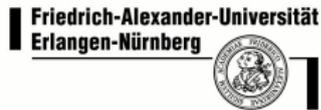
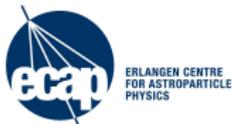


Scheinseminar Astro- und Teilchenphysik SoSe 2010

Suche nach Supersymmetrie am LHC

Robert Karl

20. Mai 2010



Gliederung

- 1 Grundlagen der Supersymmetrie
 - Physik jenseits des Standardmodells
 - Einführung in die Supersymmetrie
- 2 Experimenteller Nachweis am LHC
 - Suche nach dem Lightest Supersymmetric Particle
 - Bestimmung des Untergrundes
 - Rekonstruktion der Reaktion
- 3 Anhang
 - Zusammenfassung
 - Literatur

Grenzen des Standardmodells

- Das Standardmodell der Teilchenphysik (SM) liefert sehr gute Vorhersagen für die Experimente an Beschleunigern bis etwa 1 TeV Schwerpunktsenergie
- Dennoch ist es nicht zufriedenstellend:

Offene Fragen:

- Vereinigung der Kopplungskonstanten
- Lösung des Hierarchieproblems
- Dunkle Materie

Erweiterung des Standardmodells

- Suche nach einer Theorie, die das SM als "Spezialfall" enthält
- Viele verschiedene Theorien vorhanden
- Eine mögliche Theorie: Supersymmetrie

Bedeutung der Symmetrie in der Physik

Noether-Theorem:

Zu jeder kontinuierlichen Symmetrie eines physikalischen Systems gehört eine Erhaltungsgröße und umgekehrt

Symmetrien und Erhaltungsgrößen

Symmetrie:	Bedeutung:	Erhaltungsgröße:
Homogenität der Zeit	Translationsinvarianz	Energieerhaltung
Homogenität des Raumes	Translationsinvarianz	Impulserhaltung
Isotropie des Raumes	Rotationsinvarianz	Drehimpulserhaltung
?		Baryonenzahlerhaltung
?		Leptonenzahlerhaltung

⇒ Dies lässt Raum für weitere Symmetrien

Supersymmetrie

- Symmetrie zwischen Bosonen (Spin 1–Teilchen) und Fermionen (Spin 1/2–Teilchen)
- Es gibt nicht "DIE" Supersymmetrie:
→ Es gibt viel verschiedene Varianten
- Hier: Beschränkung auf das *Minimal Supersymmetric Standardmodel (MSSM)*

Teilchenverdopplung im MSSM

Standard Teilchen	SUSY Teilchen
<i>Fermionen (Spin 1/2)</i>	<i>Sfermionen (Spin 0)</i>
Quarks: $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$ Leptonen: $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$	Squarks: $\begin{pmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{d} \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} \tilde{c} \\ \tilde{s} \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} \tilde{t} \\ \tilde{b} \end{pmatrix}$ Sleptonen: $\begin{pmatrix} \tilde{e} \\ \tilde{\nu}_e \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} \tilde{\mu} \\ \tilde{\nu}_\mu \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} \tilde{\tau} \\ \tilde{\nu}_\tau \end{pmatrix}$
<i>Bosonen (Spin 1)</i>	<i>Bosinos (Spin 1/2)</i>
Eichbosonen: γ , g , Z^0 , W^\pm Higgs: h , H , A , H^\pm	Eichbosinos: $\tilde{\gamma}$, \tilde{g} , \tilde{Z}^0 , \tilde{W}^\pm Higgsinos: \tilde{h} , \tilde{H} , \tilde{A} , \tilde{H}^\pm
<i>(Graviton (Spin 2) (hypothetisch))</i>	<i>Gravitino (Spin 3/2) (hypothetisch)</i>

- Somit wird jedem Teilchen des SM ein Partnerteilchen mit Spinunterschied 1/2 zugeordnet
- Mischung von elektroschwachen Eichbosinos und Higgsinos
 → 2 Charginos $\tilde{\chi}_{1,2}^\pm$ und 4 Neutralinos $\tilde{\chi}_{1,2,3,4}^0$

