

SUSY AT THE LHC

DISCOVERY AND BEYOND

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 $m_h \rightarrow \Lambda$
Lösung: Counterterm mit exakter Aufhebung
⇒ künstlich, unmotiviert und hässlich
- ⇒ Alternative: neue Physik an der TeV-Skala
- ⇒ **SUperSYmmetrie**
Extra-Dimensionen
Little Higgs (Pseudo-Goldstone)
Topcolor (zusammengesetztes Higgs)
YourFavoriteNewPhysics...
- ⇒ ästhetische Konzepte und Symmetrien
- ⇒ allgemein problematische Realisierung an TeV-Skala [Daten störend]

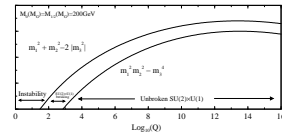
Grund-Idee von Supersymmetrie

- ★ Aufhebung quadratischer Divergenzen durch Statistik-Faktor (-1):
skalare Partner von SM-Fermionen
fermionische Partner von SM-Eichbosonen
fermionische Partner von SM-Skalaren
- ⇒ offensichtlich **gebrochene Symmetrie**

SUPERSYMMETRIE AN DER TEV-SKALA: 2

Sonnenseiten

- ★ radiative Symmetriebrechung — 2 Higgs-Dubletts
- ★ R-Parität — keine FCNC liefert dunkle Materie
- ★ Vereinheitlichung — 3 laufende Kopplungen treffen sich
- ★ Supergravitation — Licht am Ende des Theorie-Tunnels?
- ★ **breite Anforderungen an LHC** — keine Überraschungen



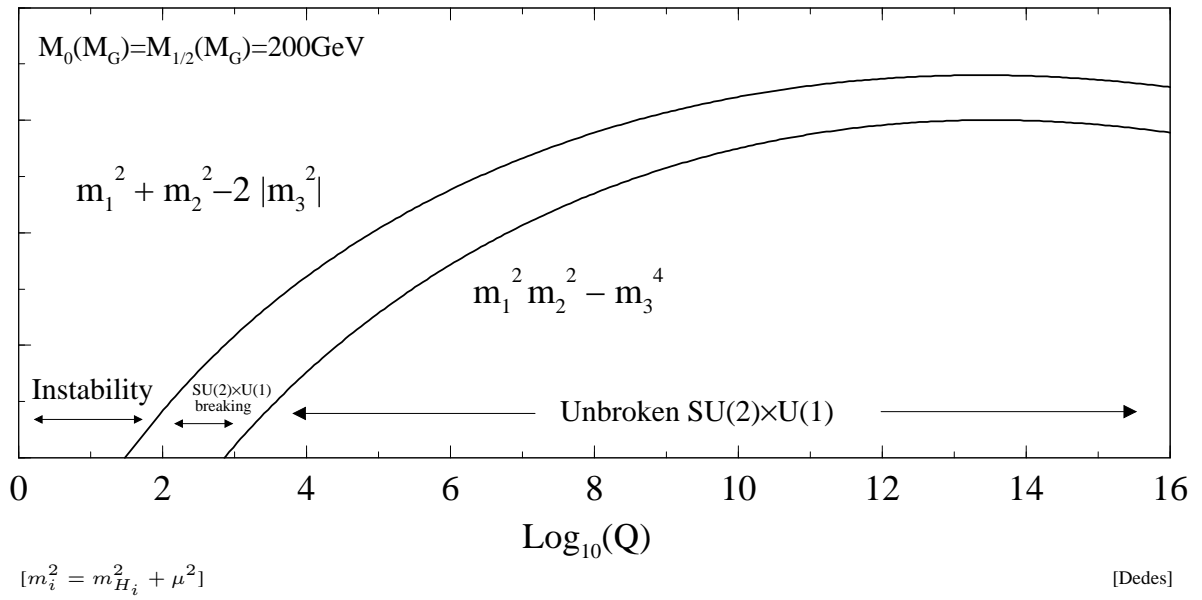
Schattenseiten

- ★ unbekannte SUSY-Brechung
 - weiche Brechung ohne quadratische Divergenzen
 - 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	6 Flavors
→ Squark	\tilde{q}_L, \tilde{q}_R	0	2/3, -1/3	1+1	
Gluon	G_μ	1	0	$n - 2$	Majorana
→ Gluino	\tilde{g}	1/2	0	2	
Eichbosonen	γ, Z	1	0	2+3	Majorana
Higgs-Bosonen	h^o, H^o, A^o	0	0	3	
→ Neutralinos	$\tilde{\chi}_i^o$	1/2	0	4 · 2	
Eichbosonen	W^\pm	1	± 1	2 · 3	Dirac
Higgs-Bosonen	H^\pm	0	± 1	2	
→ Charginos	$\tilde{\chi}_i^\pm$	1/2	± 1	2 · 4	

