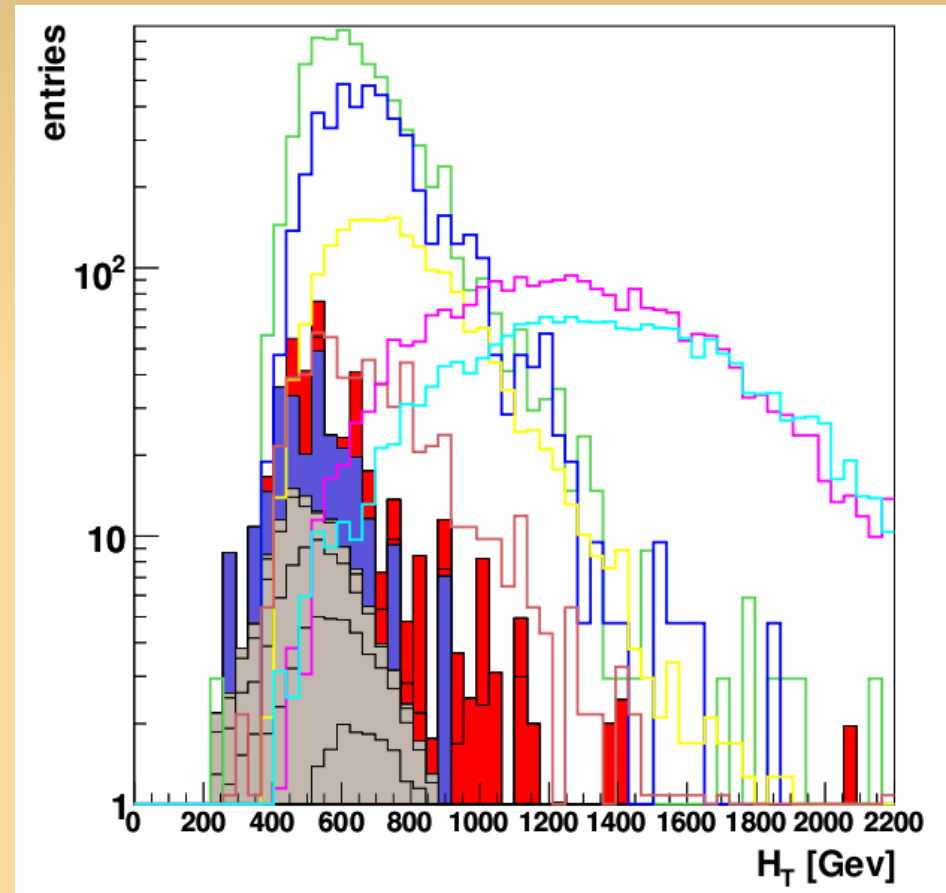
Schnitt auf $\Delta\Phi$

- Bei Verursachung von fake $E_{T,miss}$ durch fehlerhafte Messung eines Jets sind der Jet und $E_{T,miss}$ ähnlich gerichtet
- Forderung, dass Jets ein $\Delta\Phi$ grösser als 0,3 haben