Symmetriebrechung

- Bei einer idealen Symmetrie wären die Massen der Superpartner gleich der Teilchen des SM:

$$M_{SUSY} = M_{SM}$$

- Wäre jedoch $m_{Selektron} = m_{Elektron}$:
 - ⇒ Bereits an Beschleunigern detektiert
- Deswegen muss gelten: $M_{SUSY} > M_{SM}$

Supersymmetriebruch

Man spricht davon, dass Supersymmetrie gebrochen ist, da gilt:

$$M_{SUSY} \neq M_{SM}$$

R-Parität Erhaltung

- In der Supersymmetrie sind die Baryonen- und Leptonenzahl nicht mehr notwendigerweise eine Erhaltungsgröße
- Dies würde aber den Zerfall des freien Protons zulassen
 - wurde noch nicht beobachtet
- Die Erhaltung einer neuen multiplikativen Quantenzahl, der R-Parität P_R , wird postuliert:

$$P_R := (-1)^{3(B-L)+2S}$$

Hierbei ist B die Baryonenzahl, L die Leptonenzahl und S der Spin der Teilchen

- $P_R = 1$ für SM-Teilchen und $P_R = -1$ für SUSY Teilchen

Konsequenzen der R-Parität Erhaltung

- Keine Mischung zwischen $P_R = 1$ Teilchen und $P_R = -1$ Teilchen
- SUSY - Teilchen können nur paarweise erzeugt werden
- SUSY - Teilchen können nur in eine ungerade Anzahl von SUSY - Teilchen zerfallen
- Das leichteste SUSY - Teilchen muss stabil sein

Dunkle Materie

Das *Lightest Supersymmetric Particle* (LSP) ist:

- Aus experimentellen Beobachtungen: $M_{LSP} \gtrsim 100 \text{ GeV}$
- Aus theoretischen Gründen: $M_{LSP} < 1 \text{ TeV}$
- Wegen R-Parität: LSP ist stabil
- Wenn es neutral ist: Nur schwach wechselwirkend

⇒ Ein idealer Kandidat für die Dunkle Materie

Vereinigung der Kopplungskonstanten

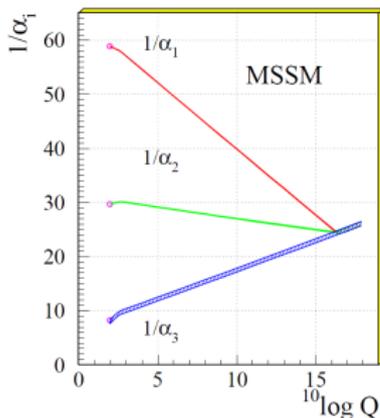
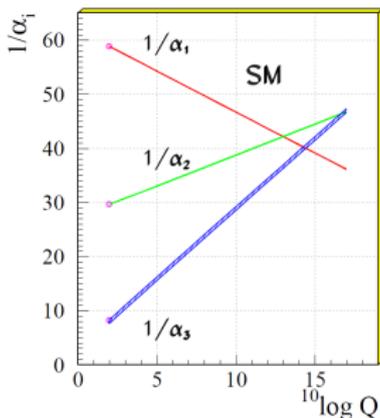


Abbildung:

Auftragung des Inversen der
 Kopplungskonstanten gegen

$Q[\text{GeV}]$

α_1 } : elektroschwache Kopplung
 α_2 }

α_3 : Starke Kopplung

- Im SM: Vereinigung der EM und der schwachen WW zur elektroschwachen WW
- In SUSY: Vereinigung aller drei WW bei $Q \approx 10^{16} \text{ GeV}$ möglich
- Grundlage für eine gemeinsame Ursache aller drei WW

minimal Super Gravity

- Im MSSM gibt es mehr als 100 freie Parameter
- Reduktion auf 5 wesentliche Parameter durch weiter vereinfachte Annahmen und ein Modell zur Symmetriebrechung
(z.B. *minimal Super Gravity (mSUGRA)*)