⇒ **Analysen unabhängig von SUSY-Brechung?**



SUPERSYMMETRIE AN DER TEV-SKALA: 3

Strukturen im SUSY-Spektrum

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

$$\begin{pmatrix} m_{\tilde{B}} & 0 & -m_Z s_w c_\beta & m_Z s_w s_\beta \\ 0 & m_{\tilde{W}} & m_Z c_w c_\beta & -m_Z c_w s_\beta \\ -m_Z s_w c_\beta & m_Z c_w c_\beta & 0 & -\mu \\ m_Z s_w s_\beta & -m_Z c_w s_\beta & -\mu & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{\tilde{W}} & \sqrt{2} m_W s_\beta \\ \sqrt{2} m_W c_\beta & -\mu \end{pmatrix}$$

- ★ Stop– und Sbottom–Mischung im **MSSM**

$$\begin{pmatrix} m_Q^2 + m_t^2 + \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{3} s_w^2\right) m_Z^2 c_{2\beta} & -m_t (A_t + \mu \cot \beta) \\ -m_t (A_t + \mu \cot \beta) & m_U^2 + m_t^2 + \frac{2}{3} s_w^2 m_Z^2 c_{2\beta} \end{pmatrix}$$

- ★ schwere Gluinos und Squarks durch **Vereinheitlichung**

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

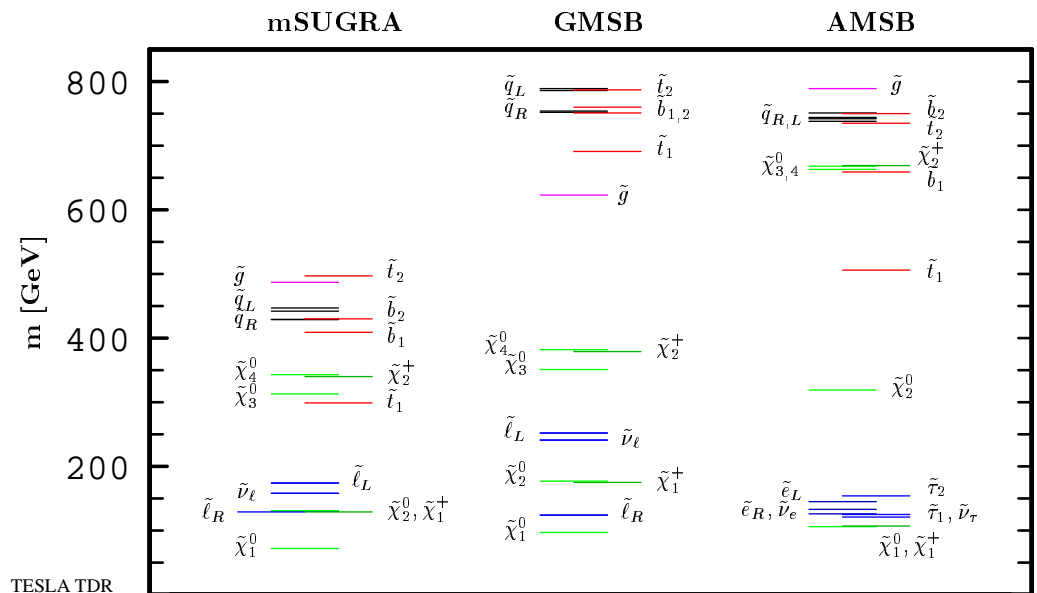
$$m_{\tilde{\ell}, \tilde{q}} / m_{1/2} \sim 0.7, 2.5 \quad [m_0 \ll m_{1/2}]$$

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

- ★ leichtester SUSY-Partner: $\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\nu}$

→ inklusive Daten zu **dunkler Materie**: $\tilde{\chi}_1^0 \sim \tilde{B}, \tilde{W}$

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?
- ⇒ berechnete Zweifel an SUSY jederzeit angebracht

Herausforderung: unübersehbare SUSY–Signale am LHC

- ★ Jets und \cancel{E}_T : $pp \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}^*, \tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{g}$ [$\tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$; $\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0$]
 - ★ Bottoms und \cancel{E}_T : $pp \rightarrow \tilde{b}_1\tilde{b}_1^*$ [$\tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$]
 - ★ Dileptonen gleicher Ladung: $pp \rightarrow \tilde{g}\tilde{g}$ [$\tilde{g} \rightarrow \tilde{u}\tilde{u} \rightarrow \tilde{\chi}_1^+ d\tilde{u}$ oder c.c.]
 - ★ Trileptonen ohne Z –Pol: $pp \rightarrow \tilde{\chi}_2^0\tilde{\chi}_1^-$ [$\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\ell}\tilde{\ell} \rightarrow \tilde{\chi}_1^0\tilde{\ell}\tilde{\ell}$; $\tilde{\chi}_1^- \rightarrow \tilde{\chi}_1^0\tilde{\ell}\tilde{\nu}$]
 - ★ unpassende Tops: $pp \rightarrow \tilde{t}_1\tilde{t}_1^*$ [$\tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^+ \rightarrow b\tilde{\ell}\nu\tilde{\chi}_1^0$]
 - ★ [weitere Ideen herzlich willkommen]
- ⇒ **Erfahrungen aus Tevatron–Suchen**