Härte der Jets

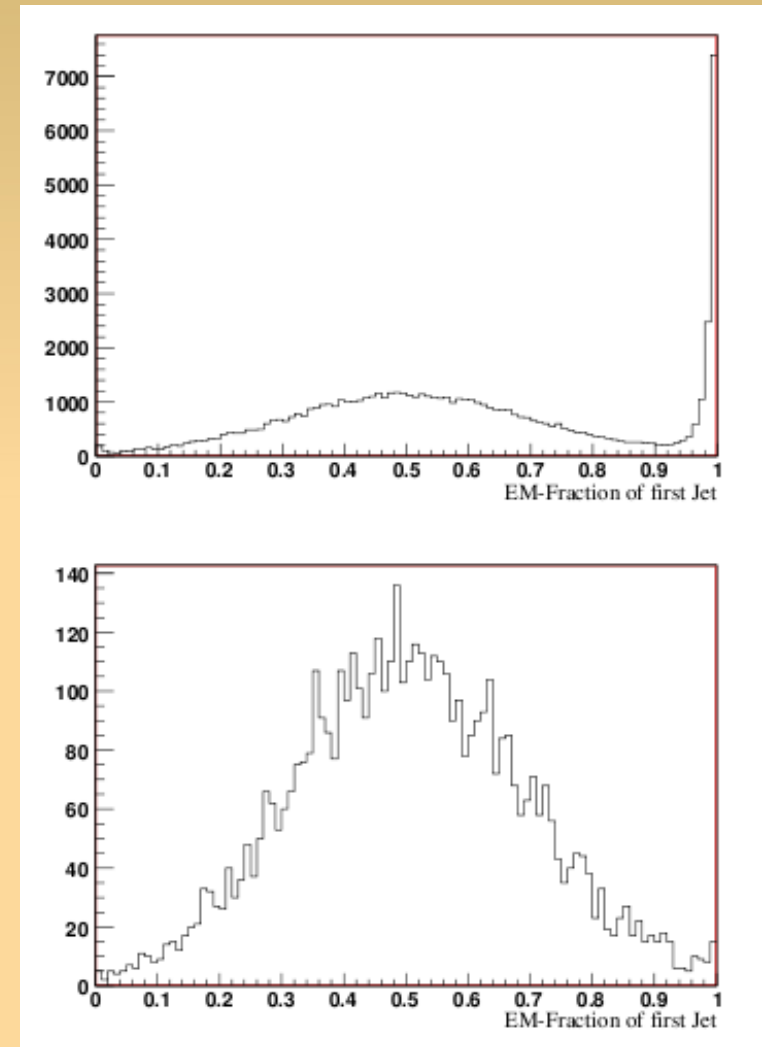
- QED Ereignisse haben niederenergetische Jets
 - ET des stärksten Jets > 180 GeV, des zweiten > 110 GeV
 - H_T : Summe der Jets 2-4 + $E_{T,miss} > 500$ GeV



Indirektes Lepton Veto

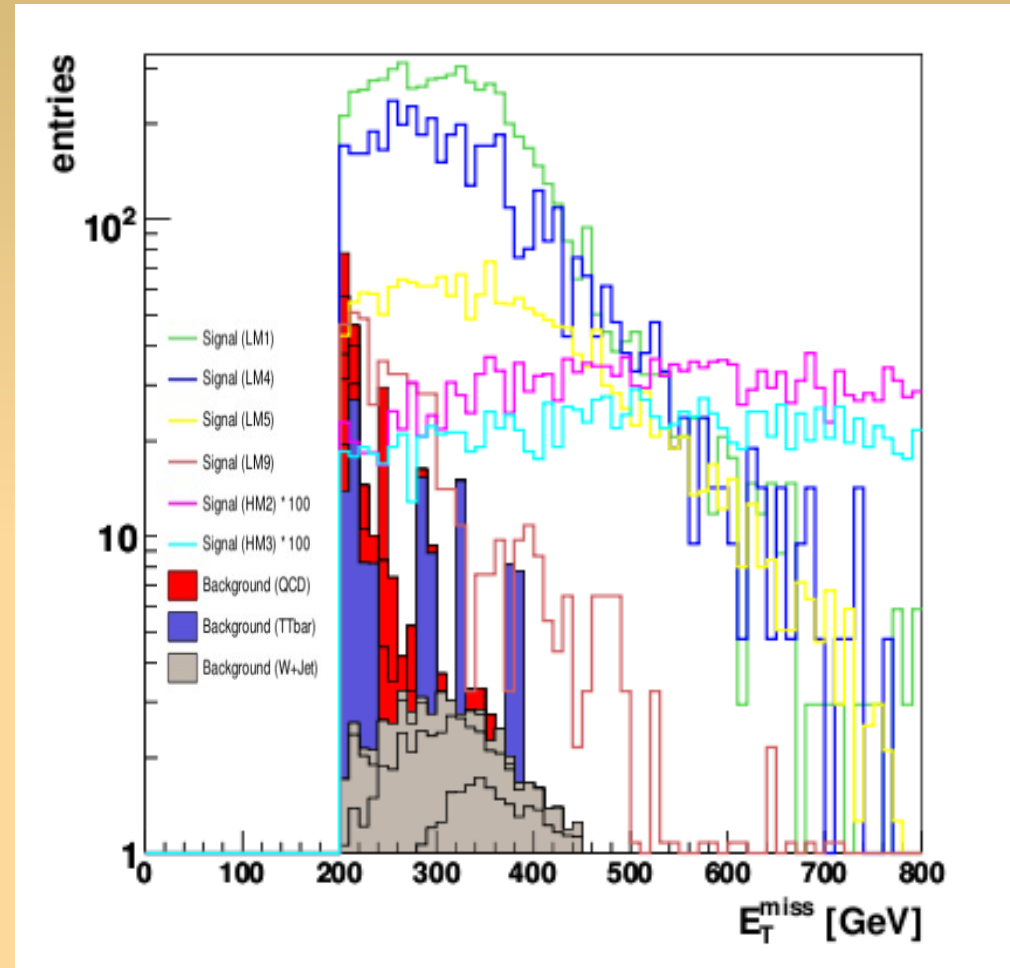
Indirektes Lepton Veto:

