Supersymmetrie am LHC
Entdeckungen und Messungen

Tilman Plehn

CERN

– Supersymmetrie am LHC

– Entdeckung

– Messungen

– Detail–Studien

SUPERSYMMETRIE AN DER TEV–SKALA: 1

Am Anfang waren die Daten...

- ⋆ ...die auf ein leichtes fundamentales Higgs hindeuten
- ⋆ Problem des leichten Higgs:
  Massen skalarer Felder instabil durch Loops
  quadratische Divergenzen $\delta m_h^2 \propto g^2\Lambda^2$
  korrigierte Higgs–Masse am Cutoff $m_h \to \Lambda$
  Lösung: Counterterm mit exakter Aufhebung
  $\Rightarrow$ künstlich, unmotiviert und hässlich [anthropisches Prinzip?]

$\Rightarrow$ Alternative: neue Physik an der TeV–Skala

$\Rightarrow$ SUperSYmmetrie
Extra–Dimensionen
Little Higgs (Pseudo–Goldstone)
Topcolor (zusammengesetztes Higgs)
YourFavoriteNewPhysics...

$\Rightarrow$ ästhetische Konzepte und Symmetrien

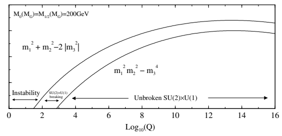
$\Rightarrow$ allgemein problematische Realisierung an TeV–Skala [Daten störend]

Grund-Idee von Supersymmetrie

- ⋆ Aufhebung quadratischer Divergenzen durch Statistik–Faktor (-1):
  skalare Partner von SM–Fermionen
  fermionische Partner von SM–Eichbosonen
  fermionische Partner von SM–Skalaren

$\Rightarrow$ offensichtlich gebrochene Symmetrie

SUPERSYMMETRIE AN DER TEV–SKALA: 2



Sonnenseiten

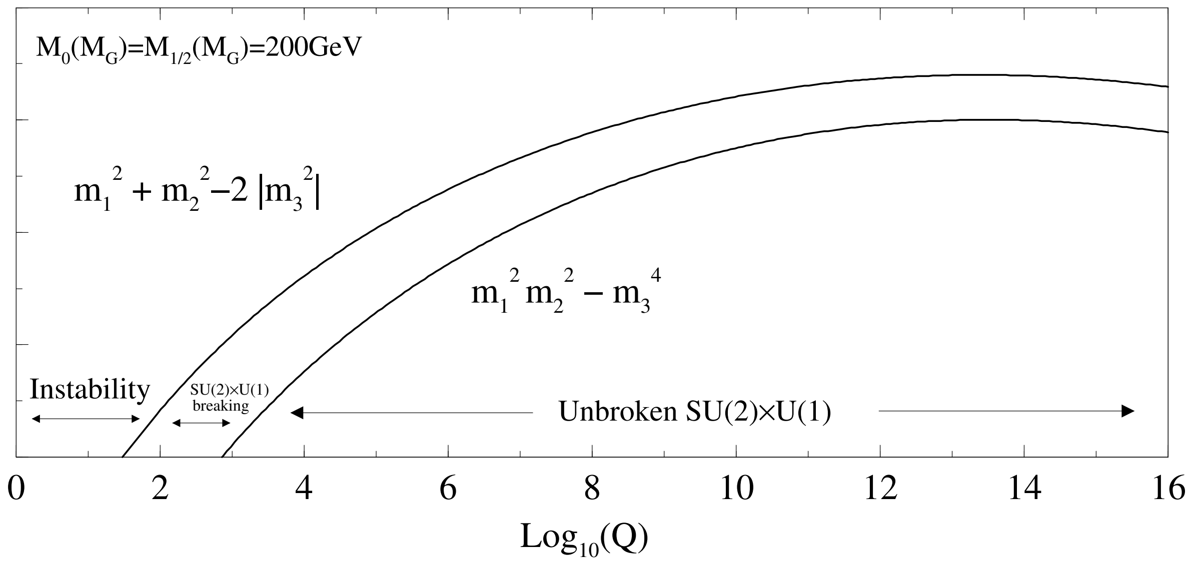
- ⋆ radiative Symmetriebrechung — 2 Higgs–Dubletts
- ⋆ R–Parität — stabiles Proton liefert dunkle Materie
- ⋆ Vereinheitlichung — 3 laufende Kopplungen treffen sich
- ⋆ lokale Supersymmetrie — Licht am Ende des Theorie–Tunnels?
- ⋆ breite Anforderungen an LHC — keine Überraschungen

Schattenseiten

- ⋆ unbekannte SUSY–Brechung
  $\longrightarrow$ weiche Brechung ohne quadratische Divergenzen
  $\longrightarrow$ 100+ Parameter: Massen, skalare Kopplungen, Phasen...
- ⋆ Flavor–Physik — CKM und Leptonflavor durch SUSY–Brechung?
  2HDM — μ–Parameter durch SUSY–Brechung? [Giudice, Masiero]
- ⋆ MSSM-Spektrum

		Spin	Ladung	Freiheitsgrade	
Quark	q_L, q_R	1/2	2/3 , −1/3	1+1	
$\rightarrow$ Squark	$\tilde{q}_L, \tilde{q}_R$	0	2/3 , −1/3	1+1	6 Flavors
Gluon	G_μ	1	0	$n-2$	
$\rightarrow$ Gluino	$\tilde{g}$	1/2	0	2	Majorana
Eichbosonen	γ, Z	1	0	2+3	
Higgs–Bosonen	h^o, H^o, A^o	0	0	3	
$\rightarrow$ Neutralinos	$\tilde{\chi}_i^o$	1/2	0	$4 \cdot 2$	Majorana
Eichbosonen	$W^\pm$	1	±1	$2 \cdot 3$	
Higgs–Bosonen	$H^\pm$	0	±1	2	
$\rightarrow$ Charginos	$\tilde{\chi}_i^\pm$	1/2	±1	$2 \cdot 4$	Dirac

$\Rightarrow$ Analysen unabhängig von SUSY–Brechung?



