

SUPERSYMMETRIE AM LHC

Tilman Plehn

Max-Planck-Institut für Physik, München

- Hadron-Beschleuniger und neue Physik
- Supersymmetrie an der TeV-Skala
- Inklusive Signale am LHC
- Messungen am LHC (+ILC)
- Supersymmetrie Light: Split Supersymmetrie

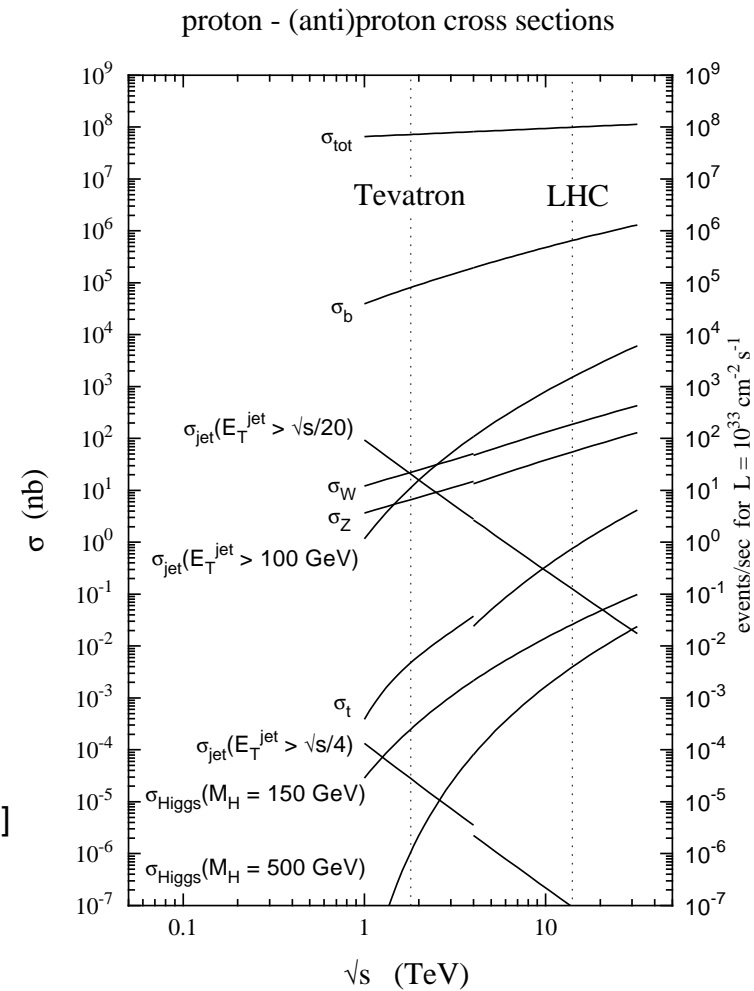
PHYSIK AN HADRON-BESCHLEUNIGERN

Dank an Einstein $[E = mc^2 \text{ mit } c=1]$

- Suche nach neuen schweren Teilchen [nach Möglichkeit direkt produziert]
→ maximale Energien notwendig
- Elektron-Beschleuniger: relativistische $e^+ e^-$
LEP: je 46 GeV für Z-Produktion
LEP2: je 103 GeV z.B. für ZH-Produktion
ILC/CLIC: 1...4 TeV in Zukunft
- Hadron-Beschleuniger: (Anti-)Protonen
Tevatron: $p\bar{p}$ Kollisionen mit 2 TeV [Valenz-Quarks]
LHC: pp Kollisionen mit 14 TeV [Gluonen]
- **LHC-Reichweite ~ 3 TeV** [Luminosität wie Energy]

Neue Physik an Hadron-Beschleunigern

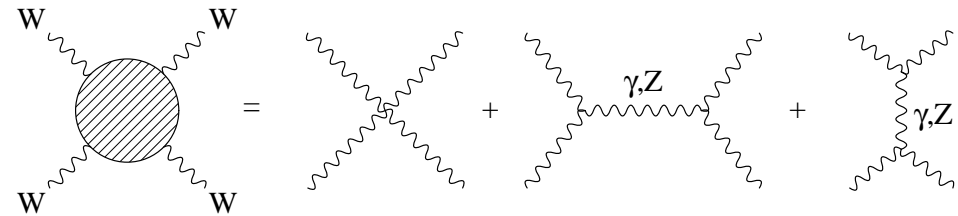
- was ist im Jet? [Bottom-Tag, τ -Tag]
- Trigger: 'keine Daten ohne Lepton' [$pp \rightarrow t\bar{t} \rightarrow \text{Jets}$]
- Untergrund $pp \rightarrow jj$ or $pp \rightarrow WZ + \text{Jets}$
- **Statistik: $S/\sqrt{B} > 5$ heisst Entdeckung**



Theorie massiver W, Z-Eichbosonen

- Startpunkt: SU(2)–Eichtheorie [QED mit masselosen W, Z]
- Erweiterung durch **gemessene Massen** $\mathcal{L} \sim -m_{W,Z} A_\mu A^\mu$
 - nicht mehr eichinvariant [nur im Limes $m_{W,Z} \rightarrow 0$]
 - nicht renormierbar [heisst: keine Vorhersagen bei höheren Skalen]
 - effektive Theorie massiver W, Z-Bosonen

Unitarität



- Test in $WW \rightarrow WW$
 - $\mathcal{A} \propto G_F E^2$ wie in Fermi–Theorie, nicht unitär am LHC
 - Postulat: skalares **Higgs–Boson** für Unitarität
 - Kopplung $g_{WWH} \propto m_W$
 - mit Fermionen $WW \rightarrow f\bar{f}$...
 - Kopplung $g_{ffH} \propto m_f$
 - Kopplung $g_{HHH} \propto m_H^2/m_W$
 - Kopplung $g_{HHHH} \propto m_H^2/m_W^2$
- ⇒ **leichter Higgs–Skalar Teil des Standardmodells**