- W zerfällt in Lepton und Neutrino
→ echtes $E_{T,miss}$
- Elektron aus $W + \text{Jet}$ als Jet
missinterpretiert:
 - Anteil an Gesamtenergie im
ECAL $5\% < E < 90\%$
- Überprüfung der Elektron-Spur
auf Isolation, da Elektronen aus
 W -Zerfällen oft isoliert sind



Signal nach Bereinigung

- Beschriebene Schnitte reduzieren Untergrund dramatisch
- Bsp (nach Vorauswahl)
 - QCD von $3,9 \cdot 10^7$ auf 130 Ereignisse
 - W + Jet von 15k auf 68 Ereignisse
 - Gegenüber 7800 (LM3) bis 19 (HM3) SuSy Ereignisse



Signifikanzen der Signale

Cut	Signal Events	Background Events	Signal Efficiency	Significance
Preselection	31439 ± 304	$(3.91 \pm 0.01) \cdot 10^7$	57.3	5.0
E_T^{miss}	16313 ± 219	8191 ± 430	29.7	180.1
$\Delta\Phi$ and $R_{1,2}$ cuts	12970 ± 195	2677 ± 366	23.6	250.7
H_T	8743 ± 160	809 ± 341	15.9	307.4
ILV & jet E_T cuts	6355 ± 137	289 ± 90	11.6	373.8

- Signifikanz eines Signals:

$$\sigma = \frac{\# \text{ Signal events}}{\sqrt{\# \text{ Background events}}}$$

- Maß für die Aussagekraft eines Signals
- Schnitt auf $E_{T,miss}$ erhöht die Signifikanz am stärksten

Zusammenfassung

- Testpunkte mit kleinem $m_0 / m_{1/2}$ sind erreichbar, nachdem CMS kalibriert und verstanden wurde
- Testpunkte mit höheren Massen brauchen höhere integrierte Luminosität, also mehr Zeit nach Start des LHC
- Sollte Supersymmetrie real sein, wird sie höchstwahrscheinlich am LHC entdeckt werden!
- Nach Entdeckung: Parameterbestimmung

Referenzen

- J. Thomsen: Search for Supersymmetric Particles based on large Missing Transverse Energy and high Pt Jets at the CMS Experiment
- CMS-Kollaboration: Physics TDR Vol. II Physics Performance
- The CMS Trigger and Data Acquisition Group: The CMS High Level Trigger
- W. De Boer: Grand Unified Theories and Supersymmetry in Particle Physics and Cosmology
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Cern>