$[m_i^2 = m_{H_i}^2 + \mu^2]$ [Dedes]

Supersymmetrie an der TeV–Skala: 3

Strukturen im SUSY–Spektrum

⋆ Gauginos–Higgsinos: $m_{\tilde\chi^0_2} \sim m_{\tilde\chi^+_1}$ oder $m_{\tilde\chi^0_1} \sim m_{\tilde\chi^+_1}$ im MSSM

$$\begin{pmatrix} m_{\tilde B} & 0 & \mathcal{O}(m_Z) & \mathcal{O}(m_Z) \\ 0 & m_{\tilde W} & \mathcal{O}(m_Z) & \mathcal{O}(m_Z) \\ \mathcal{O}(m_Z) & \mathcal{O}(m_Z) & 0 & -\mu \\ \mathcal{O}(m_Z) & \mathcal{O}(m_Z) & -\mu & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} m_{\tilde W} & \mathcal{O}(m_W) \\ \mathcal{O}(m_W) & -\mu \end{pmatrix}$$

⋆ Stop– und Sbottom–Mischung im MSSM

$$\begin{pmatrix} m^2_{\tilde Q} + m^2_t + \mathcal{O}(m_Z) & -m_t\,(A_t + \mu\cot\beta) \\ -m_t\,(A_t + \mu\cot\beta) & m^2_{\tilde U} + m^2_t + \mathcal{O}(m_Z) \end{pmatrix}$$

⋆ schwere Gluinos und Squarks durch Vereinheitlichung

$m_{\tilde B, \tilde W, \tilde g}/m_{1/2} \sim 0.4, 0.8, 2.6$

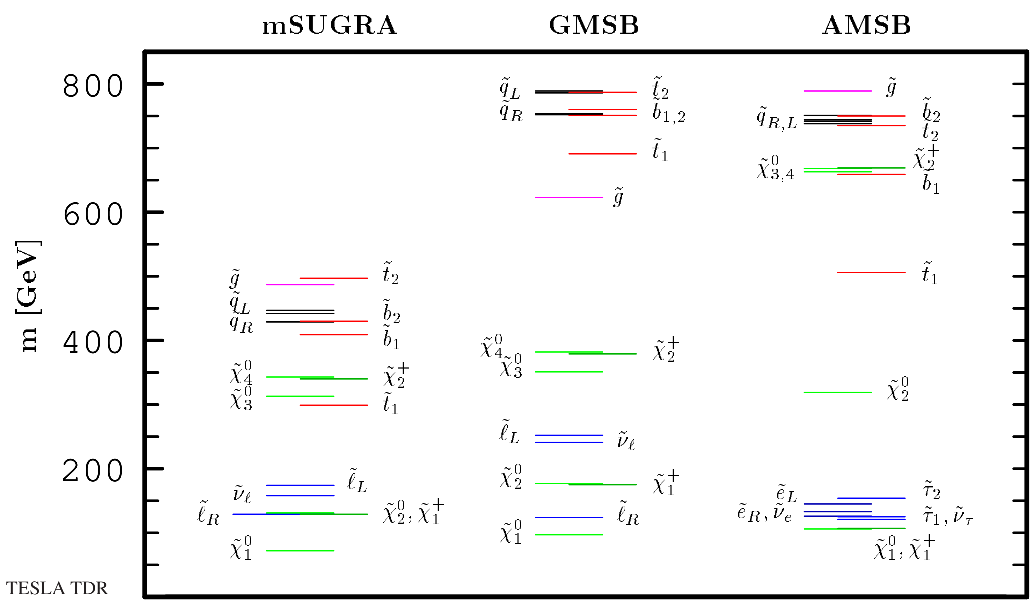
$m_{\tilde\ell, \tilde q}/m_{1/2} \sim 0.7, 2.5 \quad [m_0 \ll m_{1/2}]$

n.b. Massen– und Kopplungs–Vereinigung unabhängig [Hooper, TP]

⋆ leichtester SUSY–Partner: $\tilde\chi^0_1, \tilde\nu$

$\longrightarrow$ inklusive Daten zu dunkler Materie: $\tilde\chi^0_1 \sim \tilde B, \tilde W$

Beispiel–Spektren



SUSY–SIGNALE AM LHC: 1

Entdeckung von Supersymmetrie

1 Entdeckung — Signale für neue Physik, möglicherweise SUSY?

2 Messung — Massen, Wirkungsquerschnitte, Zerfälle?

3 Detailstudien — MSSM–Lagrangean, SUSY–Brechung?

$\Rightarrow$ berechtigte Zweifel an SUSY jederzeit angebracht

Herausforderung: unübersehbare SUSY–Signale am LHC

- $\star$ Jets und $\not{E}_T$: $pp \to \tilde{q}\tilde{q}^*, \tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{g}$ $\quad [\tilde{q} \to q\tilde{\chi}_1^0; \tilde{g} \to \tilde{q}\bar{q} \to q\bar{q}\tilde{\chi}_1^0]$
- $\star$ Bottoms und $\not{E}_T$: $pp \to \tilde{b}_1\tilde{b}_1^*$ $\quad [\tilde{b}_1 \to b\tilde{\chi}_1^0]$
- $\star$ Dileptonen gleicher Ladung: $pp \to \tilde{g}\tilde{g}$ $\quad [\tilde{g} \to \tilde{u}\bar{u} \to \tilde{\chi}_1^+ d\bar{u}$ oder c.c.]
- $\star$ Trileptonen ohne Z–Pol: $pp \to \tilde{\chi}_2^0\tilde{\chi}_1^-$ $\quad [\tilde{\chi}_2^0 \to \tilde{\ell}\bar{\ell} \to \tilde{\chi}_1^0\ell\bar{\ell}; \tilde{\chi}_1^- \to \tilde{\chi}_1^0\ell\bar{\nu}]$
- $\star$ unpassende Tops: $pp \to \tilde{t}_1\tilde{t}_1^*$ $\quad [\tilde{t}_1 \to b\tilde{\chi}_1^+ \to b\bar{\ell}\nu\tilde{\chi}_1^0]$
- $\star$ ..... [weitere Ideen herzlich willkommen]