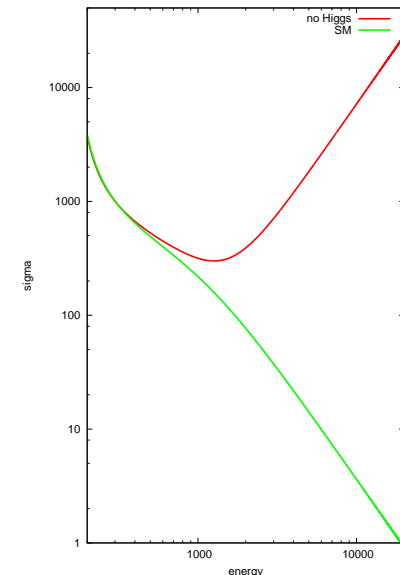
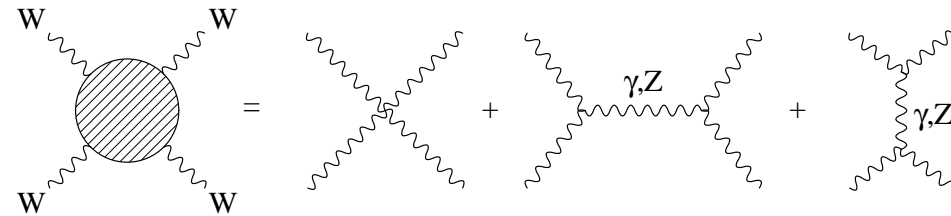
Theorie massiver W, Z-Eichbosonen

- Startpunkt: SU(2)–Eichtheorie [QED mit masselosen W, Z]
- Erweiterung durch **gemessene Massen** $\mathcal{L} \sim -m_{W,Z} A_\mu A^\mu$
 - nicht mehr eichinvariant [nur im Limes $m_{W,Z} \rightarrow 0$]
 - nicht renormierbar [heisst: keine Vorhersagen bei höheren Skalen]
 - effektive Theorie massiver W, Z-Bosonen

Unitarität

- Test in $WW \rightarrow WW$
 - $\mathcal{A} \propto G_F E^2$ wie in Fermi–Theorie, nicht unitär am LHC
 - Postulat: skalares **Higgs–Boson** für Unitarität
 - Kopplung $g_{WWH} \propto m_W$
- mit Fermionen $WW \rightarrow f\bar{f}$...
 - Kopplung $g_{ffH} \propto m_f$
 - Kopplung $g_{HHH} \propto m_H^2/m_W$
 - Kopplung $g_{HHHH} \propto m_H^2/m_W^2$

⇒ **leichter Higgs–Skalar Teil des Standardmodells**



Im Anfang waren die Daten...

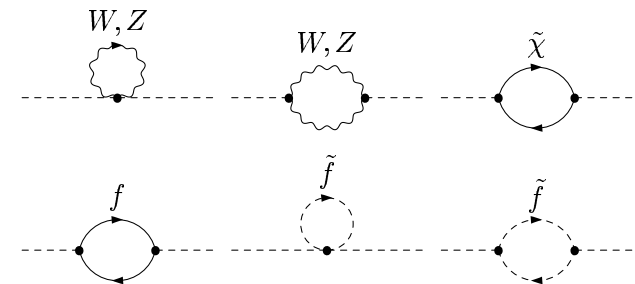
- ...die aussehen wie ein leichtes Higgs
- Problem mit leichtem Higgs: skalare Massen perturbativ instabil
quadratische Divergenzen $\delta m_h^2 \propto g^2 \Lambda^2$
Higgs-Masse am Cutoff $m_h \rightarrow \Lambda$
- ⇒ Lösung: exakter Counterterm ⇒ **künstlich, unmotiviert, hässlich**
- ⇒ Neue Physik an der TeV-Skala: **Supersymmetrie**
Extra Dimensionen
Little Higgs (pseudo-Goldstone)
Higgslos oder Higgs-Kondensat
YourFavoriteNewPhysics...
- ⇒ wunderschöne und hoch motivierte Konzepte
- ⇒ generell schwierig in der wirklichen Welt [Daten sind ein Problem]

Idee von Supersymmetrie: Aufhebung der Divergenzen durch Statistik-Faktor (-1)
[Skalare aus SM-Fermionen; Fermionen aus SM-Eichbosonen; Fermionen aus SM-Skalaren]

TeV-Skala-Supersymmetrie: 1

Im Anfang waren die Daten...

- ...die aussehen wie ein leichtes Higgs
- Problem mit leichtem Higgs: skalare Massen perturbativ instabil
quadratische Divergenzen $\delta m_h^2 \propto g^2 \Lambda^2$
Higgs-Masse am Cutoff $m_h \rightarrow \Lambda$
- ⇒ Lösung: exakter Counterterm ⇒ **künstlich, unmotiviert, hässlich**
- ⇒ Neue Physik an der TeV-Skala: **Supersymmetrie**
Extra Dimensionen
Little Higgs (pseudo-Goldstone)
Higgslos oder Higgs-Kondensat
YourFavoriteNewPhysics...
- ⇒ wunderschöne und hoch motivierte Konzepte
- ⇒ generell schwierig in der wirklichen Welt



Idee von Supersymmetrie: Aufhebung der Divergenzen durch Statistik-Faktor (-1)

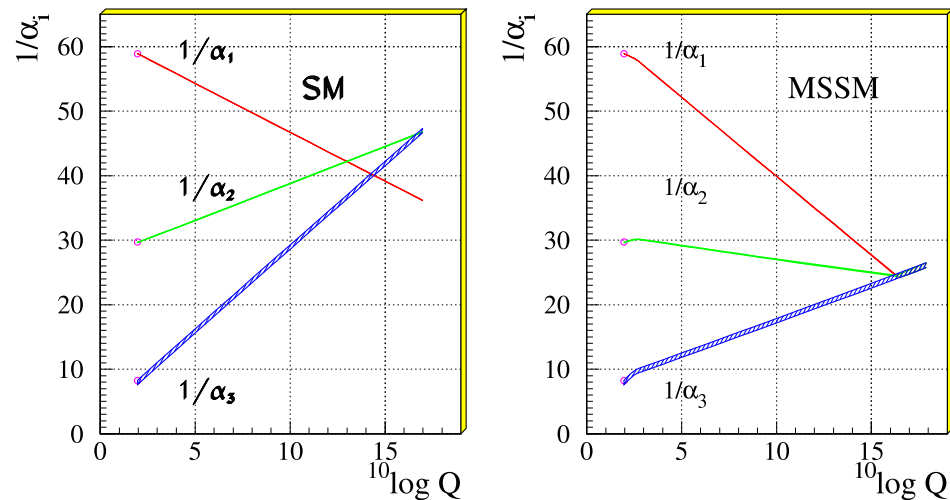
[Skalare aus SM-Fermionen; Fermionen aus SM-Eichbosonen; Fermionen aus SM-Skalaren]

