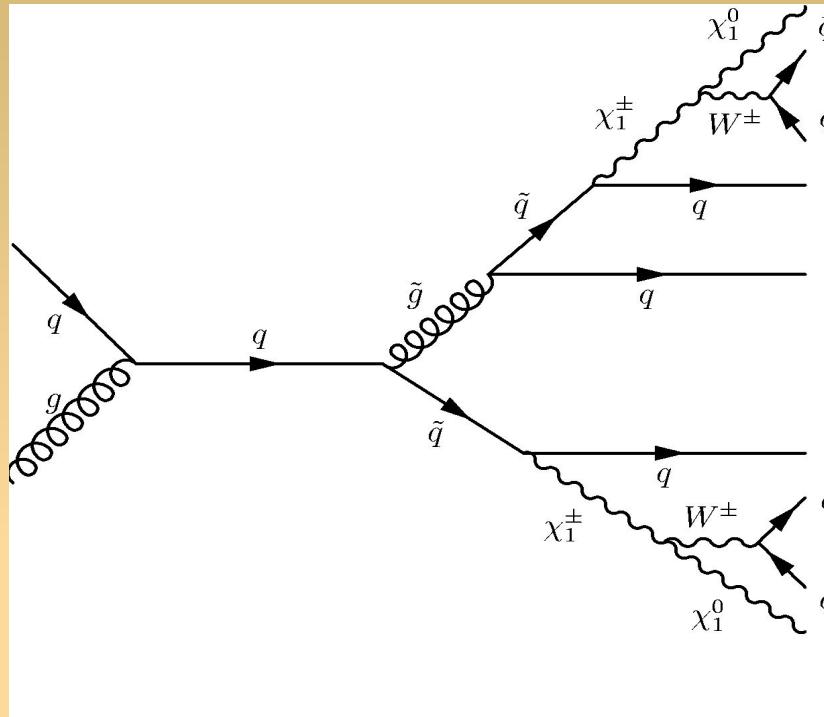


# Supersymmetrie am LHC



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)
- Austauschteilchen: Spin 1 Bosonen ( $\gamma$ ,  $W^\pm$ ,  $Z^0$ , 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:

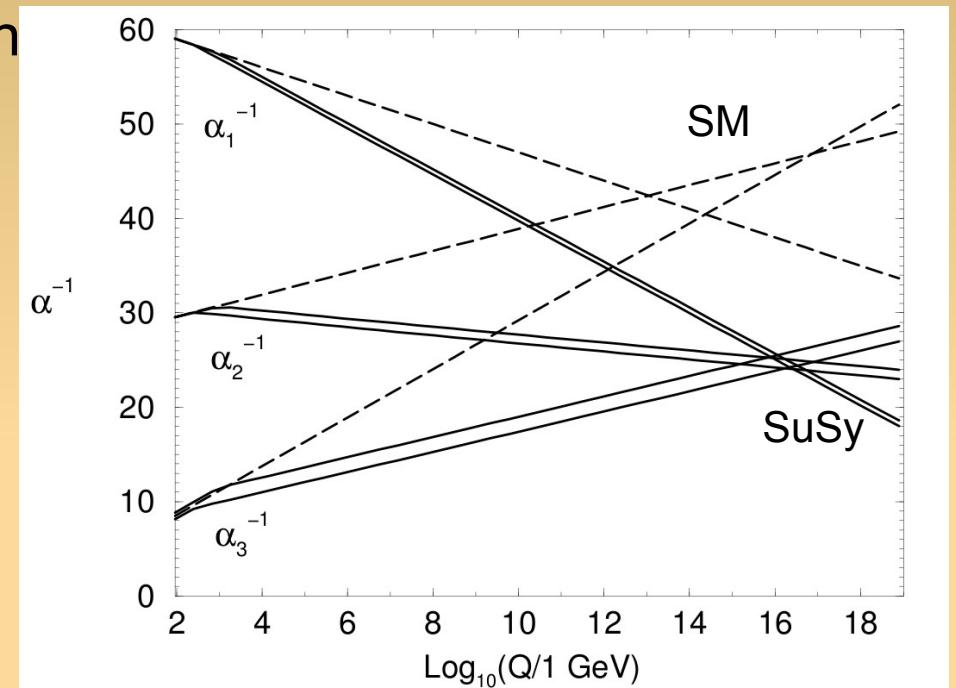
- Vereinigung der Kopplungskonstanten bei  $\sim 10^{16} \text{ GeV}$  (GUT-Skala) im SM nicht möglich  $\rightarrow$  in GUT Theories erwartet
- Identität der Dunklen Materie ungeklärt
- Fine-Tuning: Strahlungskorrekturen der Higgs-Masse an der GUT-Skala um viele Größenordnungen höher als Higgs-Masse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