→ Neue Parameter:

m_0 : universelle Masse der Spin 0 Teilchen

$m_{1/2}$: universelle Masse der Spin 1/2 Teilchen

A_0 : universelle Kopplung

$\tan(\beta)$: Verhältnis der Vakuumerwartungswerte der Higgsfelder

$\text{sgn}(\mu)$: Vorzeichen des Higgsino-Mischungsparameters

mSUGRA Parameter

- häufige Betrachtung der SUSY-Massen in der m_0 - $m_{1/2}$ -Ebene, für verschiedene Werte von $\tan(\beta)$ und $\text{sgn}(\mu)$
- $\tan(\beta)$ nicht komplett frei wählbar
weitere Theorien deuten an:
 - kleiner $\tan(\beta)$ ($\tan(\beta) \approx 1 - 3$)
 - großer $\tan(\beta)$ ($\tan(\beta) \approx 30 - 70$)
- meistens wird $A_0 = 0$ gewählt

Large Hadron Collider



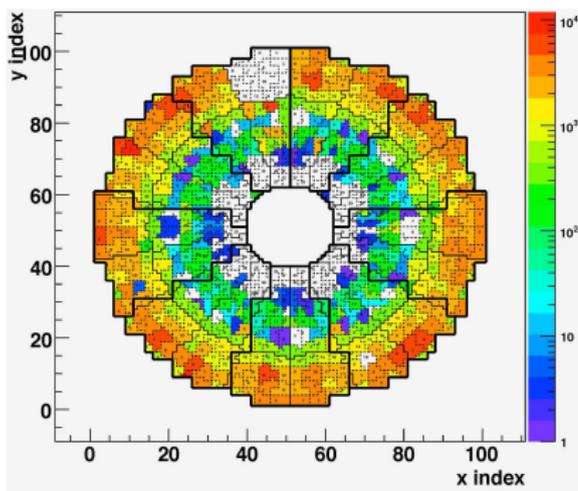
Teilchendetektion

- Teilchen werden durch Wechselwirkung im Detektor registriert
- LSP (leichtestes Neutralino $\tilde{\chi}_1^0$) wechselwirkt nur schwach
- LSP entkommt somit dem Detektor
- Frage: Wie weist man das LSP nach?

Nachweis des LSP

- LSP entkommt dem Detektor
→ fehlende transversale Energie
- transversaler Energieverlust E_T^{miss} ist messbar
- Aber: Auch SM Teilchen tragen zum transversalen Energieverlust bei
- Notwendig für den Nachweis des LSP:
 - Bestimmung des transversalen Energieverlustes E_T^{miss}
 - Eine genaue Charakterisierung des Untergrundes

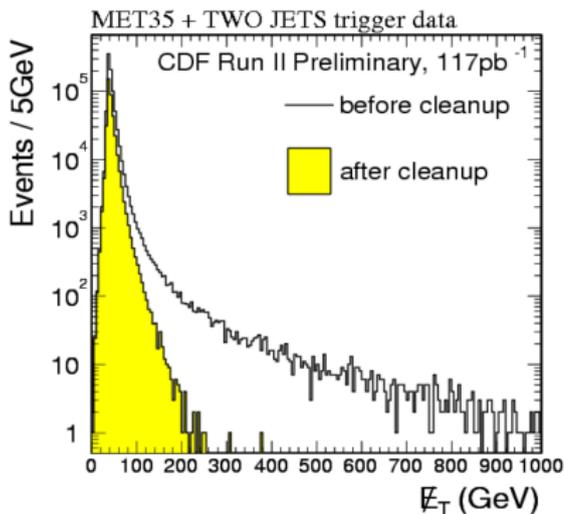
Bestimmung des transversalen Energieverlustes E_T^{miss}



- Jeder Zelle des Kalorimeters wird eine transversale Energie zugeordnet
- transversale Energie \vec{E}_T :
Vektor in transversaler Ebene
 - Richtung:
Von der Strahlachse zur Position der Zelle
 - Betrag:
gemessene Energie in der Zelle

- Wegen Impulserhaltung: $\sum \vec{E}_T = 0$
- Aber: Einige Teilchen (Neutrinos) entkommen dem Detektor:
 $\Rightarrow \sum \vec{E}_T = \vec{E}_T^{miss}$

Technische Störungen



Messung kann beeinträchtigt werden durch:

- 1 Fehlgemessene Energie:
Energie eines Teilchens oder Jets kann zu hoch oder zu niedrig bestimmt werden
- 2 Elektronisches Rauschen
kann als ein tatsächliches Signal interpretiert werden

SM Untergrund

Auch Teilchen des SM (Neutrinos) tragen zum transversalen Energieverlust bei

Wichtige Frage:

Ist der Untergrund des SM so, wie man ihn erwartet?