Exakte Vorhersage der Produktionswirkungsquerschnitte

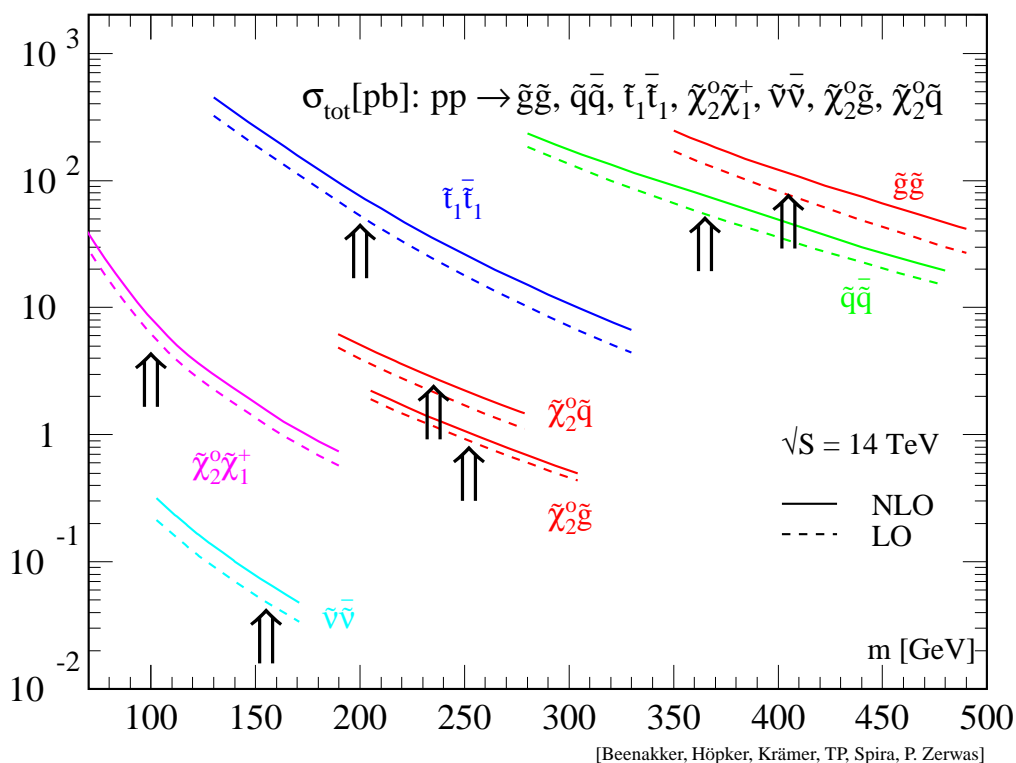
- ★ Massenbestimmung in inklusiven Analysen
- ★ Verzweigungsverhältnisse in Kaskaden–Analysen [Sdecay: Mühlleitner]
- ★ bisher leider: Ausschlussgrenzen für SUSY–Teilchen