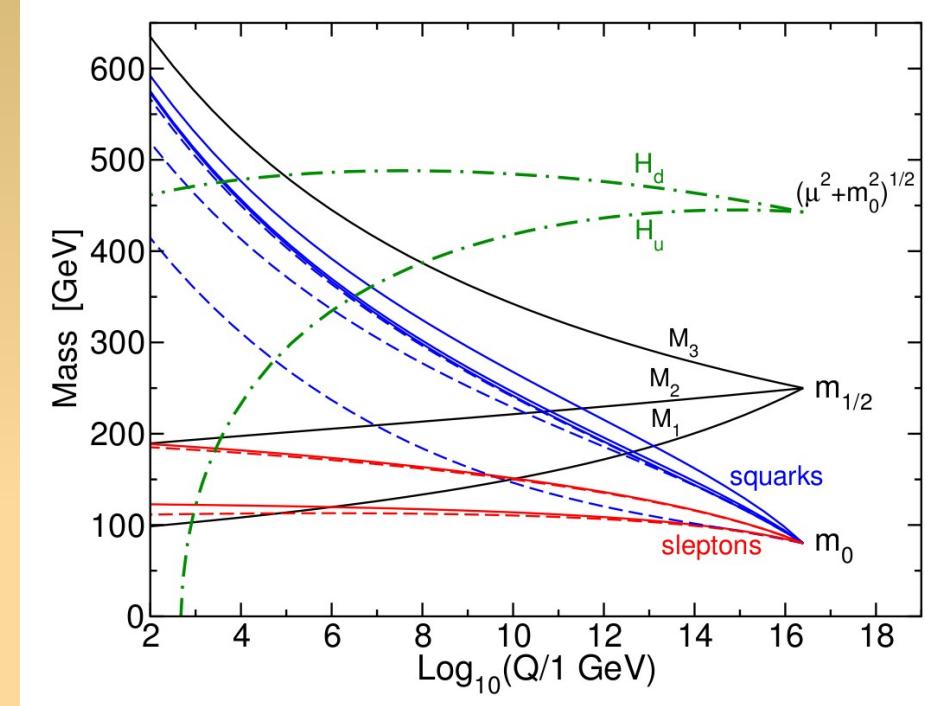
# Minimal supersymmetrisches SM

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

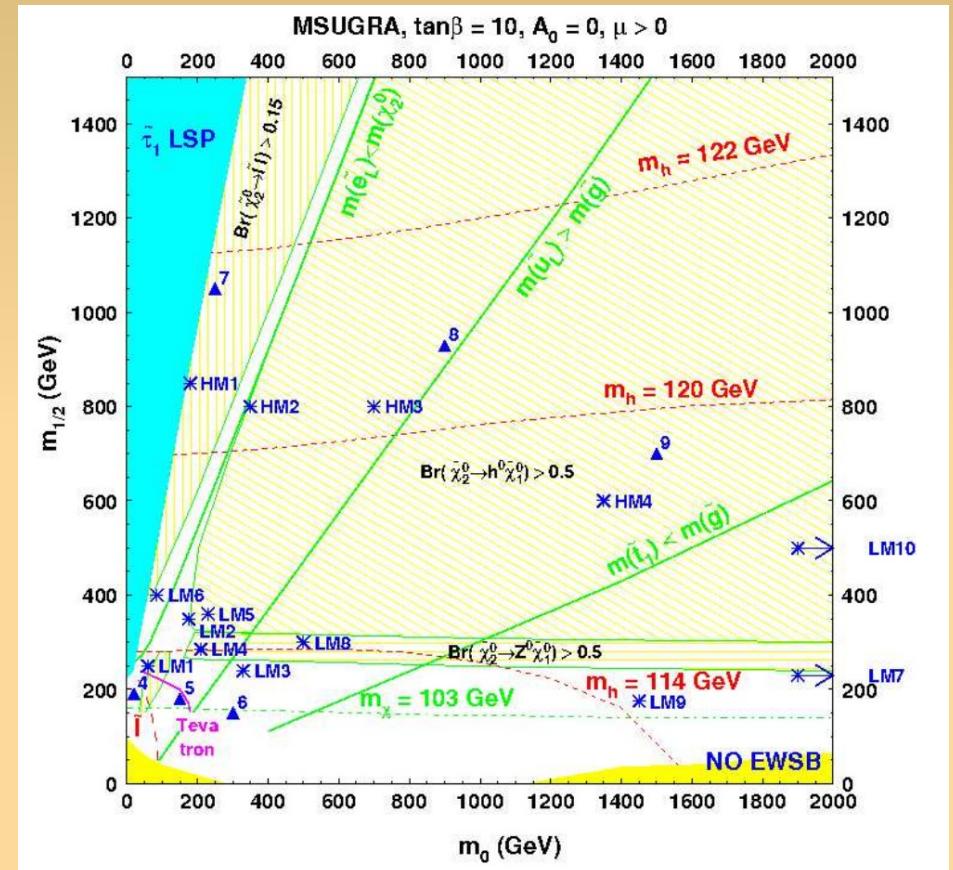


- $\tan\beta$ : Verhältnis der Vakuumerwartungswerte der beiden Higgs-Doublets
- $A_0$ : trilinearer Kopplungsparameter an der GUT-Skala
- $\text{sign}(\mu)$ : Vorzeichen des Higgs-Mischungsparameters

# SuSy Testpunkte für CMS

Für SuSy Suche am CMS sind 14 Testpunkte definiert:

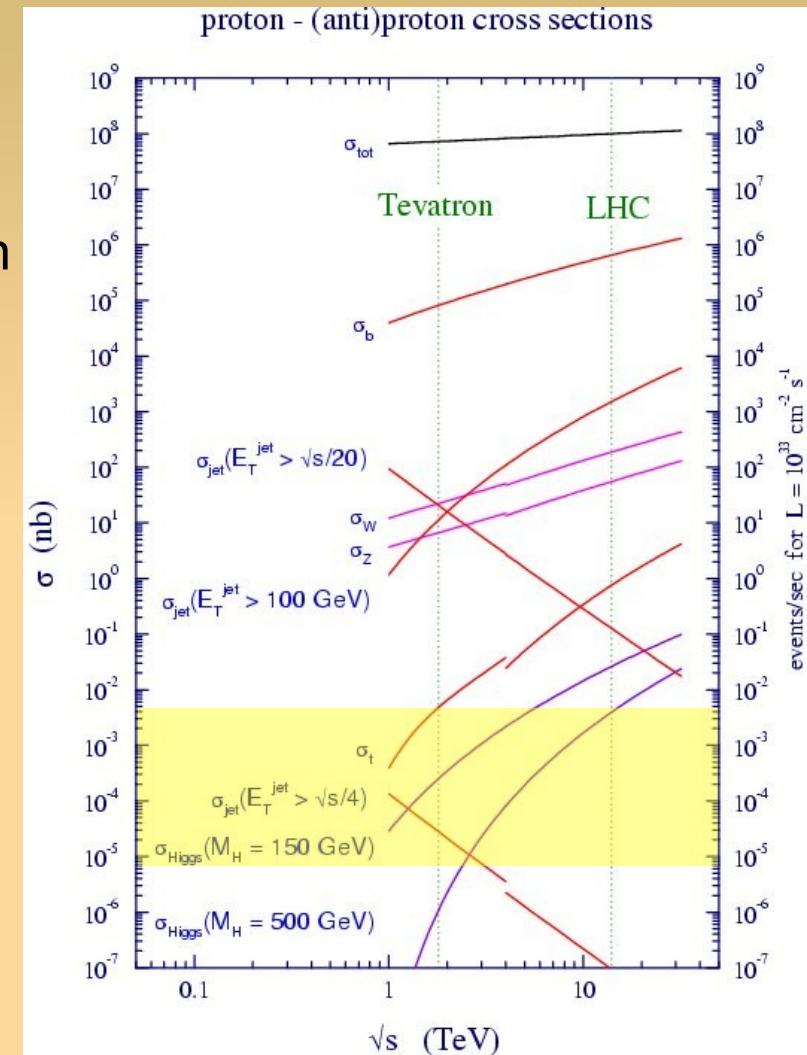
- LM 1-10: Testpunkte mit relativ kleinen Massen, durch höheren Wirkungsquerschnitt früher erreichbar
- HM 1-4: hohe Massen und niedriger WQ, dadurch erst später überprüfbar



# SuSy-Produktion in pp-Prozessen

Starke WW dominant in SuSy relevanten Prozessen

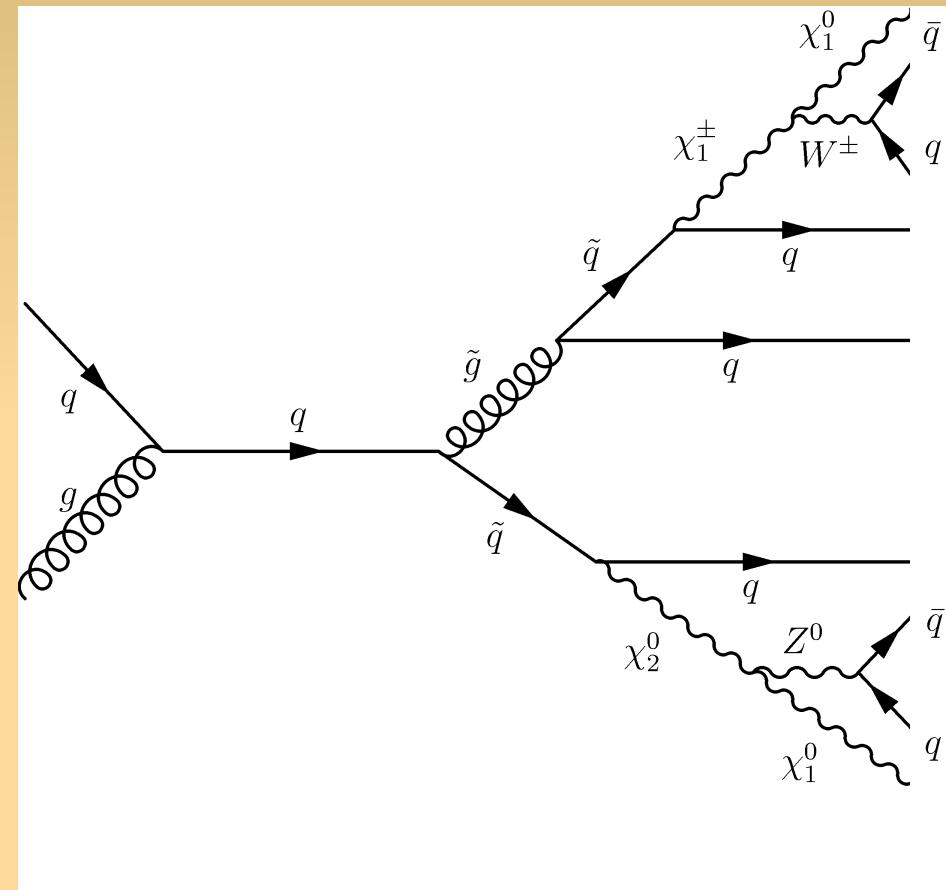
- Hauptsächlich Squark- und Gluinoproduktion
  - Produktionskanal ist abhängig von  $m_0$  und  $m_{1/2}$ , WQ nimmt ab mit steigendem  $m_0/m_{1/2}$
  - Produktion in Paaren (R-Parität)
  - SuSy-WQ um viele Größenordnungen kleiner als SM-WQ
- Sehr hohe Schwerpunktsenergie wird benötigt um Squarkpaare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