$\Rightarrow$ Erfahrungen aus Tevatron–Suchen

Exakte NLO–Vorhersage der Wirkungsquerschnitte [Prospino]

- $\star$ Massenbestimmung in inklusiven Analysen
- $\star$ Verzweigungsverhältnisse in Kaskaden–Analysen [Sdecay: Mühlleitner]
- $\star$ bisher leider: Ausschlussgrenzen für SUSY–Teilchen

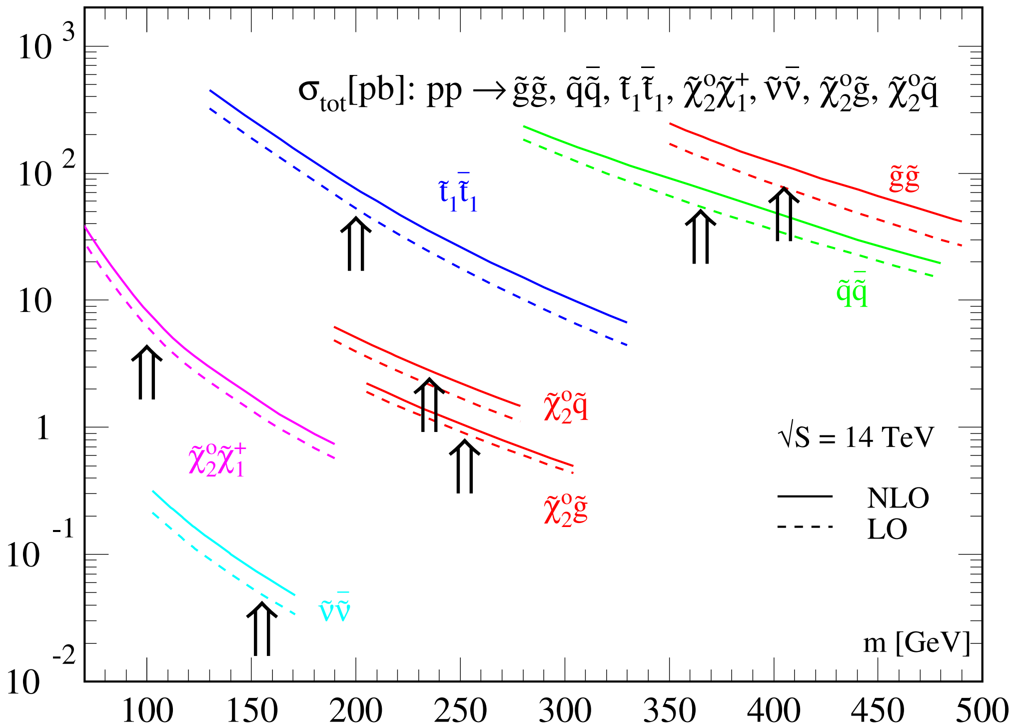
SUSY–SIGNALE AM LHC: 2

(SUSY)–QCD–Korrekturen für inklusive Prozesse

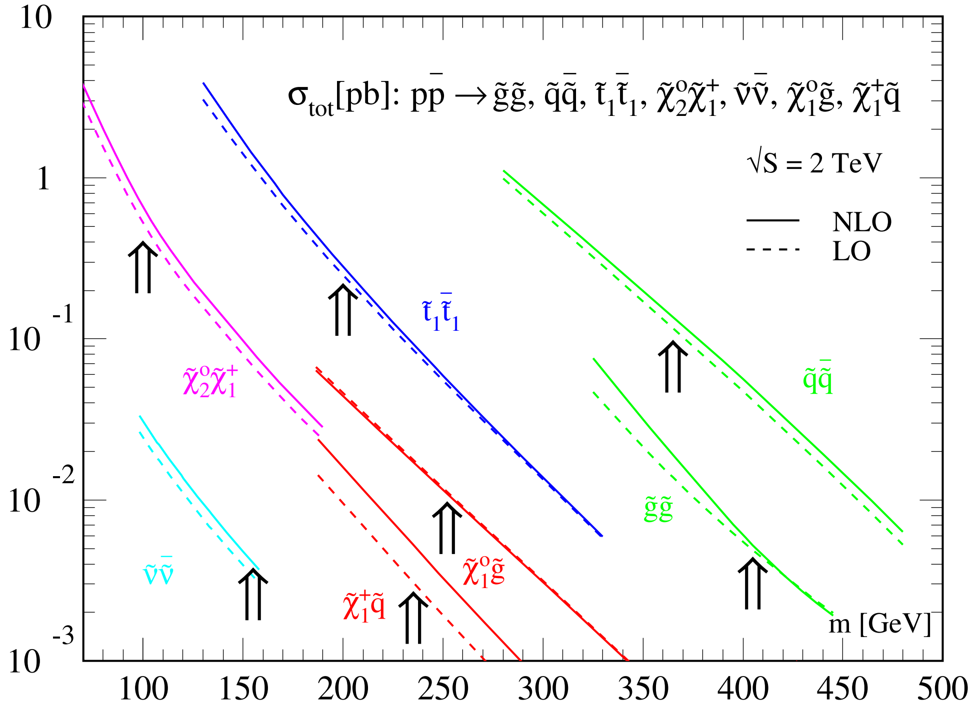
- ⋆ grosse QCD–Korrekturen für Squarks, Stops & Gluinos
- ⋆ kleine SUSY–Effekte für Stops
- ⋆ DY–artige QCD–Korrekturen für Neutralinos, Charginos, Sleptonen
- ⋆ sichtbare QCD–Korrekturen für Neutralino+Squark
- ⋆ kleine QCD–Korrekturen für Neuralino+Gluino
- ⋆ technisch korrekt: divergente Zwischenzustände, Renormierung,...
- ⋆ Les–Houches–Interface zu Pythia, SoftSusy, FeynHiggs, etc.