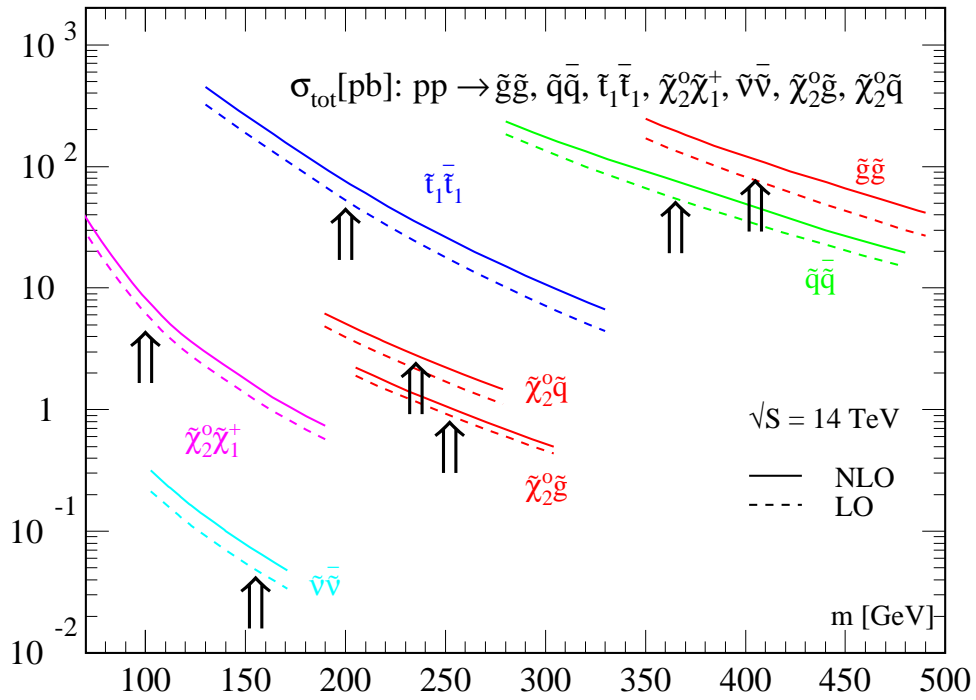
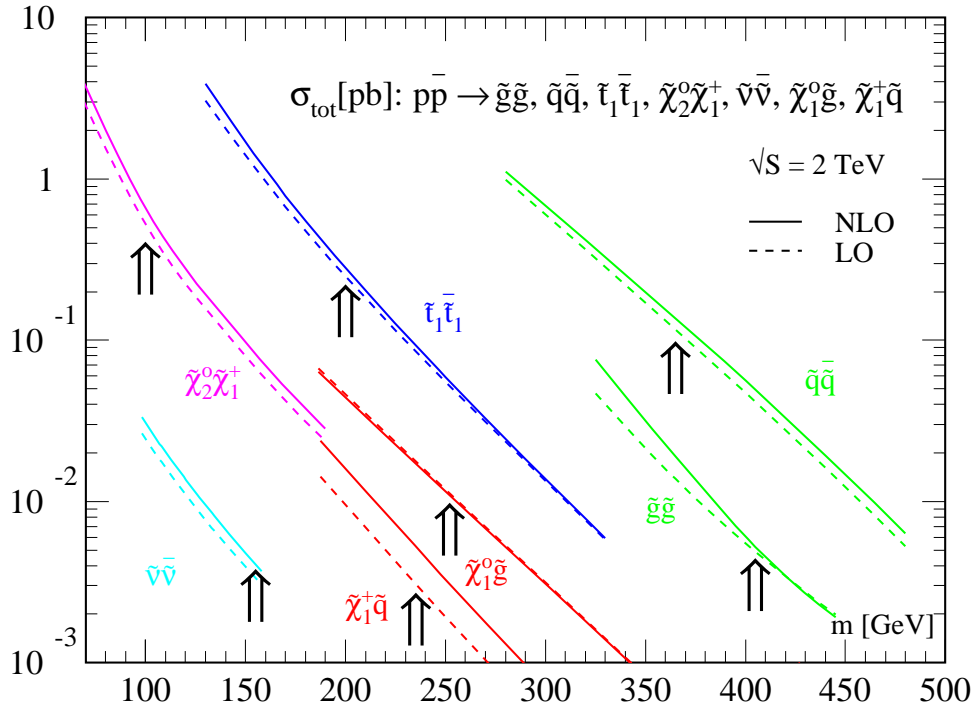
SUSY-SIGNALE AM LHC: 2

(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 Neutralino+Gluino
 - ★ technisch korrekt: divergente Zwischenzustände, Renormierung,...
 - ★ Les-Houches-Interface zu Pythia, SoftSusy, FeynHiggs, etc.
- ⇒ **Prospino2.0beta öffentlich** [<http://pheno.physics.wisc.edu/~plehn>]