TeV-Skala-Supersymmetrie: 2

Sonnenseite

- vereinheitlichte Eichgruppe — 3 laufende Kopplungen treffen sich [Beta-Funktionen]
- R-Parität — Proton-Lebensdauer und dunkle Materie [WMAP passt]
- radiative Symmetriebrechung — 2 Higgs-Dubletts [verknüpft SUSY-Skala und Z-Masse]
- lokale Supersymmetrie — Vereinheitlichung mit Quantengravitation?
- **reichhaltige LHC-Phänomenologie** — kein riskantes Spiel [SUSY als effektive Theorie]

Unification of the Coupling Constants in the SM and the minimal MSSM



TeV-Skala-Supersymmetrie: 2

Sonnenseite

- vereinheitlichte Eichgruppe — 3 laufende Kopplungen treffen sich [Beta-Funktionen]
- R-Parität — Proton-Lebensdauer und dunkle Materie [WMAP passt]
- radiative Symmetriebrechung — 2 Higgs-Dubletts [verknüpft SUSY-Skala und Z-Masse]
- lokale Supersymmetrie — Vereinheitlichung mit Quantengravitation?
- **reichhaltige LHC-Phänomenologie** — kein riskantes Spiel [SUSY als effektive Theorie]

Schattenseite

- SUSY-Brechung unverstanden
 - Massen, Kopplungen, Phasen...
 - Hierarchie im Spektrum? [split SUSY]
 - Flavor-Physik und SUSY-Brechung
 - CKM und Lepton-Mischung?
 - 2 Higgs-Dubletts
 - μ -Parameter und SUSY?
- ⇒ **messen statt glauben!**

		Spin	d.o.f.	
Fermion	f_L, f_R	1/2	1+1	
→ Sfermion	\tilde{f}_L, \tilde{f}_R	0	1+1	
Gluon	G_μ	1	n-2	
→ Gluino	\tilde{g}	1/2	2	Majorana
Eichbosonen	γ, Z	1	2+3	
Higgs-Bosonen	h^0, H^0, A^0	0	3	
→ Neutralinos	$\tilde{\chi}_i^0$	1/2	4 · 2	Majorana
Eichbosonen	W^\pm	1	2 · 3	
Higgs-Bosonen	H^\pm	0	2	
→ Charginos	$\tilde{\chi}_i^\pm$	1/2	2 · 4	Dirac

Strukturen im SUSY-Spektrum [Drees, Martin]

- Gauginos-Higgsinos-Mischung: $m_{\tilde{\chi}_2^0} \sim m_{\tilde{\chi}_1^+}$ or $m_{\tilde{\chi}_1^0} \sim m_{\tilde{\chi}_1^+}$ in **MSSM**

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

- 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**:

$$m_{\tilde{g}, \tilde{W}, \tilde{g}} / m_{1/2} \sim 0.4, 0.8, 2.6 \quad m_{\tilde{\ell}, \tilde{q}} / m_{1/2} \sim 0.7, 2.5 \quad [m_0 \ll m_{1/2}]$$

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

$$\Rightarrow \text{nach Daten } \tilde{\chi}_1^0 \sim \tilde{B}, \tilde{W} \quad [\text{Gravitinos?}]$$

- **Vereinheitlichung von Massen und Eichkopplungen unabhängig**

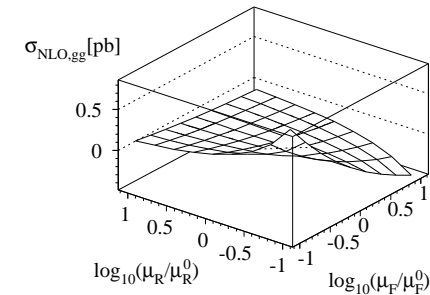
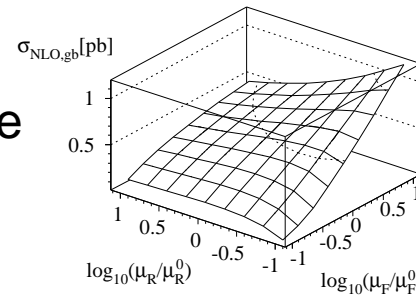
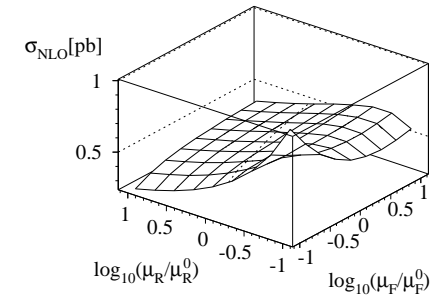
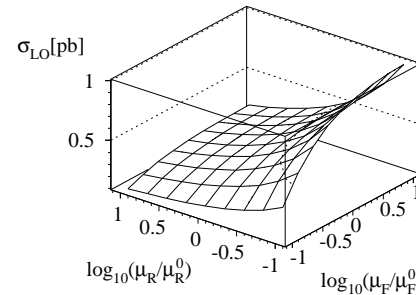
SUSY-SIGNALE AM LHC: 1

Jahrzehnt der Entdeckung

- (1) **mögliche Entdeckung** — neue Physik, definitiv nicht Standardmodell
 - (2) **Messungen** — Massen, Wirkungsquerschnitte, Zerfälle
 - (3) **Parameter-Studien** — MSSM-Lagrangean, SUSY-Brechung
- ⇒ mindestens 10% Präzision experimentelle Vorgabe am LHC [Theorie-Alptraum]

Hadron-Beschleuniger mit Fehlerbalken

- ★ Massen aus σ_{tot}
 - ★ Verzweigungsverhältnisse aus σ_{tot}
 - Renormierungs-Skala in $\alpha_s, y_{b,t}$
 - Faktorisierungs-Skala in Partondichte
 - Störungsreihe in $N_c \alpha_s / \pi \sim 10\%$
 - endliche Terme [LO-NLO-NNLO: DY, Higgs]
- ⇒ **NLO-Fehler: 15...40 % für SUSY-Produktion**