$\Rightarrow$ Prospino2.0beta öffentlich [http://pheno.physics.wisc.edu/∼plehn]

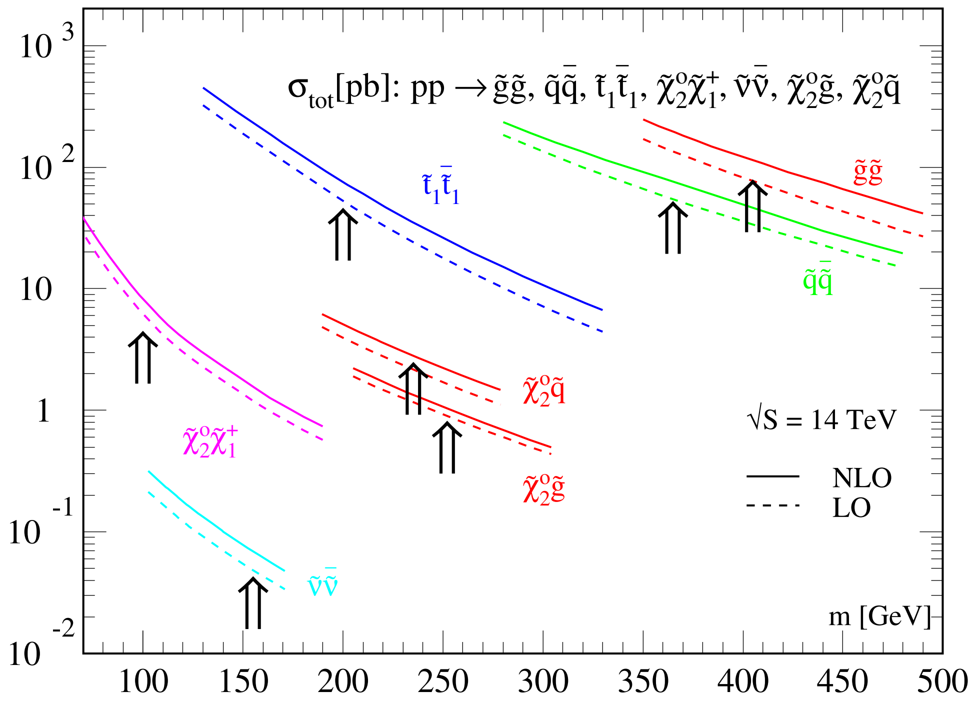
ProspinoPropagandaPlot



[Beenakker, Höpker, Krämer, TP, Spira, P. Zerwas]



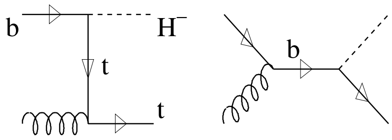
σ_{tot}[pb]: $p\bar{p} \to \tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\bar{\tilde{q}}, \tilde{t}_1\bar{\tilde{t}}_1, \tilde{\chi}_2^o\tilde{\chi}_1^+, \tilde{\nu}\bar{\tilde{\nu}}, \tilde{\chi}_1^o\tilde{g}, \tilde{\chi}_1^+\tilde{q}$
$\sqrt{S}$ = 2 TeV
NLO
LO
$\tilde{t}_1\bar{\tilde{t}}_1$
$\tilde{q}\bar{\tilde{q}}$
$\tilde{\chi}_2^o\tilde{\chi}_1^+$
$\tilde{g}\tilde{g}$
$\tilde{\nu}\bar{\tilde{\nu}}$
$\tilde{\chi}_1^o\tilde{g}$
$\tilde{\chi}_1^+\tilde{q}$
m [GeV]



σ_{tot}[pb]: $pp \to \tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\bar{\tilde{q}}, \tilde{t}_1\bar{\tilde{t}}_1, \tilde{\chi}_2^o\tilde{\chi}_1^+, \tilde{\nu}\bar{\tilde{\nu}}, \tilde{\chi}_2^o\tilde{g}, \tilde{\chi}_2^o\tilde{q}$
$\tilde{t}_1\bar{\tilde{t}}_1$
$\tilde{g}\tilde{g}$
$\tilde{q}\bar{\tilde{q}}$
$\tilde{\chi}_2^o\tilde{q}$
$\tilde{\chi}_2^o\tilde{\chi}_1^+$
$\sqrt{S}$ = 14 TeV
NLO
LO
$\tilde{\chi}_2^o\tilde{g}$
$\tilde{\nu}\bar{\tilde{\nu}}$
m [GeV]

SUSY–SIGNALE AM LHC: 3

SUSY–Signal: geladenes Higgs–Boson



⋆ kein adjungiertes Higgs–Feld im Superpotential

$\rightarrow$ 2 Dubletts für Top– und Bottom–Masse [$\tan\beta$]

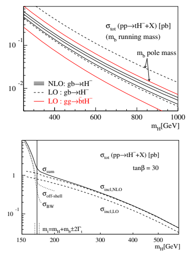
$\rightarrow$ geladener Higgs–Skalar [$H^- \rightarrow \tau\bar{\nu}, \bar{t}b, W^- h^0$]

⋆ Produktionskanal $bg \rightarrow tH^-$ [Prospino2.1, CMS: Nikitenko, ATLAS: Assamagan]

(a) konzeptionell: bottom–Partonen [Boos & TP]

(b) experimentell: Messung von $\tan\beta$ [LH 2003]