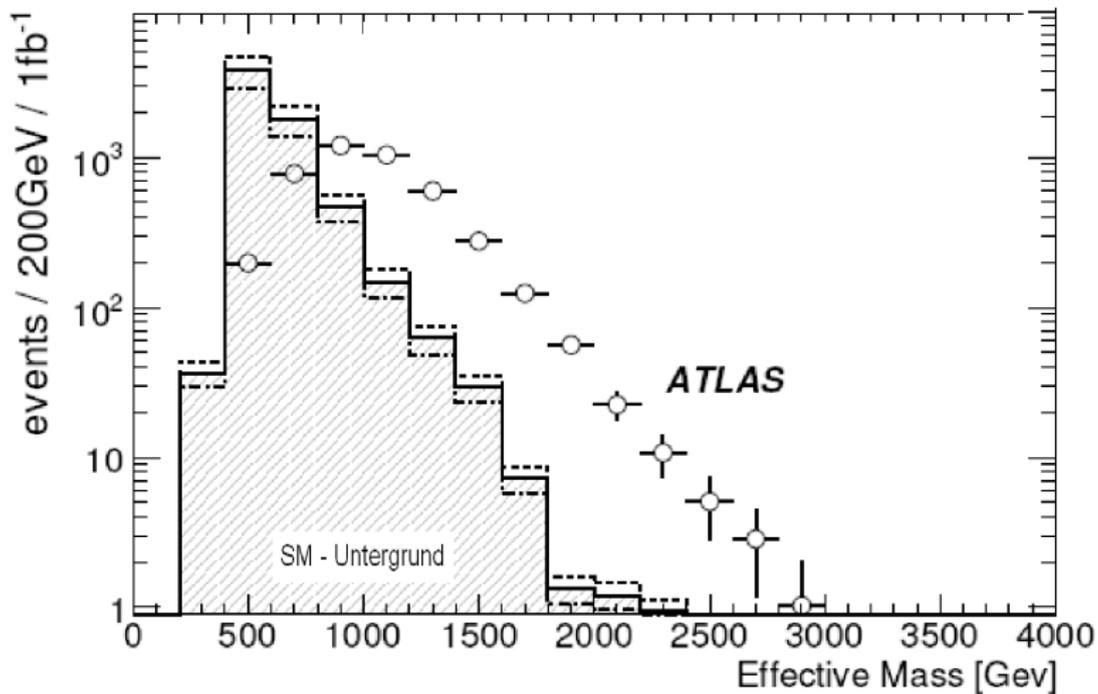
- Genaue Charakterisierung des Energieverlustes durch SM-Teilchen
- Vermeidung der Identifikation eines Neutrinos als ein LSP

Bestimmung des SM Untergrundes

Beispiel am Zerfall der Z-Bosons:

- Fehlende Energie durch die Reaktion $Z^0 \rightarrow \nu + \bar{\nu}$
- Bestimmung dieses Untergrundes durch Messung der Reaktion $Z^0 \rightarrow \mu^- + \mu^+$
- Berechnung der erwarteten $Z^0 \rightarrow \nu + \bar{\nu}$ aus dem Wirkungsquerschnitt-Verhältnis der beiden Reaktionen
- Weitere Kalibration durch:
 $W \rightarrow \mu + \nu$, $W \rightarrow e + \nu$, etc

Erwartetes Ergebnis



Nachweis von Superpartnern

In der Regel ist die Lebenszeit von allen Superpartnern kurz

- Sie zerfallen in Standard Teilchen und das LSP
- Somit ist ein direkter Nachweis schwierig
- Messung verschiedener Signaturen (Standard Teilchen) und Energieverlust (LSP)
- Rekonstruktion der Reaktionen
- Nachweis des Superpartners