Prospino2: NLO-Wirkungsquerschnitte am LHC

- alle zwei-Teilchen Produktions-Kanäle
- öffentlich verfügbar von: <http://pheno.physics.wisc.edu/~plehn>
- erweiterte Version von Prospino2: $pp \rightarrow SS^*, tH^- \dots$

[Dank an: W. Beenakker, R.Höpker, M. Krämer, M. Spira, P. Zerwas]

Inklusive Signale

- Jets plus \cancel{E}_T : $pp \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}^*, \tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{g}$

[$\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}^* q$ and $\tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0 + X$]

- fast Top-Paare: $pp \rightarrow \tilde{t}_1\tilde{t}_1^*$

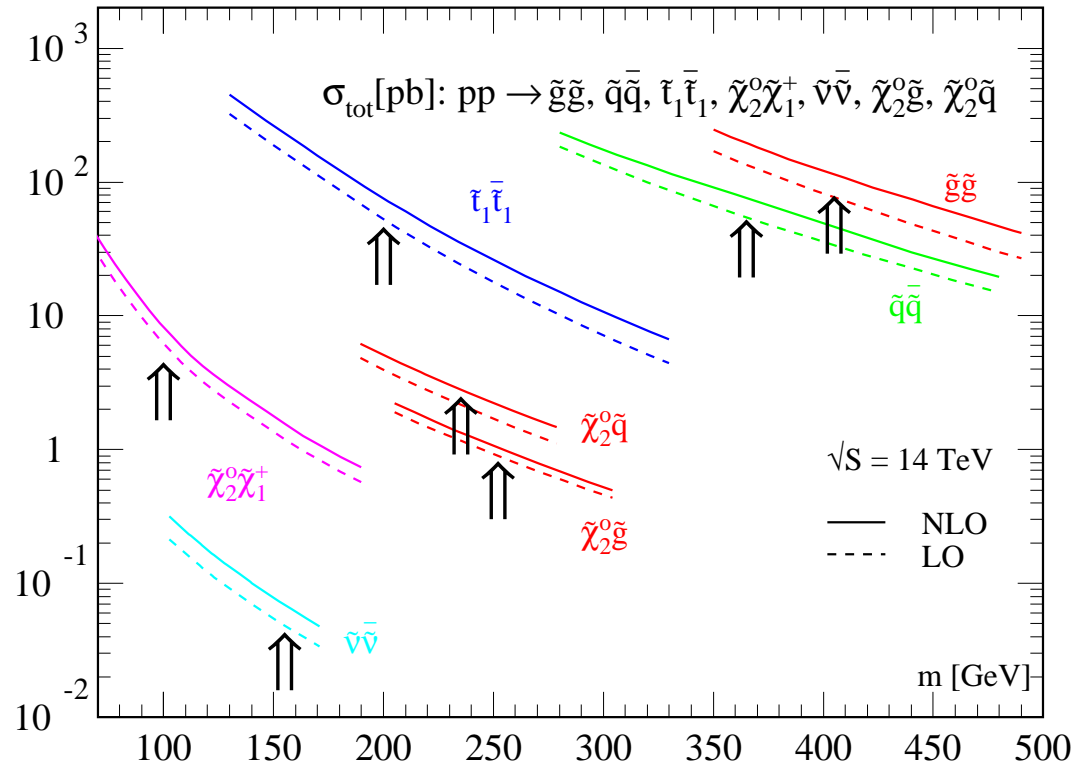
[$\tilde{t} \rightarrow b\tilde{\chi}_1^+$ $\rightarrow bW^+\tilde{\chi}_1^0$]

- Dileptonen: $pp \rightarrow \tilde{g}\tilde{g}$

[$\tilde{g} \rightarrow \tilde{u}\tilde{u} \rightarrow \tilde{\chi}_1^+\tilde{d}\tilde{u}$ or c.c.]

- Trileptonen: $pp \rightarrow \tilde{\chi}_2^0\tilde{\chi}_1^-$

[$\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\ell}\tilde{\ell} \rightarrow \tilde{\chi}_1^0\ell\tilde{\ell}; \tilde{\chi}_1^- \rightarrow \tilde{\chi}_1^0\ell\tilde{\nu}$]



Prospino2: NLO-Wirkungsquerschnitte am Tevatron

- alle zwei-Teilchen Produktions-Kanäle
- öffentlich verfügbar von: <http://pheno.physics.wisc.edu/~plehn>
- erweiterte Version von Prospino2: $pp \rightarrow SS^*, tH^- \dots$

[Dank an: W. Beenakker, R.Höpker, M. Krämer, M. Spira, P. Zerwas]

Inklusive Signale

- Jets plus \cancel{E}_T : $pp \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}^*, \tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{g}$

$[\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}^* q \text{ and } \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0 + X]$

- fast Top-Paare: $pp \rightarrow \tilde{t}_1\tilde{t}_1^*$

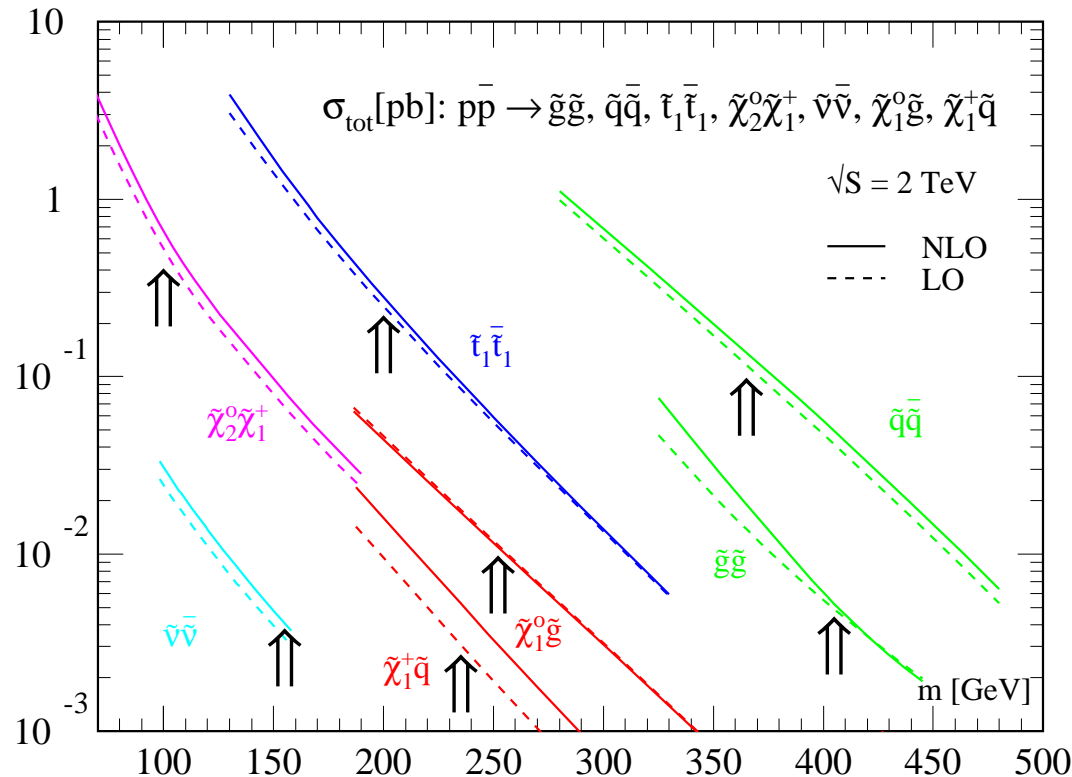
$[\tilde{t} \rightarrow b\tilde{\chi}_1^+ \rightarrow bW^+\tilde{\chi}_1^0]$