SUSY–Signal: geladenes Higgs–Boson



⋆ QCD–Korrekturen unter Kontrolle

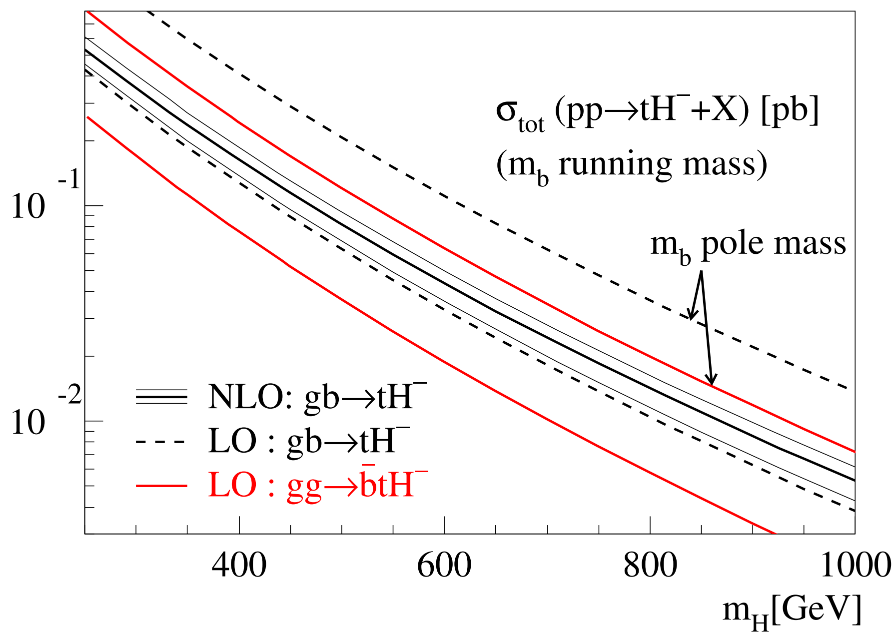
⋆ Top im Zwischenzustand subtrahiert

⋆ faktorisierende SUSY–Terme [resummierbar: Nierste,...]

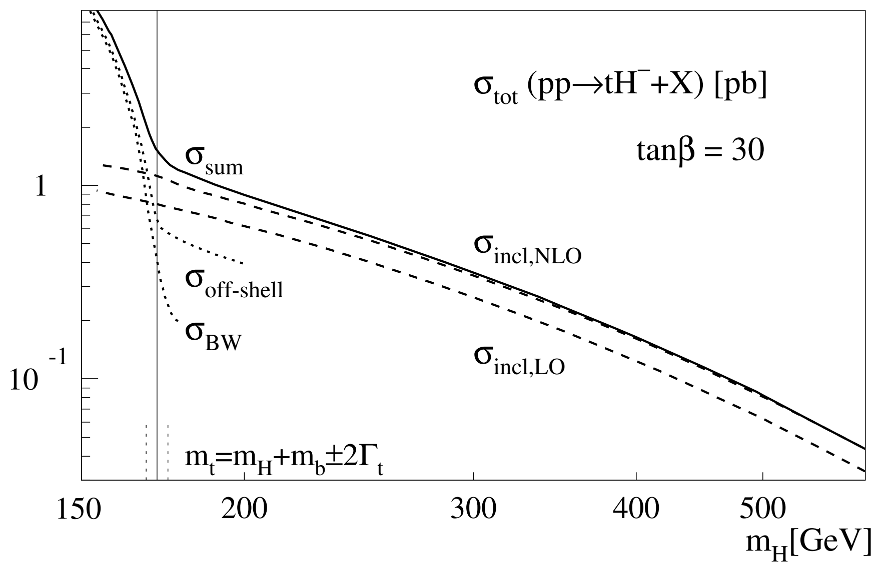
Yukawa–Renormierung $\Delta_b = \alpha_s C_F/(2\pi) \times m_{\tilde{g}}\mu/M^2 \ \tan\beta$

⋆ explizite SUSY–Diagramme vernachlässigbar

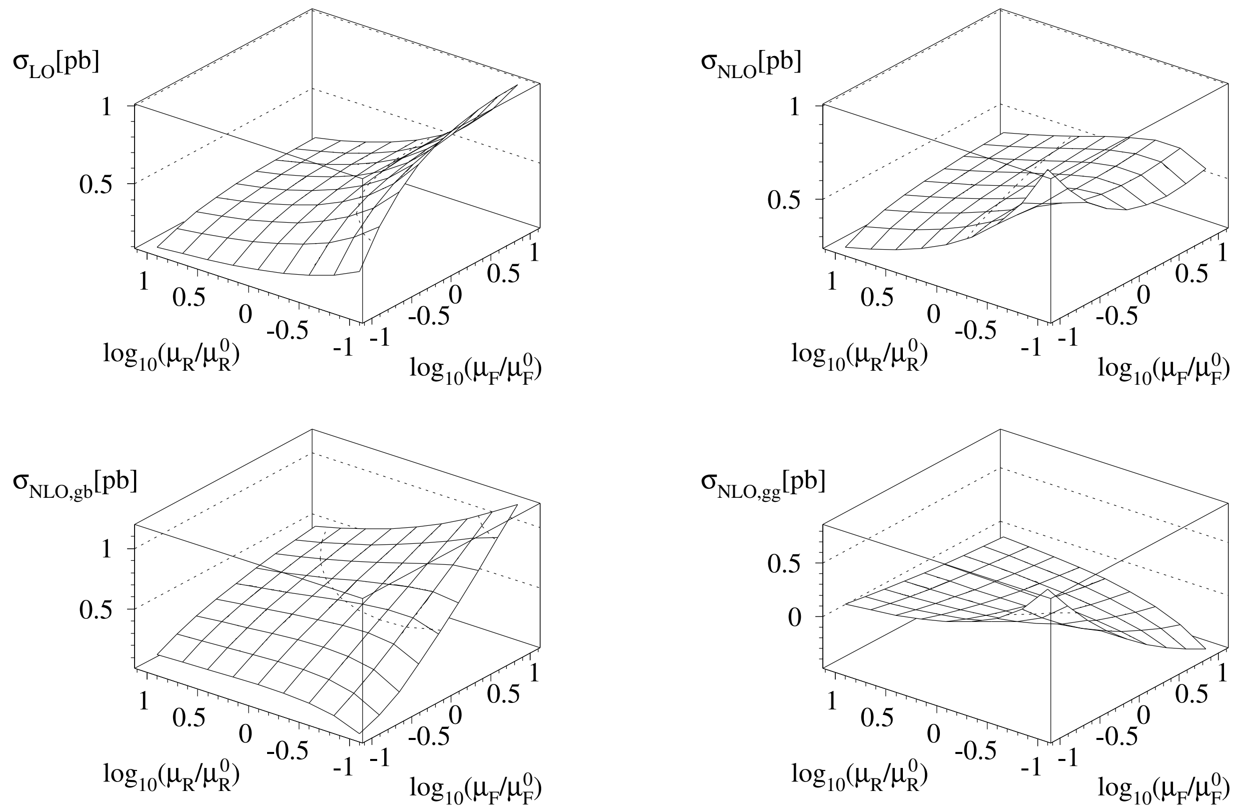
mSUGRA	m_H	$\tan\beta$	$m_{1/2}$	μ	σ_{NLO}[fb]	Δ_b	Δ_b^{resum}	non–Δ_b
1a	402	10	250	352	25.6	-11.0%	-10.2%	-1.9%
1b	543	30	400	501	61.7	-27.9%	-23.5%	-4.6%
2	1446	10	300	125	0.13	-0.92%	-0.91%	-1.7%
3	578	10	400	509	8.02	-10.1%	-9.5%	-1.1%
4	416	50	300	377	395	-39.0%	-31.0%	-4.6%
5	699	5	300	640	5.73	-8.5%	-8.0%	0.8%
GMSB								
7	387	15		300	48.0	-8.5%	-8.1%	-0.9%
8	521	15		398	20.4	-7.5%	-7.1%	-0.5%
AMSB								
9	916	10		870	1.29	-10.6%	-9.9%	4.1%