# Signatur von SuSy-Signalen

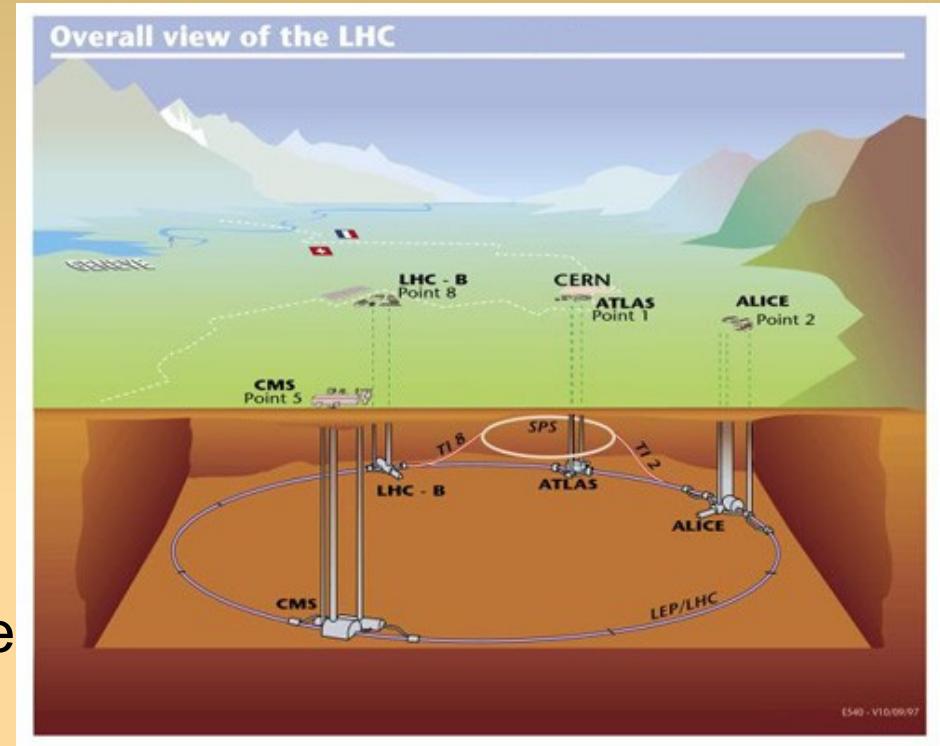
Hier: vollhadronischer Zerfallskanal

- 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



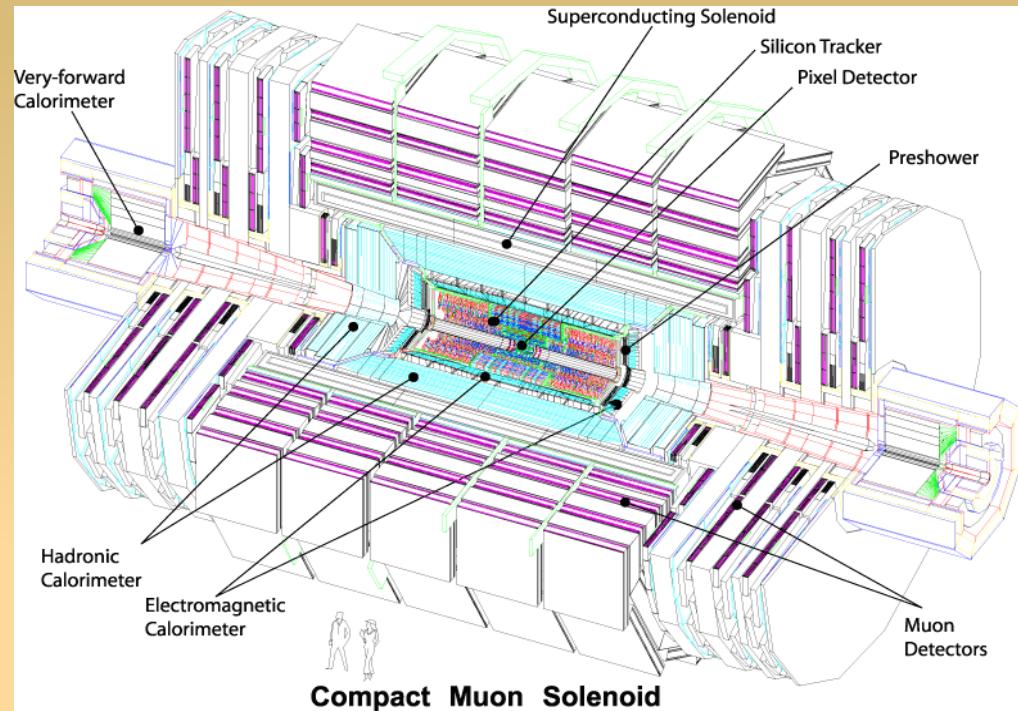
# Der CMS-Detektor

## 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 den 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:

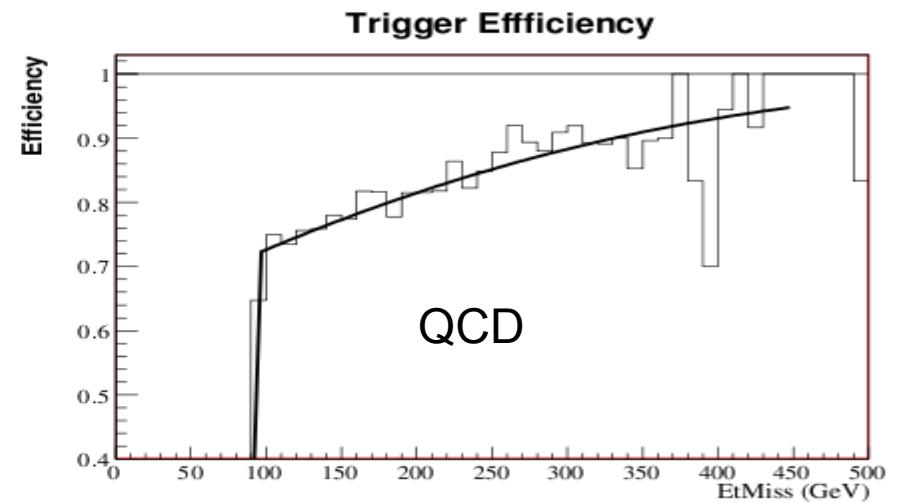
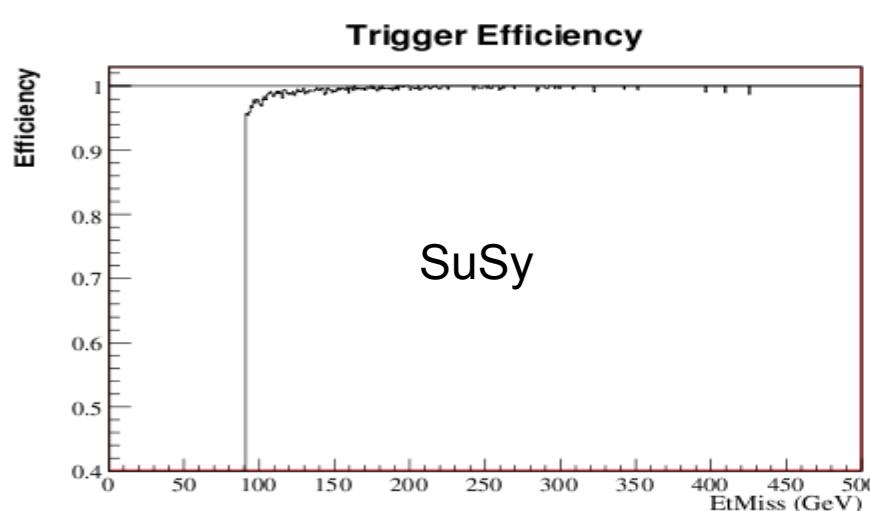
- Level 1 Trigger (Hardware)
- High Level Trigger (Software)

# 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:  $\sim$  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  $k_T$

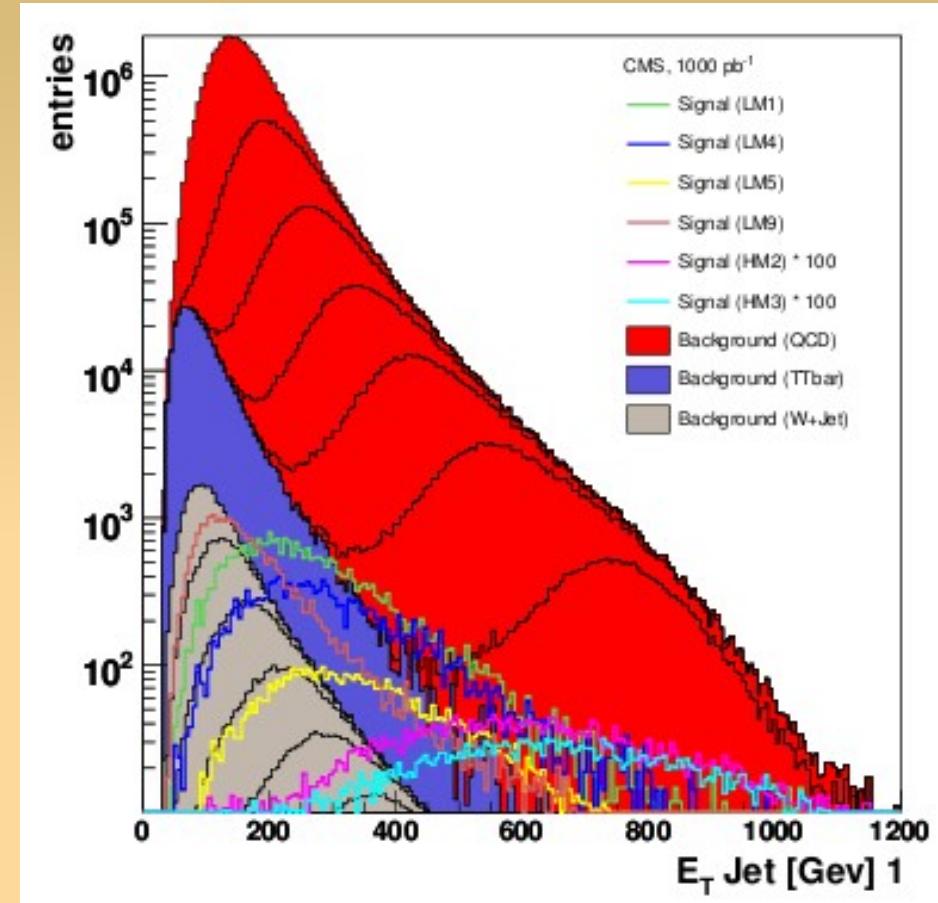
# Fehlende Transversalenergie

- Bestimmung:
  - Vektorielle Summation der Energie in allen Kalorimeterzellen
  - Fehlende Transversalenergie ist gerichtete Grösse
- In QCD fehlende Transversalenergie bei fehlgemessenen Jets (fake  $E_{T,\text{miss}}$ )
- Großteil des Untergrundes QCD Ereignisse
- ansonsten ttbar, 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:  $\eta$ : Pseudorapidität,  $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$ ,  $\theta$  in Ebene des Strahlrohrs.  $\Delta\eta$  ist für masselose Teilchen invariant unter Lorentzboost!