- Dileptonen: $pp \rightarrow \tilde{g}\tilde{g}$

$[\tilde{g} \rightarrow \tilde{u}\tilde{u} \rightarrow \tilde{\chi}_1^+ d\tilde{u} \text{ or c.c.}]$

- Tripleptonen: $pp \rightarrow \tilde{\chi}_2^0\tilde{\chi}_1^-$

$[\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\ell}\tilde{\ell} \rightarrow \tilde{\chi}_1^0\ell\tilde{\ell}; \tilde{\chi}_1^- \rightarrow \tilde{\chi}_1^0\ell\tilde{\nu}]$



SUSY-Spektrum aus Kaskaden-Zerfällen

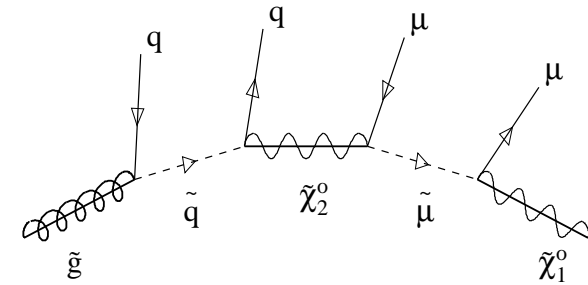
- Beispiel: $\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}\bar{q} \rightarrow \tilde{\chi}_2^0 q\bar{q} \rightarrow \mu^+ \mu^- q\bar{q} \tilde{\chi}_1^0$
- Schwellen & Kanten [Hinchliffe, Paige...; Cambridge ex-th]

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

⇒ genügend Schwellen und Kanten messbar?

⇒ Detektor-Auflösung, Kalibration, Systematik?

[Polesello; Gjelsten, Miller, Osland]



SUSY-MESSUNGEN AM LHC: 1

SUSY-Spektrum aus Kaskaden-Zerfällen

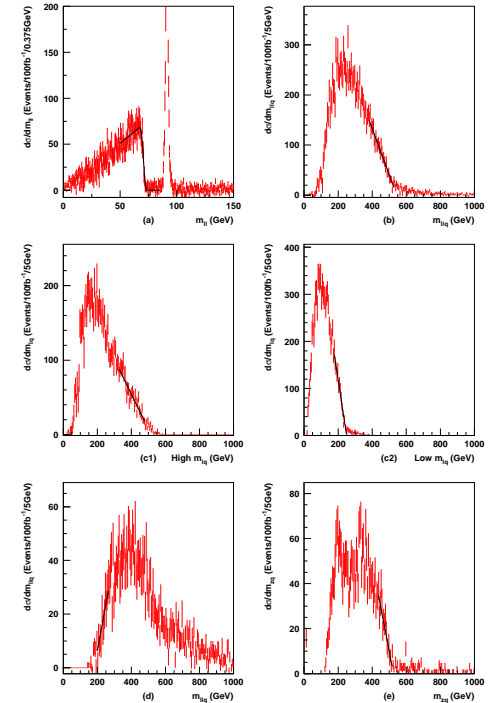
– Beispiel: $\tilde{g} \rightarrow \tilde{q}\tilde{q} \rightarrow \tilde{\chi}_2^0 q\bar{q} \rightarrow \mu^+ \mu^- q\bar{q} \tilde{\chi}_1^0$

– Schwellen & Kanten [Hinchliffe, Paige...; Cambridge ex-th]

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

⇒ genügend Schwellen und Kanten messbar?

⇒ Detektor-Auflösung, Kalibration, Systematik?



Komplexe Signaturen [Hagiwara, Kanzaki, TP, Rainwater, Stelzer]

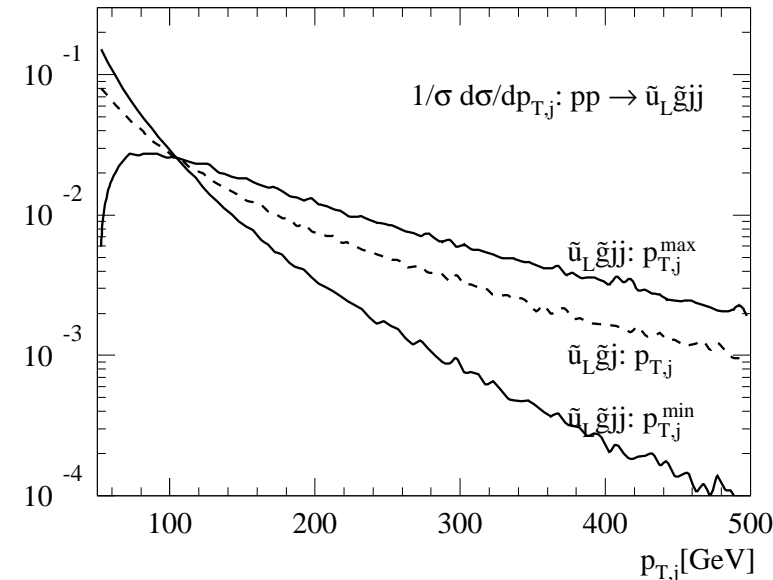
– Kaskaden-Studien und Jet-Abstrahlung?