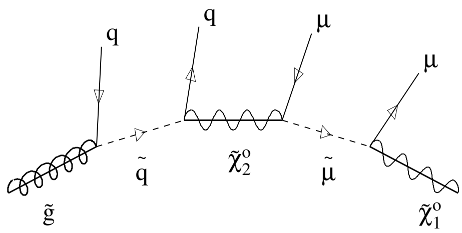
σ_tot (pp→tH⁻+X) [pb]
(m_b running mass)
m_b pole mass
NLO: gb→tH⁻
LO : gb→tH⁻
LO : gg→b̄tH⁻
10^-1
10^-2
400
600
800
1000
m_H[GeV]



σ_tot (pp→tH⁻+X) [pb]
tanβ = 30
σ_sum
σ_incl,NLO
σ_off-shell
σ_BW
σ_incl,LO
m_t=m_H+m_b±2Γ_t
1
10^-1
150
200
300
400
500
m_H[GeV]

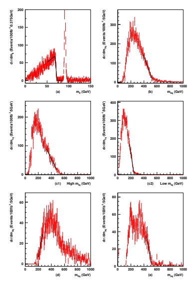

σLO[pb]
1
0.5
1
0.5
0
-0.5
-1
log10(μR/μR0)
-1
-0.5
0
0.5
1
log10(μF/μF0)
σNLO[pb]
σNLO,gb[pb]
σNLO,gg[pb]

SUSY–MESSUNGEN AM LHC: 1



SUSY–Spektren aus Zerfallskaskaden

- ⋆ Zerfall $\tilde{g} \to \tilde{q}\bar{q} \to \tilde{\chi}^0_2 q\bar{q} \to \mu^+\mu^- q\bar{q}\tilde{\chi}^0_1$ [hoffentlich nicht via Z]
- ⋆ Wirkungsquerschnitte einige 100 pb [mehr als 3×10^5 events]
- ⋆ Schwellen & Ecken in Spektren [Allanach, Lester, Parker, Webber]
  Klassiker $m^2_{\ell\ell} < (m^2_{\tilde{\chi}^0_2} - m^2_{\tilde{\ell}})(m^2_{\tilde{\ell}} - m^2_{\tilde{\chi}^0_1})/m^2_{\tilde{\ell}}$
  kritisch: genügend Schwellen und Ecken messbar?