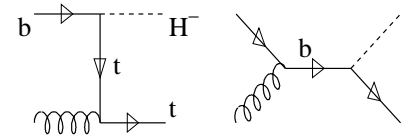
ProspinoPropagandaPlot





SUSY-SIGNALE AM LHC: 3

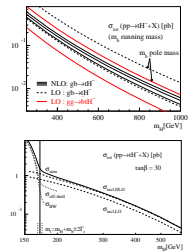
SUSY-Signal: geladenes Higgs-Boson



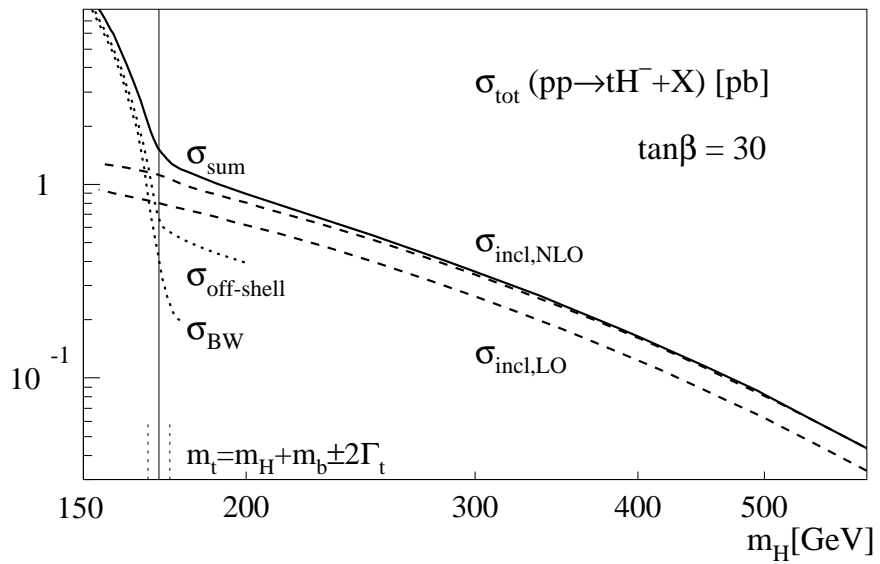
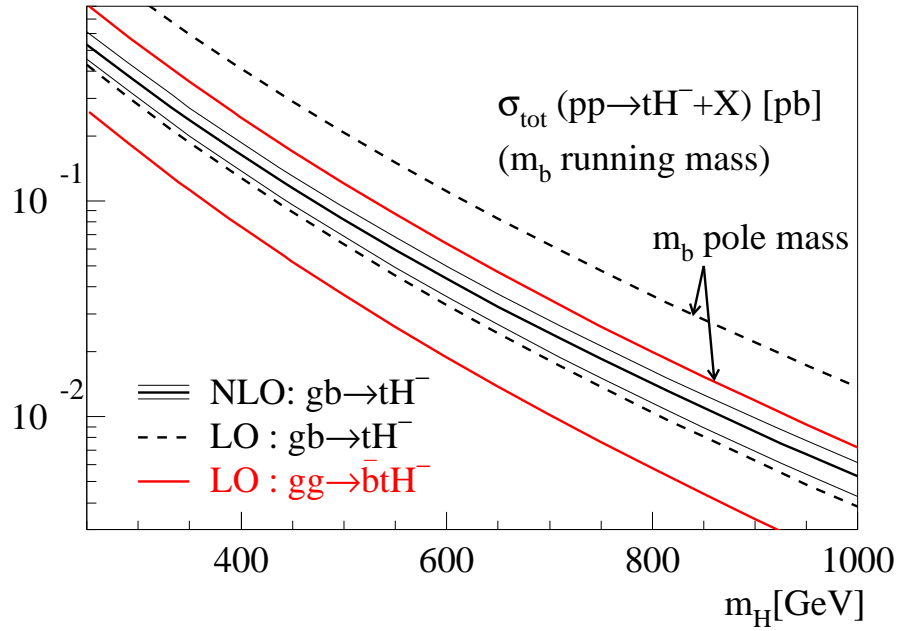
- ★ kein adjungiertes Higgs-Feld im Superpotential
 → 2 Dubletts für Top- und Bottom-Masse $[\tan \beta]$
 → geladener Higgs-Skalar $[H^- \rightarrow \tau \bar{\nu}, \bar{t} b, W^- h^0]$
- ★ Produktionskanal $bg \rightarrow tH^-$ [Prospino2.1, CMS: Nikitenko, ATLAS: Assamagan]
 - (a) konzeptionell: bottom-Partonen [Boos & TP]
 - (b) experimentell: Messung von $\tan \beta$ [LH 2003]