– Prozess $\tilde{u}_L \tilde{g} + 2 \text{ Jets}$ [SPS1a, $p_{T,j} > 100 \text{ GeV}$]

σ [pb]	$\tilde{t}\tilde{t}_{600}$	$\tilde{g}\tilde{g}$	$\tilde{u}_L \tilde{g}$
σ_{0j}	1.30	4.83	5.65
σ_{1j}	0.73	2.89	2.74
σ_{2j}	0.26	1.09	0.85

⇒ **Smadgraph: Web-Programm für Amplituden**

[300+ Prozesse getestet; Dank an Whizard]



SUSY-MESSUNGEN AM LHC: 2

SUSY-Parameters aus Messungen [Les Houches Accord: Skands,...]

- Parameter: MSSM an der TeV-Skala
- Messungen: Massen oder Schwellen
 Zerfallsbreiten [MSMlib, Sdecay]
 Wirkungsquerschnitte [Prospino2, MSMlib],...
- Fehler: allgemeine Korrelation, Statistik & Systematik & Theorie
- Problem mit Gitter: riesiger Phasenraum, lokales Minimum?
 Problem mit Fit: Domainwalls, Anfangswerte, globales Minimum?

Sfitter [Lafaye, TP, D. Zerwas]

- (1) Gitter auf Unterraum
 - (2) Fit der übrigen Parameter
 - (3) kompletter Fit
- ⇒ LHC besser als erwartet
- ⇒ **LHC+ILC ohne Modell-Annahmen**

	LHC	ILC	LHC+ILC	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
$M_{\tilde{q}_{3L}}$	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

Split–Supersymmetrie [Dimopoulos, Arkani-Hamed; Giudice, Romanino; Wells]

- vergessen wir die Higgs–Masse [kosmologische Konstante ist ohnehin schlimmer]
- erinnern wir uns an die Erfolge von Supersymmetrie [dunkle Materie, Vereinheitlichung]
- ⇒ Skalare sollten schwer sein [SU(5)–Multipletts entkoppeln; Dawson, Georgi 1979]
- ⇒ Gaugino– und Higgsino–Massen an der TeV–Skala [Drees: nicht ganz so einfach]

Neuigkeiten in Phänomenologie

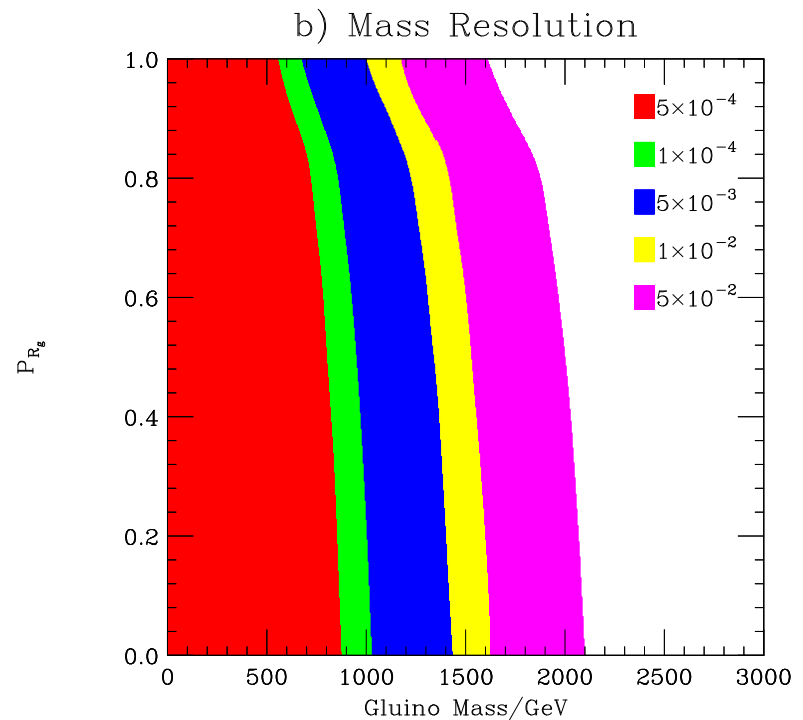
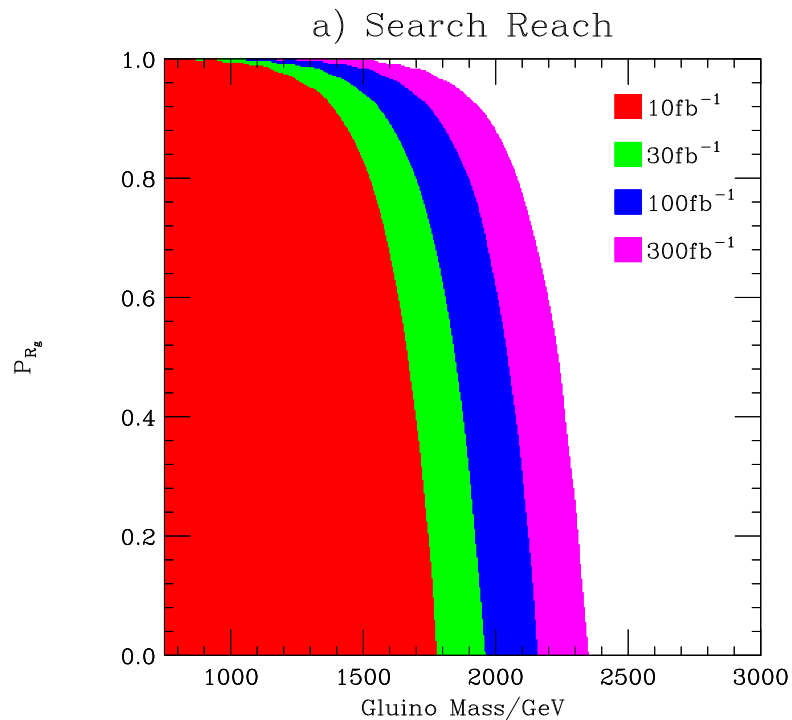
- hadronisierende Gluinos [$\tau \sim \tilde{m}^{-4} \sim 6.5\text{s}$ for $\tilde{m} = 10^9\text{GeV}$]
 - ⇒ schwere R–Hadronen [Farrar, Fayet; Baer, Cheung, Gunion; UKQCD; Kraan]
 - ⇒ Gluinonium [Kühn & Ono; Goldman & Haber; Cheung & Keung]
- Renormierungsgruppe mit entkoppelten Skalaren
 - ⇒ Korrekturen zu SUSY–geschützten Kopplungen [bis zu 20% für $\tilde{m} \sim 10^9\text{ GeV}$]