Wichtige Signaturen

- Dilepton Ereignis:
→ Lepton-Antilepton Paar (+ Jets) + E_T^{miss}
(z.B. $\mu^+ \mu^-$)
- Trilepton Ereignis:
→ Lepton-Antilepton Paar + Lepton (+ Jets) + E_T^{miss}
(z.B. $\mu^+ \mu^- e^\pm$)
- Multijet Ereignis:
→ Jets + keine Lepton + E_T^{miss}

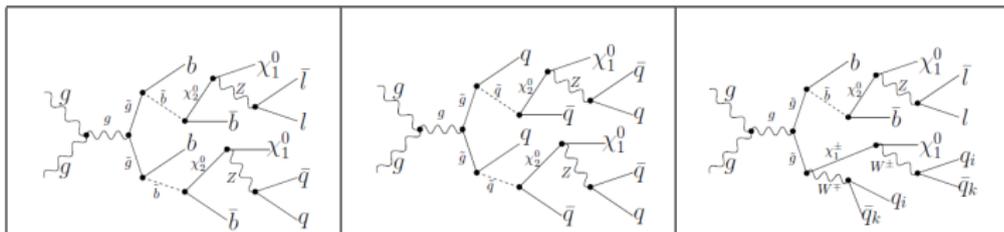
Zerfälle und Signaturen

Beispiele für Zerfälle und deren Signatur:

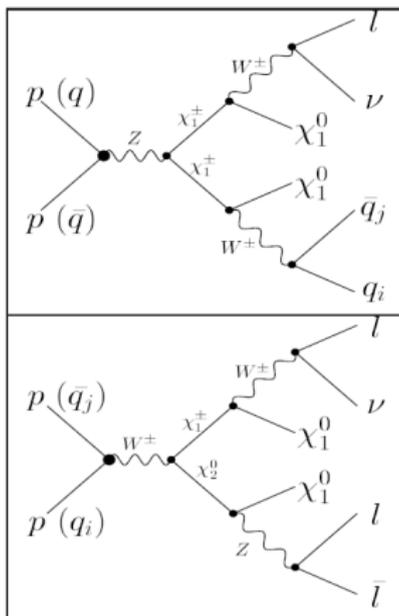
Erzeugung	Hauptzerfallsmoden	Signatur
$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{q}, \tilde{g}\tilde{q}$	$\left. \begin{array}{l} \tilde{g} \rightarrow q + \bar{q} + \tilde{\chi}_1^0 \\ q + \bar{q}' + \tilde{\chi}_1^\pm \\ g + \tilde{\chi}_1^0 \end{array} \right\} m_{\tilde{q}} > m_{\tilde{g}}$ $\left. \begin{array}{l} \tilde{q} \rightarrow q + \tilde{\chi}_i^0 \\ \tilde{q} \rightarrow q' + \tilde{\chi}_i^\pm \end{array} \right\} m_{\tilde{g}} > m_{\tilde{q}}$	$E_T^{miss} + \text{Multijets (+Leptons)}$
$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$	$\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + l^\pm + \nu, \tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + l^- + l^+$ $\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + q + \bar{q}', \tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + l^- + l^+$	Trilepton + E_T^{miss} Dilepton + E_T^{miss}
$\tilde{\chi}_1^+, \tilde{\chi}_1^-$	$\tilde{\chi}_1^+ \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + l^+ + \nu, \tilde{\chi}_1^- \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + l^- + \nu$	Dilepton + E_T^{miss}
$\tilde{\chi}_i^0, \tilde{\chi}_i^0$	$\tilde{\chi}_i^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + X, \tilde{\chi}_i^- \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + X'$	Dilepton + Jet + E_T^{miss}
$\tilde{l}, \tilde{l}\tilde{\nu}, \tilde{\nu}\tilde{\nu}$	$\tilde{l}^\pm \rightarrow l^\pm + \tilde{\chi}_i^0, \tilde{l}^\pm \rightarrow \nu_l + \tilde{\chi}_i^\pm$ $\tilde{\nu} \rightarrow \nu + \tilde{\chi}_1^0$	Dilepton + E_T^{miss} singel Lepton + E_T^{miss}