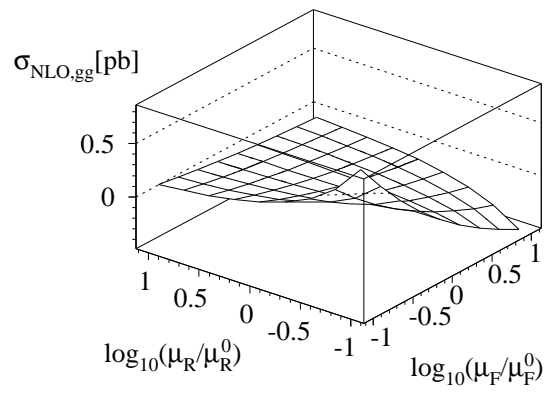
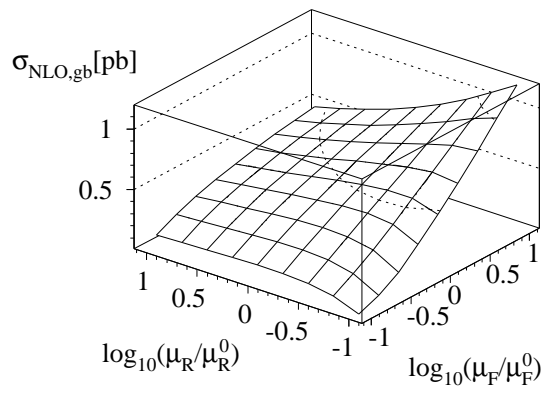
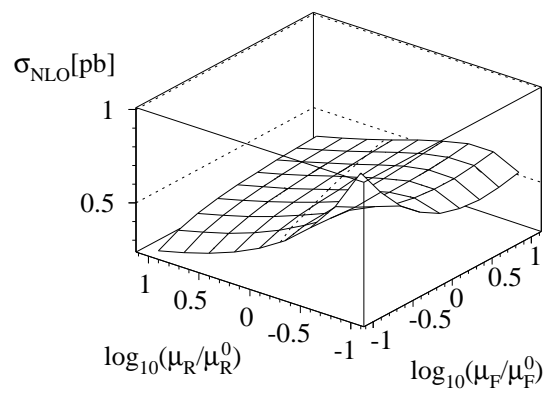
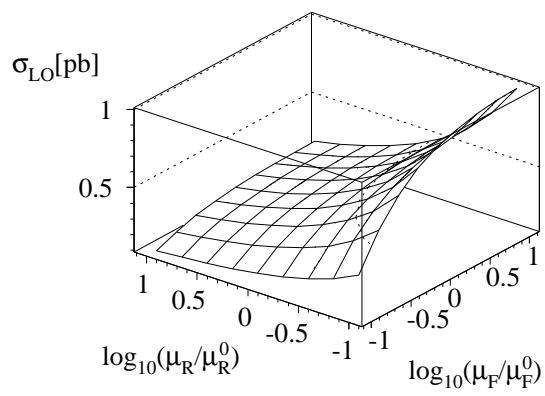
SUSY-Signal: geladenes Higgs-Boson

- ★ 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

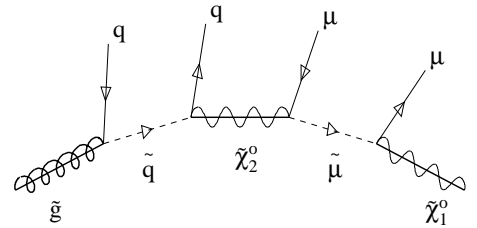


mSUGRA	m_H	$\tan \beta$	$m_{1/2}$	μ	$\sigma_{\text{NLO}}[\text{fb}]$	Δ_b	Δ_b^{resum}	non- Δ_b
1a	402	10	250	352	25.6	-11.0%	-10.2%	-1.9%
1b	543	30	400	501	61.7	-27.9%	-23.5%	-4.6%
2	1446	10	300	125	0.13	-0.92%	-0.91%	-1.7%
3	578	10	400	509	8.02	-10.1%	-9.5%	-1.1%
4	416	50	300	377	395	-39.0%	-31.0%	-4.6%
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%





SUSY-MESSUNGEN AM LHC: 1



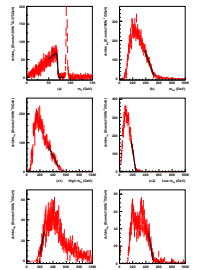
SUSY-Spektren aus Zerfallskaskaden

- ★ Zerfall $\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}\bar{q} \rightarrow \tilde{\chi}_2^0 q\bar{q} \rightarrow \mu^+ \mu^- q\bar{q} \tilde{\chi}_1^0$ [hoffentlich nicht via Z]
- ★ Wirkungsquerschnitte einige 100 pb [mehr als 3×10^5 events]
- ★ Schwellen & Ecken in Spektren [Allanach, Lester, Parker, Webber]

Klassiker $m_{\ell\ell}^2 < (m_{\tilde{\chi}_2^0}^2 - m_{\tilde{\ell}}^2)(m_{\tilde{\ell}}^2 - m_{\tilde{\chi}_1^0}^2)/m_{\tilde{\ell}}^2$

kritisch: genügend Schwellen und Ecken messbar?