Experimentelle Signaturen [Modell–Geschmack keine Entschuldigung für LHC–Trigger]

- LHC: stabile Gluinos [R–Hadron–Ladung entscheidend]
- ILC: anomale Yukawa–Kopplungen [indirekte oder direkte Messung]
- IceCube: ein Event pro Jahr for leichte R–Hadronen [Hewett, Lillie, Mazip, Rizzo]
- Pierre Auger: einige Events falls $\tilde{m} < 10^{11}\text{ GeV}$ [Anchordoqui, Goldberg, Nunez]

LHC-Suche [Kilian, TP, Richardson, Schmidt]

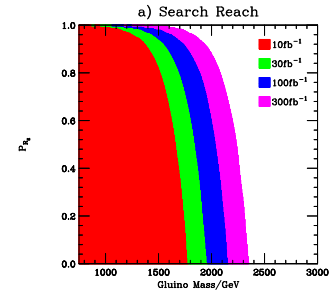
- Neutralinos, Charginos wie Higgsinos im MSSM
- Gluinos in grosser Zahl [100 pb bei 400 GeV Gluinos]
- Gluonium $\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow jj$ [CMS: Reichweite \sim TeV? Zerfall in $\gamma\gamma$?]
- geladene R-Hadronen im Tracker, Kalorimeter, Muonkammern
- **Massenmessung durch Flugzeit Tracker-Muonkammern** [CDF?]



SPLIT-SUPERSYMMETRIE: 2

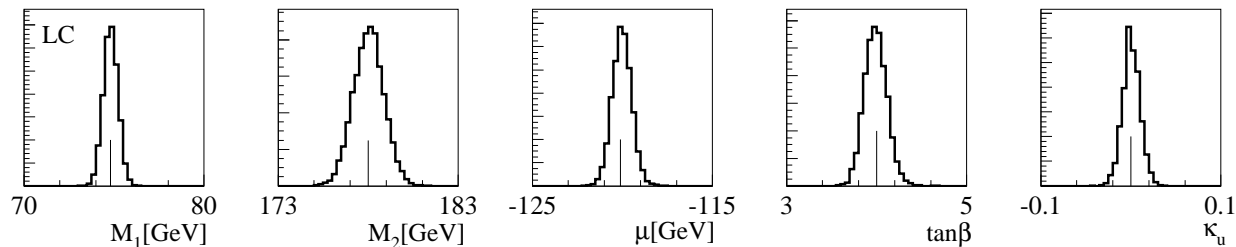
LHC-Suche [Kilian, TP, Richardson, Schmidt]

- Neutralinos, Charginos wie Higgsinos im MSSM
- Gluinos in grosser Zahl [100 pb bei 400 GeV Gluinos]
- Gluinonium $\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow jj$ [CMS: Reichweite \sim TeV? Zerfall in $\gamma\gamma$?]
- geladene R-Hadronen im Tracker, Kalorimeter, Muonkammern
- **Massenmessung durch Flugzeit Tracker-Muonkammern** [CDF?]



ILC-Suche [Kilian, TP, Richardson, Schmidt]

- Gluinos ohne Squarks nicht produziert
 - Neutralino-Chargino-Sektor wie üblich [robust gegenüber neuen Zerfallskanälen]
 - anomale Yukawas \equiv Neutralino Massenmatrix [Kopplung to $h\tilde{H}\tilde{W}$]
- ⇒ (1) direkte Beobachtung von $\chi\chi h$ [Whizard, Smadgraph → Fehleranalyse traurig]
- (2) indirekte Bestimmung der Massenmatrix ⇒ **Kopplungs-Messung \lesssim 10%**