Erzeugung von Superpartnern

- Es gibt viele Möglichkeiten, Superpartner am LHC zu erzeugen (z.B. Gluon-Fusion, Quark-Antiquark, Quark-Gluon Streuung,...)
- Maximaler Wirkungsquerschnitt (einige pb) wird durch Gluon-Fusion erzielt.
- Beispiele für die Erzeugung von Gluinos durch Gluon-Fusion:



Quark-Antiquark-Annihilation



Erzeugung von Superpartnern durch Annihilation von einem Quark eines Protons mit einem Antiquark eines anderen Protons (Drell-Yan-Mechanismus)

2 mögliche Beispiele:

- ① gleicher Quark-Flavour (oberes Bild)
- ② verschiedene Quark-Flavour (unteres Bild)

Erwartetes Ergebnis

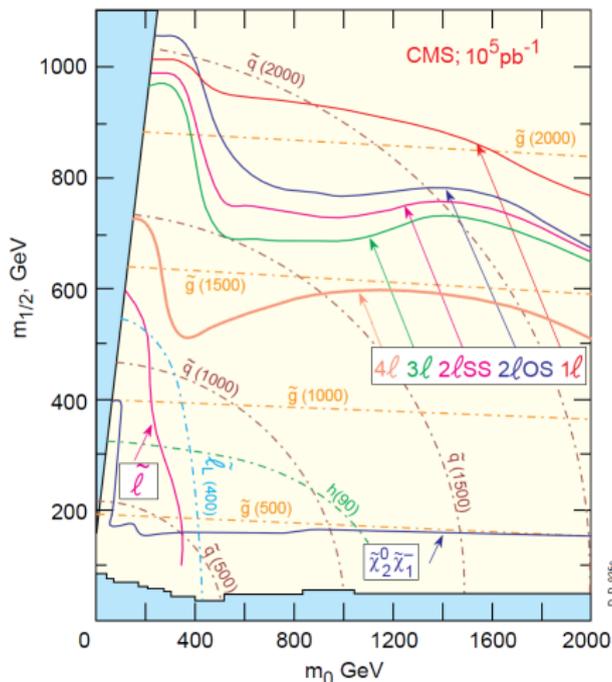


Abbildung: $\tan(\beta) = 2$, $A_0 = 0$, $\mu < 0$, $L_{int} = 10^5 pb^{-1}$

- Die Linien der konstanten Squark Massen bilden die gebogenen Kurven
- Die Linien der konstanten Gluino Massen bilden die nahezu horizontalen Linien
- Bei günstigen Umständen können Massen bis zu 2 TeV beobachtet werden
- Bei höheren Luminositäten sind noch höhere Massen beobachtbar

Zusammenfassung

- Supersymmetrie ist eine von viele Theorien, um das Standardmodell zu erweitern
- MSSM liefert gute Antworten auf die offenen Fragen des SM
- Wenn die Supersymmetrie in der Größenordnung von 1 TeV liegt, wird sie am LHC gefunden

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Literatur

- <http://www.physik.uzh.ch/~kmueller/text/vorlesung/susy/susy.html>
- Discovery potential for supersymmetry in CMS
<http://arxiv.org/abs/hep-ph/9806366>
- Beyond the Standard Model (In Search of Supersymmetry)
<http://arxiv.org/abs/hep-ph/0012288>
- Beyond the Standard Model for Hillwalkers
<http://arxiv.org/abs/hep-ph/9812235>
- Supersymmetry and LHC
<http://arxiv.org/abs/hep-ph/0606288>
- Searching for Supersymmetry at the LHC
http://physics.lbl.gov/shapiro/Physics290e/290E_berkeley_vahsen.pdf
- Supersymmetrie von Jan Uphoff
<http://th.physik.uni-frankfurt.de/~uphoff/media/susy.pdf>
- Fehlende transversale Energie
http://www.thphys.uni-heidelberg.de/~plehn/stusti/V16_Fehlende%20Transversale%20Energie_LisaMoevius.pdf
- Jets and Missing Transverse Energy Reconstruction with CMS
<http://arxiv.org/abs/0904.0391>