⇒ **Detektorauflösung, Kalibrierung, systematische Fehler?**



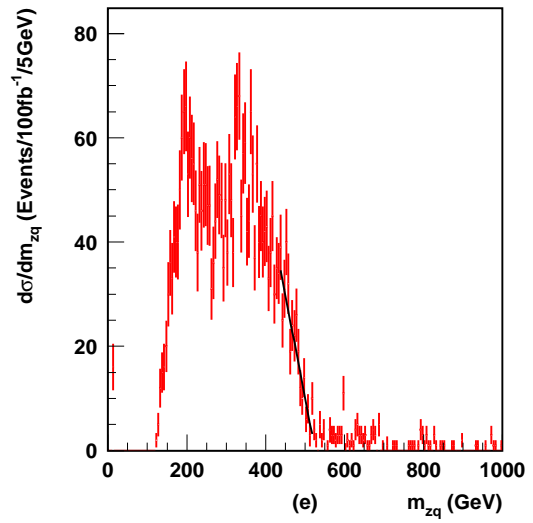
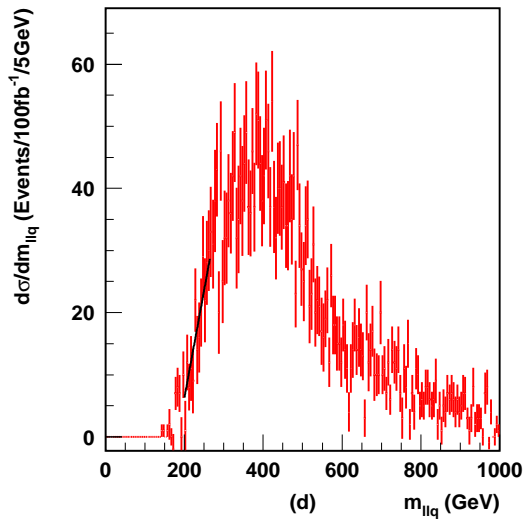
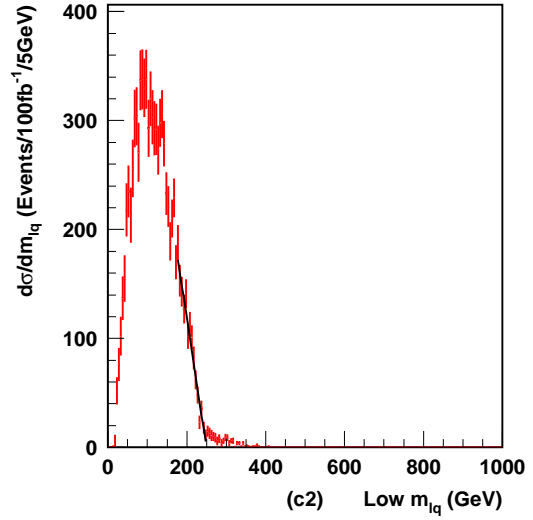
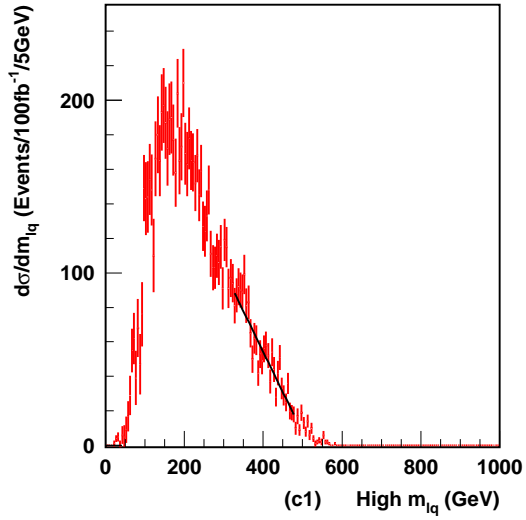
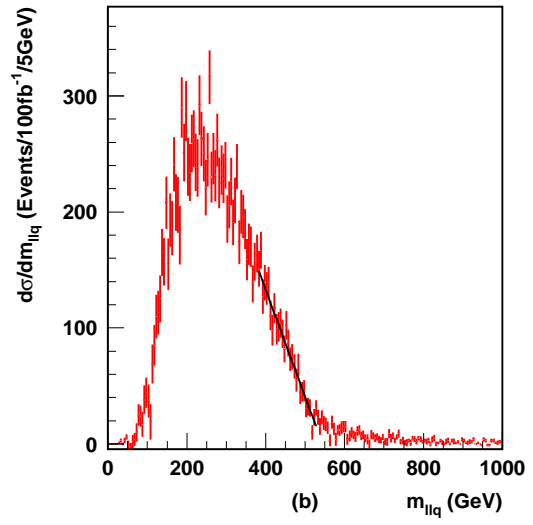
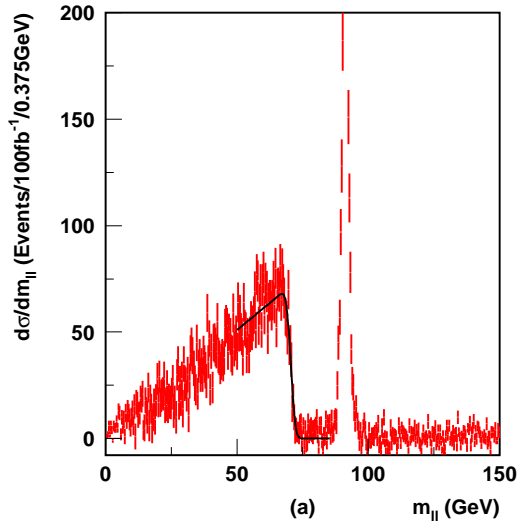
Detailstudien für SPS-Punkte [Polesello et al.]