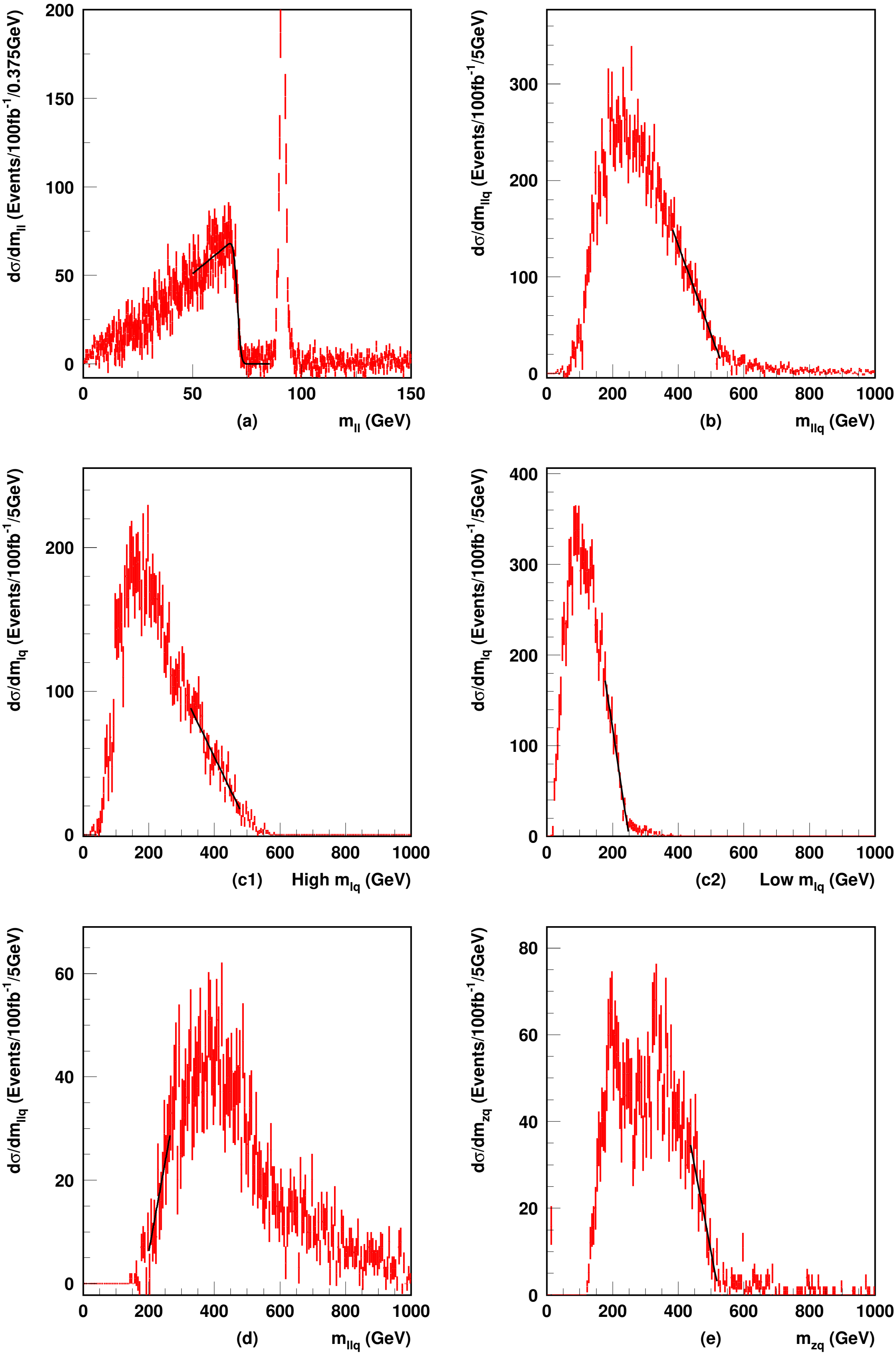
$\Rightarrow$ Detektorauflösung, Kalibrierung, systematische Fehler?

Detailstudien für SPS–Punkte [Polesello et al.]

- ⋆ Gluino–Masse in $\tilde{g} \to \tilde{b}\bar{b}$
- ⋆ Higgsino–Massen in $\tilde{q}_L \to q\tilde{\chi}^0_4, \tilde{q}_L \to \tilde{\chi}^\pm_2 q$
- ⋆ Chargino-Masse in $\tilde{q} \to q\tilde{\chi}^\pm_1 \to qW^\pm_{\rm had}\tilde{\chi}^0_1$ [Nojiri, Polesello, Tovey]
- ⋆ Slepton–Masse in $\tilde{\ell} \to \ell\tilde{\chi}^0_1$
- ⋆ ....

$\Rightarrow$ generisch für kleine $\tan\beta$–Werte
Probleme mit b–Jets und τ–Leptonen für grosses $\tan\beta$

$\Rightarrow$ essentiell für SUSY–Parameter–Bestimmung [Sfitter–Ergebnisse später]



[Allanach, Lester, Parker, Webber]

SUSY–MESSUNGEN AM LHC: 2

Problem in Zerfalls–Studien

⋆ typische Schnitte: $p_{T,j} > 150, 100, 50, 50$ GeV
mutigere Analysen: $p_{T,j} > 100, 100, 40, 20$ GeV

⋆ (a) Schnitte auf $p_{T,j}$–Hierarchie?
(b) kombinatorischer Untergrund durch Jet–Abstrahlung?

⇒ Matrixelemente $pp \to X_{\text{SUSY}} Y_{\text{SUSY}} +$ harte Jets
gute Erfahrungen mit Higgs+Jets [Zeppenfeld, Rainwater; Jacobs, Mellado]

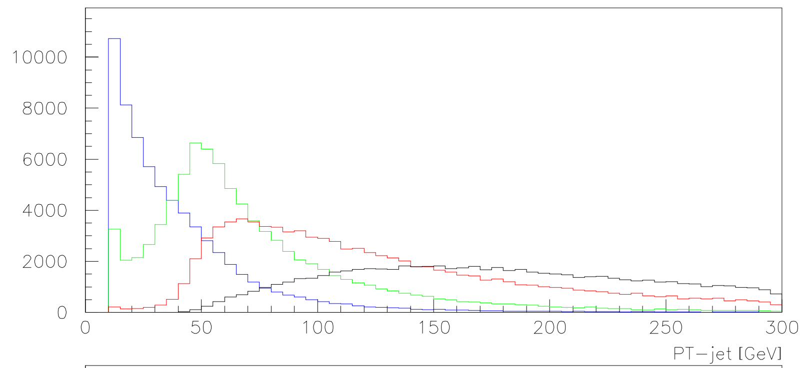
⇒ SMadgraph [Hagiwara, Kanzaki, TP, Rainwater, Stelzer]

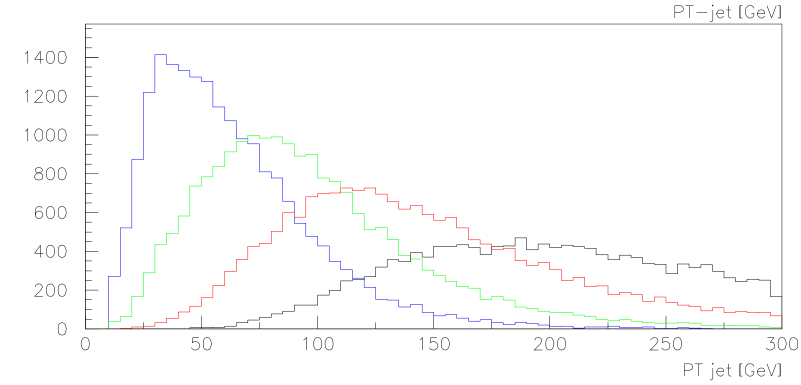
Solange wir SMadgraph noch testen...