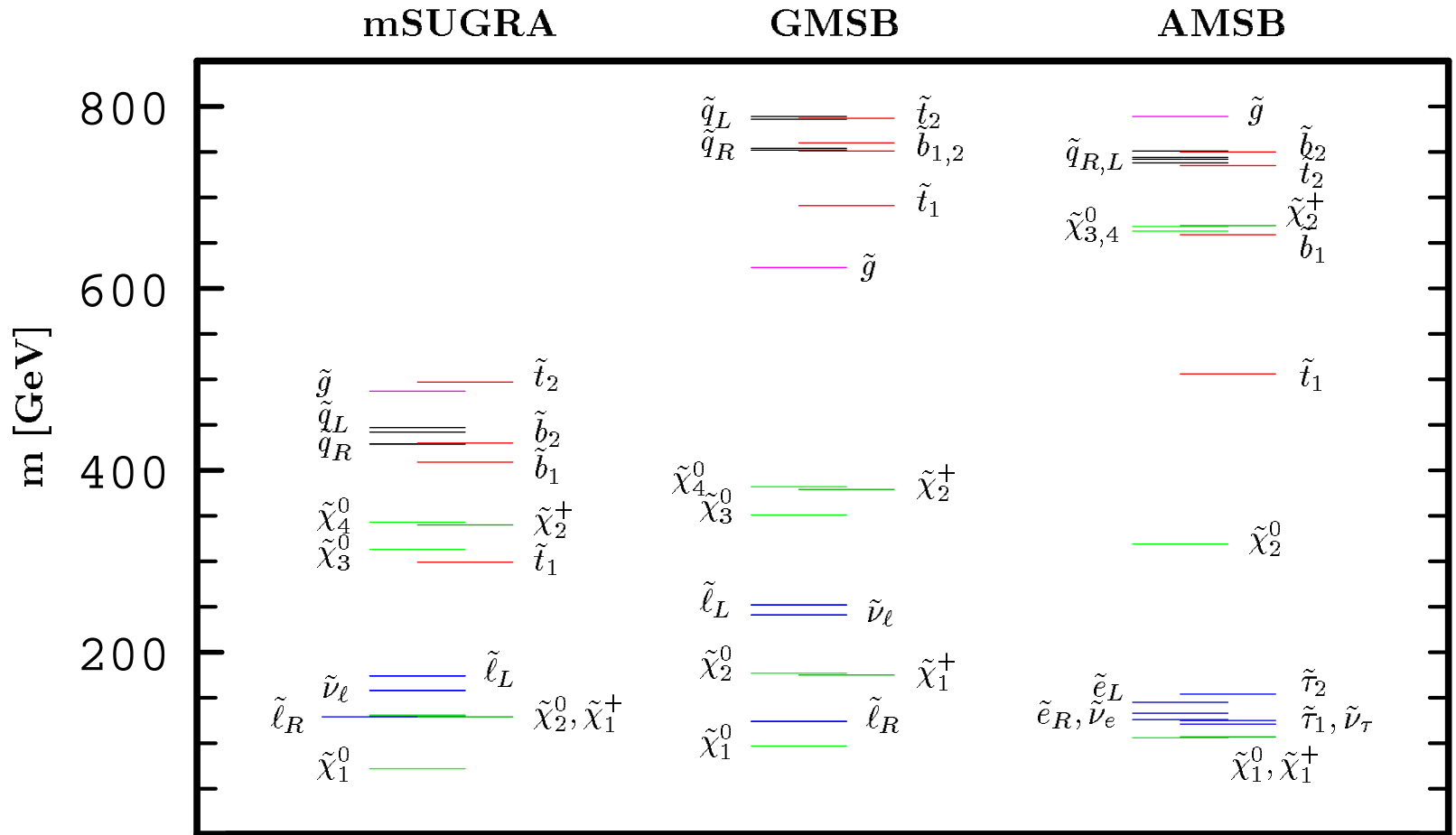
Supersymmetrie am LHC

- allgemeine Signaturen wie am Tevatron
 - Messungen in Zerfalls–Kaskaden exzellenter Ansatz
 - Theorie–Beiträge nötig und akzeptiert
 - Extrapolation zu hohen Skalen mit ILC–Messungen
- ⇒ **LHC–Phänomenologie ein fruchtbares Feld**

Zukunft von Phänomenologie

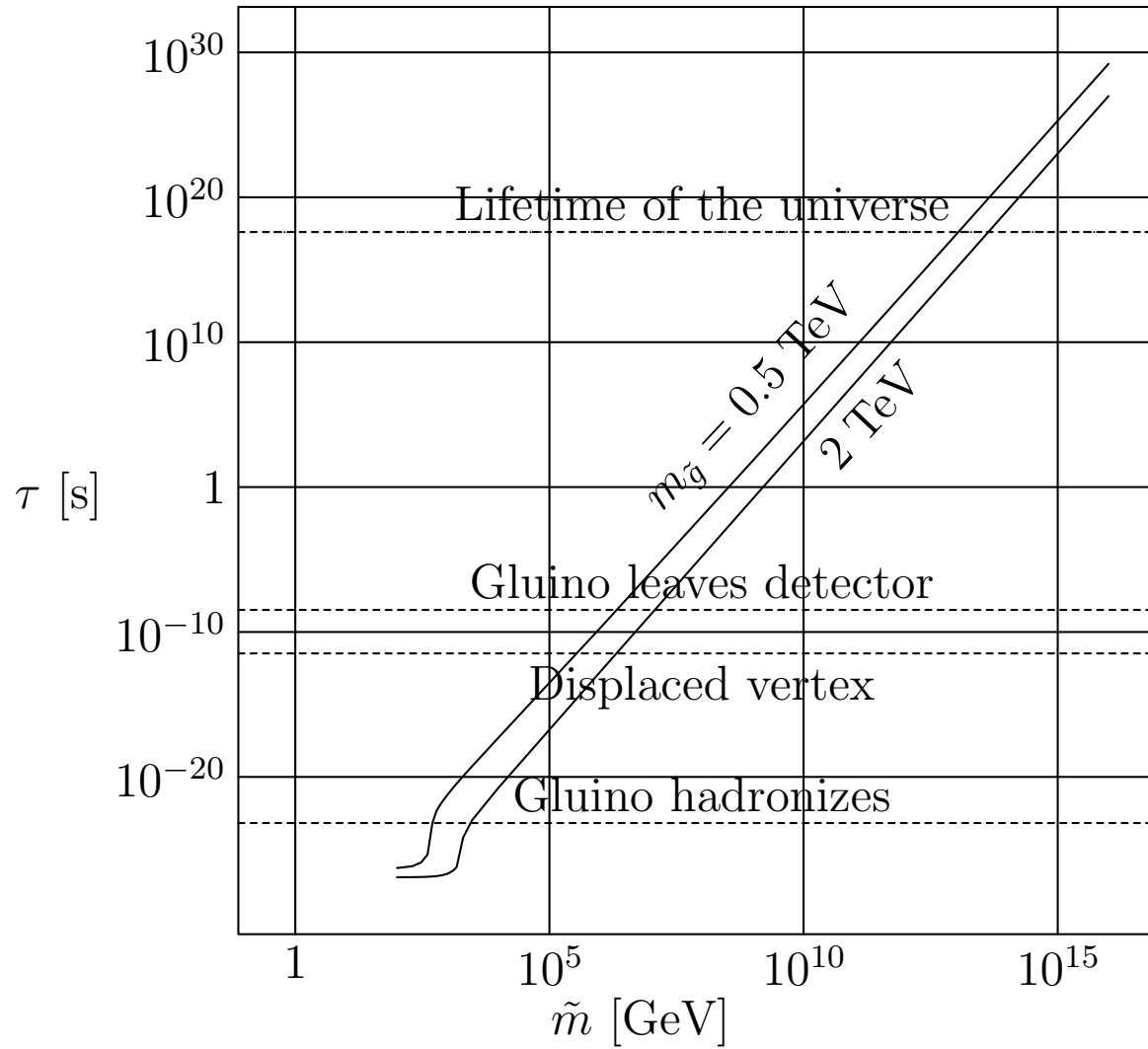
- aufregende Zeiten warten auf uns: LHC–Daten kommen näher
 - Kommunikation zwischen Experiment und Theorie essentiell
 - elektroschwache Symmetrie–Brechung verstehbar?
- ⇒ **Daten werden entscheiden**

APPENDIX



TESLA TDR

APPENDIX



APPENDIX