- ★ Gluino-Masse in $\tilde{g} \rightarrow \tilde{b}\bar{b}$
- ★ Higgsino-Massen in $\tilde{q}_L \rightarrow q\tilde{\chi}_4^0, \tilde{q}_L \rightarrow \tilde{\chi}_2^\pm q$
- ★ Chargino-Masse in $\tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow qW_{\text{had}}^\pm \tilde{\chi}_1^0$ [Nojiri, Polesello, Tovey]
- ★ Slepton-Masse in $\tilde{\ell} \rightarrow \ell\tilde{\chi}_1^0$
- ★

⇒ generisch für kleine $\tan\beta$ -Werte

Probleme mit b -Jets und τ -Leptonen für grosses $\tan\beta$

⇒ **essentiell für SUSY-Parameter-Bestimmung** [Ergebnisse 2 Folien weiter]



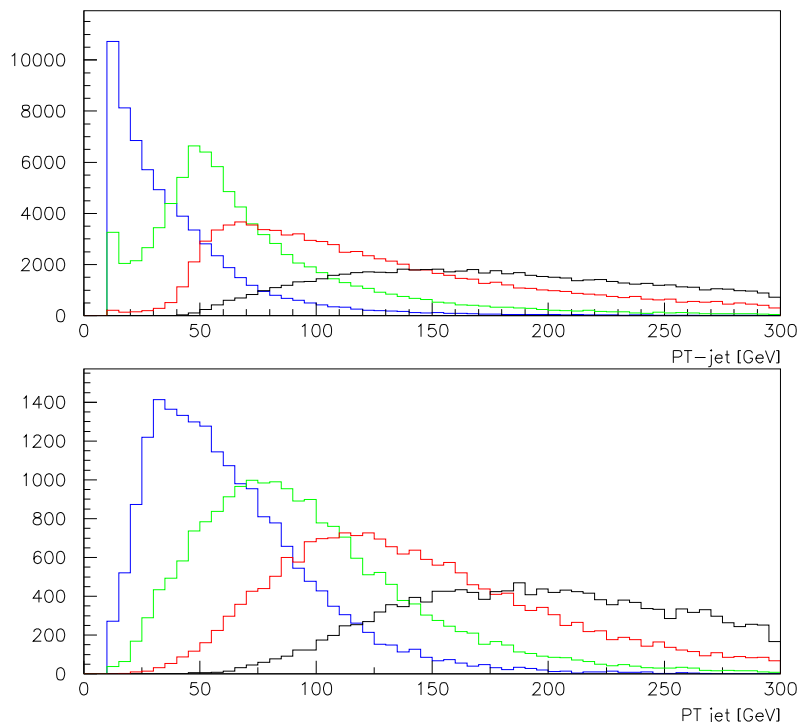
SUSY-MESSUNGEN AM LHC: 2

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 $pp \rightarrow X_{\text{SUSY}} Y_{\text{SUSY}} + \text{harte Jets}$
gute Erfahrungen mit Higgs+Jets [Zeppenfeld, Rainwater; Jacobs, Mellado]
- ⇒ **SMadgraph** [Hagiwara, Kanzaki, TP, Rainwater, Stelzer]

Solange wir SMadgraph noch testen...

- ★ ...vorläufige Madevent-Ergebnisse für $pp \rightarrow ZZ + \text{Jets}$
- ★ Untergrund zu SUSY-Kaskaden mit $\tilde{\chi}_3^0 \rightarrow Z$ [D. Zerwas, TP]
- ★ $p_{T,j} > 50$ GeV: $\sigma = \{2500, 1100, 560\}$ fb für $pp \rightarrow ZZ + \{1,2,3\}$ 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

- ★ Fit mit festem Vorzeichen von μ

	SPS1a	LHC	Δ_{LHC}	LC	Δ_{LC}	LHC+LC	$\Delta_{\text{LHC+LC}}$
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
χ_1^\pm	182.3		0.55	0.55	χ_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:** Massen [SuSpect, SoftSUSY, FeynHiggs..., z.Zt. nur Massen]
 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 **Propino2.0** [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**
- ★ Kombination von Experimenten unabdingbar