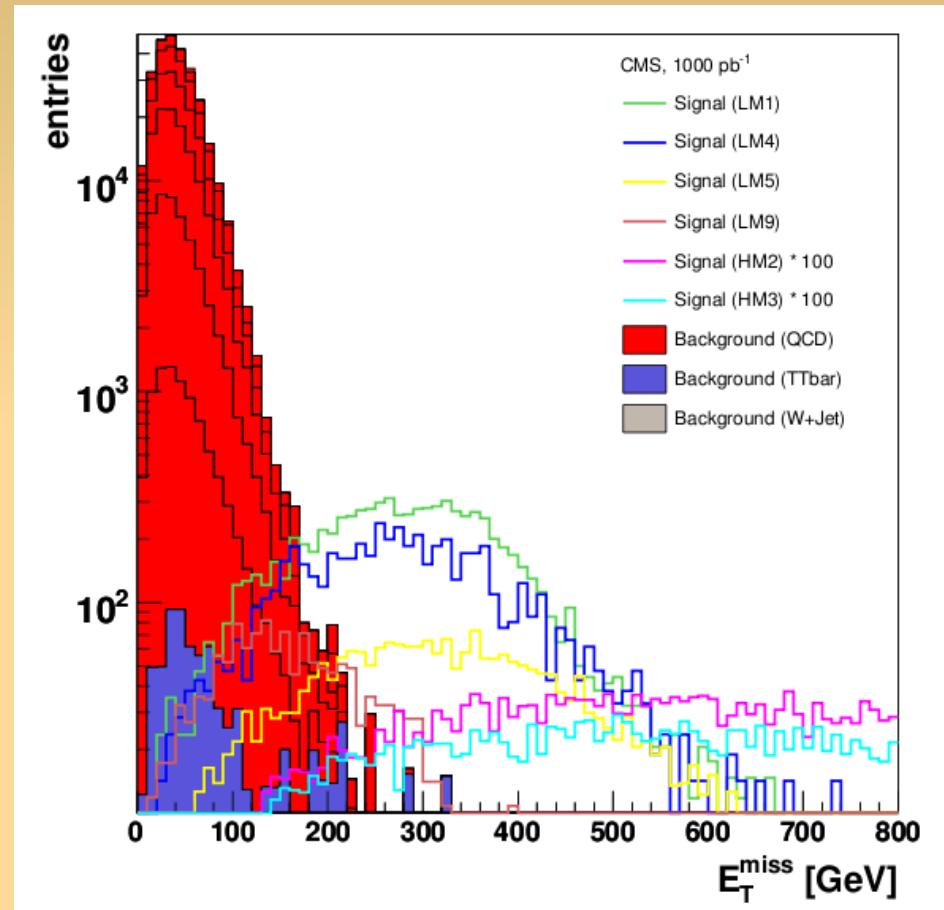
# Reduktion des Undergrundes

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

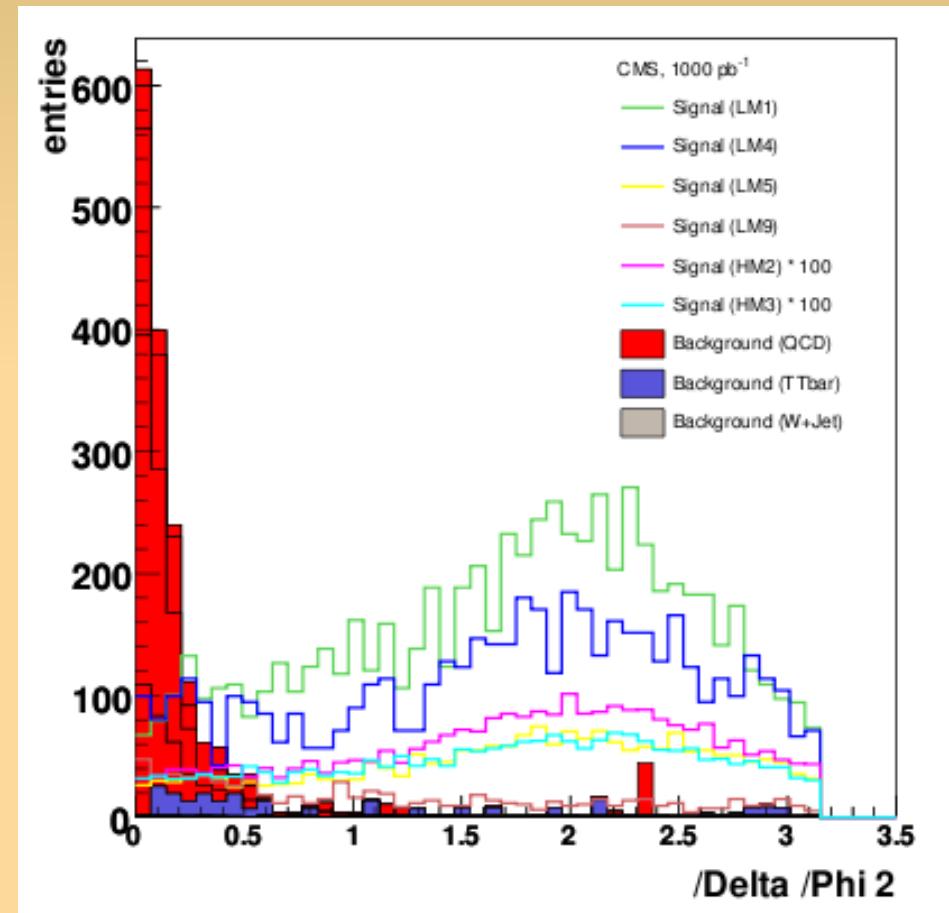
# Schnitt auf $E_{T,\text{miss}}$

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



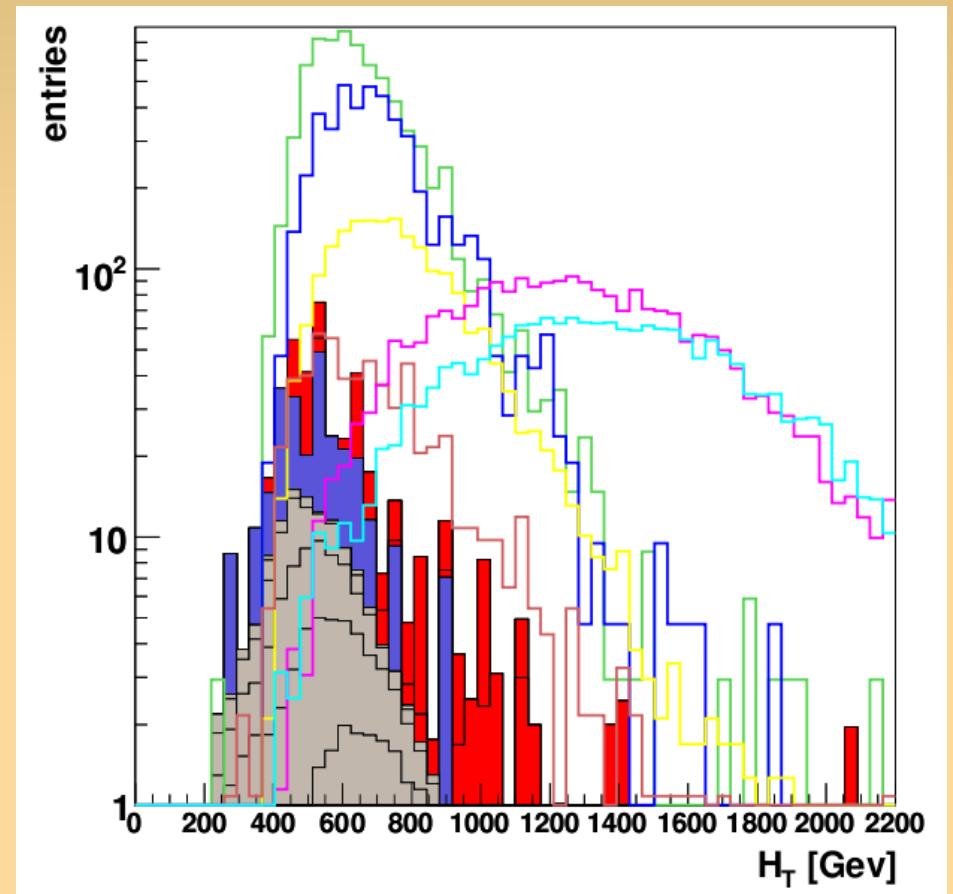