⋆ ...vorläufige Madevent–Ergebnisse für $pp \to ZZ +$ Jets

⋆ Untergrund zu SUSY–Kaskaden mit $\tilde{\chi}^0_3 \to Z$ [D. Zerwas, TP]

⋆ $p_{T,j} > 50$ GeV: $\sigma = \{2500, 1100, 560\}$ fb für $pp \to ZZ$+{1,2,3} Jets





PARAMETER–BESTIMMUNG AM LHC: 1

Anliegen als Theoretiker

- ⋆ gemessene Massen, Wirkungsquerschnitte, Zerfälle sekundär
- ⋆ Parameter in SUSY–Lagrangean aus Messwerten

⇒ SUSY–Brechungs–Parameter bei M_{TeV}

⇒ Extrapolation zu M_{GUT} [Blair, Porod, P. Zerwas]

Aufwärm–Training: mSUGRA–Fit mit Sfitter

- ⋆ Fit mit festem Vorzeichen von μ

	SPS1a	LHC	Δ_{LHC}	LC	Δ_{LC}	LHC+LC	$\Delta_{\mathrm{LHC+LC}}$
m_0	100	100.03	4.0	100.03	0.09	100.04	0.08
$m_{1/2}$	250	249.95	1.8	250.02	0.13	250.01	0.11
$\tan\beta$	10	9.87	1.3	9.98	0.14	9.98	0.14
A_0	-100	-99.29	31.8	-98.26	4.43	-98.25	4.13

⇒ Einfluss des LHC???

	SPS1a	LHC	LC	LHC+LC		SPS1a	LHC	LC	LHC+LC
χ_1^0	97.03	4.8	0.05	0.05	χ_2^0	182.9	4.7	1.2	0.08
χ_3^0	349.2		4.0	4.0	χ_4^0	370.3	5.1	4.0	2.3
$\chi_1^\pm$	182.3		0.55	0.55	$\chi_2^\pm$	370.6		3.0	3.0
$\tilde{g}$	615.7	8.0		6.5					
$\tilde{t}_1$	411.8		2.0	2.0					
$\tilde{b}_1$	520.8	7.5		5.7	$\tilde{b}_2$	550.4	7.9		6.2
$\tilde{q}_R$	551.0	19.0		16.0	$\tilde{q}_L$	570.8	17.4		9.8
$\tilde{e}_1$	144.9	4.8	0.05	0.05	$\tilde{e}_2$	204.2	5.0	0.2	0.2
$\tilde{\mu}_1$	144.9	4.8	0.2	0.2	$\tilde{\mu}_2$	204.2	5.0	0.5	0.5
$\tilde{\tau}_1$	135.5	6.5	0.3	0.3	$\tilde{\tau}_2$	207.9		1.1	1.1
$\tilde{\nu}_e$	188.2		1.2	1.2					

⇒ was sind Daten und was Modell–Annahmen?

PARAMETER–BESTIMMUNG AM LHC: 2

SUSY–Parameter aus Observablen

⋆ Parameter: MSSM–Lagrangean

⋆ Messungen: Schwellen, Ecken, Massen [SuSpect, SoftSUSY, FeynHiggs...]
Verzweigungsverhältnisse [MSMlib, Sdecay]
Wirkungsquerschnitte [Prospino, MSMlib, Fittino mit Spheno]
Erweiterung problemlos

⋆ Fehler: allgemeine Korrelation, Statistik & Systematik & Theorie

⋆ Problem mit Fit: Phasenraum–Struktur, Anfangswerte
Problem mit Grid: riesiges Gitter, schwer abdeckbar

SFitter [Lafaye, TP, D. Zerwas]

⋆ 1 Grid mit Teilmenge von Messungen und Parametern
2 Fit der übrigen Parameter an alle Messungen
3 kompletter Fit

	LHC	LC	LHC+LC	SPS1a
$\tan\beta$	10.22±9.1	10.26±0.3	10.06±0.2	10
M_1	102.45±5.3	102.32±0.1	102.23±0.1	102.2
M_3	578.67±15	fix 500	588.05±11	589.4
$M_{\tilde{\tau}_L}$	fix 500	197.68±1.2	199.25±1.1	197.8
$M_{\tilde{\tau}_R}$	129.03±6.9	135.66±0.3	133.35±0.6	135.5
$M_{\tilde{\mu}_L}$	198.7±5.1	198.7±0.5	198.7±0.5	198.7
$M_{\tilde{q}3_L}$	498.3±110	497.6±4.4	521.9±39	501.3
$M_{\tilde{t}_R}$	fix 500	420±2.1	411.73±12	420.2
$M_{\tilde{b}_R}$	522.26±113	fix 500	504.35±61	525.6
A_τ	fix 0	-202.4±89.5	352.1±171	-253.5
A_t	-507.8±91	-501.95±2.7	-505.24±3.3	-504.9
A_b	-784.7±35603	fix 0	-977±12467	-799.4

⇒ alles ausser LHC+LC nicht ohne Modell–Annahmen [mehr Messungen?]

AUSBLICK

SUSY–Signale am LHC

- ⋆ Messung von Raten und Zerfällen erster Schritt
- ⋆ NLO–Wirkungsquerschnitte in Prospino2.0 [Standard am Tevatron]
- ⋆ QCD–Korrekturen relevant
- ⋆ SUSY–QCD–Korrekturen nicht immer vernachlässigbar

SUSY–Messungen am LHC

- ⋆ Endzustände mit Jets essentiell [Higgs am LHC]
- ⋆ harte Matrixelemente mit SMadgraph
- ⋆ Analyse von Zerfalls–Kaskaden vielversprechende Strategie

SUSY–Parameter am LHC

- ⋆ SUSY–Observablen theoretisch sekundär
- ⋆ Bestimmung von SUSY–Parametern mit Sfitter [ATLAS, CMS, SPA]
- ⋆ Kombination von Experimenten unabdingbar