# Schnitt auf $\Delta\Phi$

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



# Härte der Jets

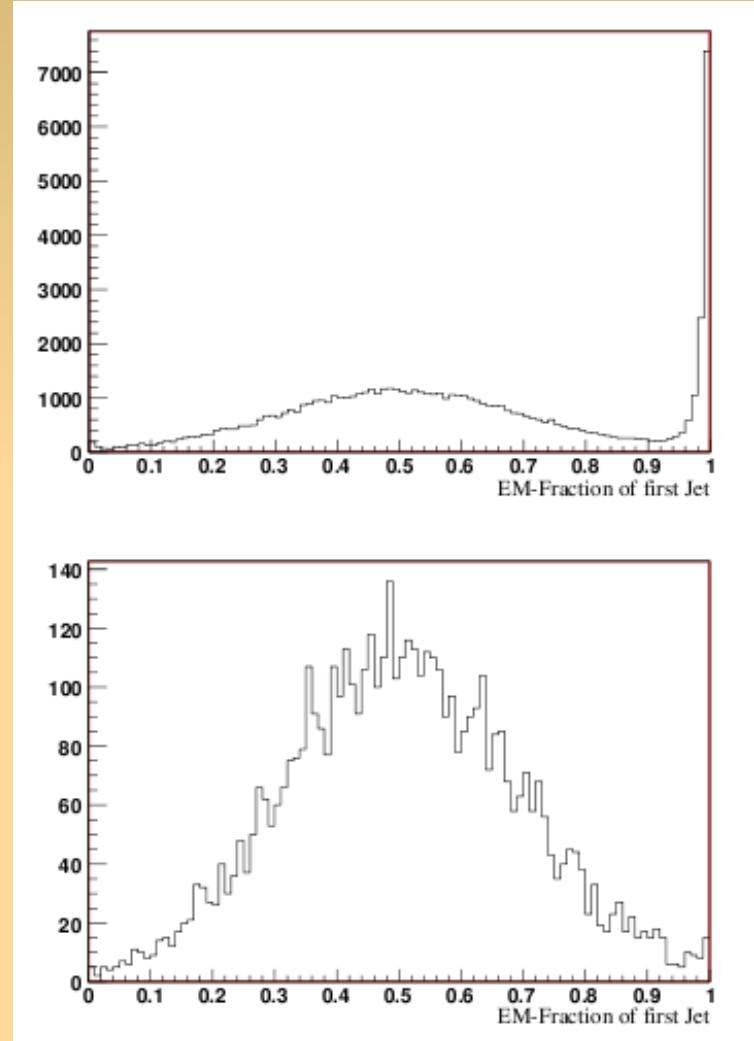
- QED Ereignisse haben niederenergetische Jets
  - ET des stärksten Jets > 180 GeV, des zweiten > 110 GeV
  - $H_T$ : Summe der Jets 2-4 +  $E_{T,\text{miss}}$  > 500 GeV



# Indirektes Lepton Veto

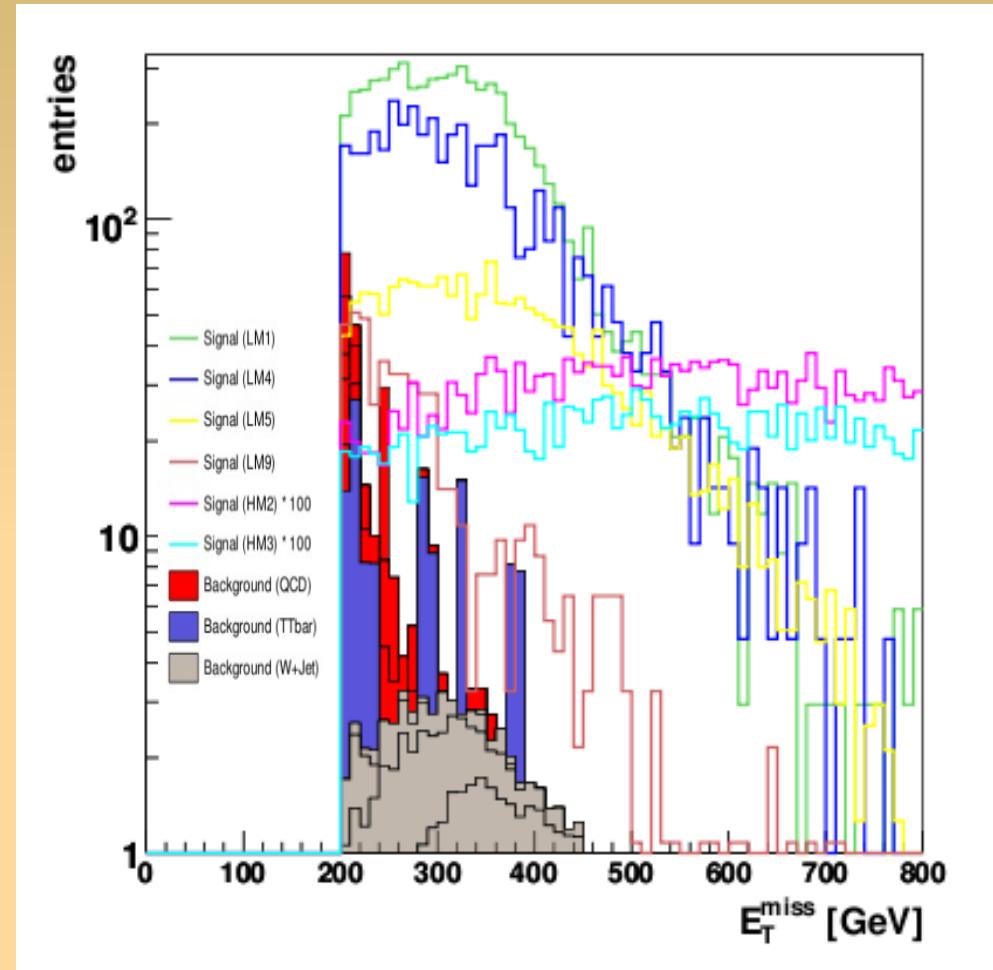
## Indirektes Lepton Veto:

- W zerfällt in Lepton und Neutrino  
→ echtes  $E_{T,\text{miss}}$
- Elektron aus W + 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  $3,9 * 10^7$  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	$31439 \pm 304$	$(3.91 \pm 0.01) \cdot 10^7$	57.3	5.0
$E_T^{miss}$	$16313 \pm 219$	$8191 \pm 430$	29.7	180.1
$\Delta\Phi$ and $R_{1,2}$ cuts	$12970 \pm 195$	$2677 \pm 366$	23.6	250.7
$H_T$	$8743 \pm 160$	$809 \pm 341$	15.9	307.4
ILV & jet $E_T$ cuts	$6355 \pm 137$	$289 \pm 90$	11.6	373.8

- Signifikanz eines Signals:

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

- Maß für die Aussagekraft eines Signals
- Schnitt auf  $E_{T,\text{miss}}$  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 intergrierte Luminosität, also mehr Zeit nach Start des LHC
- Sollte Supersymmetrie real sein, wird sie höchstwarscheinlich 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 Aquisition 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>