

Suche nach natürlicher Supersymmetrie in Multilepton-Endzuständen mit dem ATLAS-Detektor

Johannes Mellenthin, betreut durch Michael Flowerdew

Max-Planck-Institut für Physik, München

DPG Frühjahrstagung, Wuppertal 2015



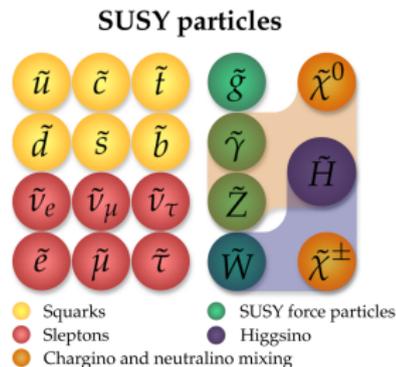
Max-Planck-Institut für Physik
(Werner-Heisenberg-Institut)

p(hänomenologisches)MSSM

- Anzahl freie Parameter (105) für das MSSM → zu groß für allgemeine Studien
- Reduzierung der Parameter mittels experimentell motivierten Prinzipien
 - 1 Keine neue Quelle der CP-Verletzung
 - 2 Keine Flavor-ändernde neutrale Ströme
 - 3 Degenerierte Sfermion Massen der 1. und 2. Generation
 - 4 Vernachlässigbare Yukawa Kopplungen und trilineare Kopplungen (A-Terme) für die ersten beiden Generationen

→ 19/20 Parameter für das pMSSM:

$m_{\tilde{q}_L}$	$m_{\tilde{u}_R}$	$m_{\tilde{d}_R}$	Sfermion Massen der Squarks und Sleptonen
$m_{\tilde{l}_L}$	$m_{\tilde{e}_R}$		
$m_{\tilde{Q}_L}$	$m_{\tilde{t}_R}$	$m_{\tilde{b}_R}$	
$m_{\tilde{L}_L}$	$m_{\tilde{\tau}_R}$		Gaugino Massen
M_1	M_2	M_3	
$\tan\beta$	M_A	μ	Higgs Sektor
A_t	A_b	A_τ	trilineare Kopplungen
$(m_{3/2})$			Gravitino Masse



- Matthew Cahill-Rowley, JoAnne L. Hewett, Ahmed Ismail, Thomas G. Rizzo (arXiv:1407.4130 [hep-ph]): **Untersuchung von ATLAS und CMS Suchmethoden in drei zufälligen Scans des pMSSM Parameterraumes**
 - Zufällige Parameterwahl ($< 4 \text{ TeV}$) \rightarrow mehrere Millionen Modelle (SOFTSUSY)
 - Reduzierung der Anzahl der Modelle anhand folgender Einschränkungen:
 - Beschleuniger (pre-LHC)
 - Flavor (Meson-Antimeson Mischung, ...)
 - Präzisionsmessungen ($g - 2$, ...)
 - Dunkler Materie (LSP Streuquerschnitt vereinbar mit direkter Suche, ...)
 - theoretische Einschränkungen (tachyonenfrei, ...)
- \rightarrow **Etwa jeweils 225 000 Modelle mit einem Neutralino oder einem Gravitino als LSP erfüllen dies**
- Zusätzlich dritter Satz von Modellen mit einem Neutralino LSP und zusätzlichen Einschränkungen
 - Vorhersage der Higgs Masse von $126 \pm 3 \text{ GeV}$
 - LSP stimmt mit WMAP relic density überein
 - weniger als 1 % Finabstimmung (low-FT)
- \rightarrow **Etwa 10 000 Modelle erfüllen dies**

- Ausschluss der Modelle:

Suche	LSP	LSP	Low-FT
	Neutralino	Gravitino	
2 – 6 Jets	26,7 %	21,6 %	44,9 %
Multijets	3,3 %	3,8 %	20,9 %
1-Lepton	3,3 %	6,0 %	20,9 %
SS Dileptonen	4,9 %	12,4 %	35,5 %
Mittleres Stop ($2l$)	0,6 %	8,1 %	4,9 %
Mittleres/Schweres Stop ($1l$)	3,8 %	4,5 %	21,0 %
Direktes Sbottom ($2b$)	6,2 %	5,1 %	12,1 %
3. Generation Squarks ($3b$)	10,8 %	9,9 %	40,8 %
3. Generation Squarks ($3l$)	1,9 %	9,2 %	26,5 %
3 Leptonen	1,4 %	8,8 %	32,3 %
4 Leptonen	3,0 %	13,2 %	46,9 %
$Z + \text{Jets} + E_T^{\text{miss}}$	0,3 %	1,4 %	6,8 %

arXiv:1407.4130 [hep-ph]

→ Überraschend hoher Ausschluss durch 4 Leptonenanalyse
(ATLAS-CONF-2012-153)

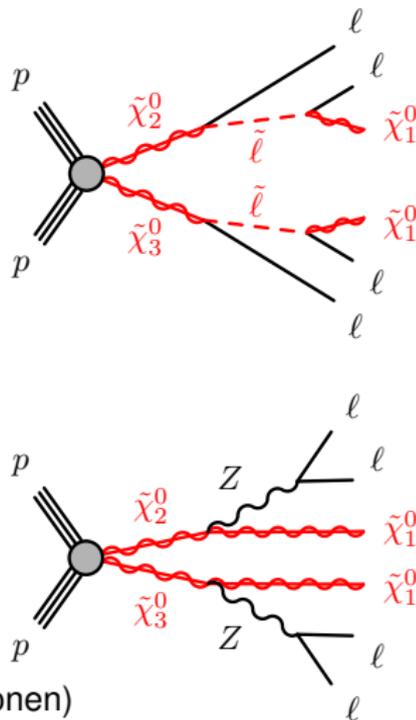
Überblick über die 4-Lepton-Analyse

- ATLAS Kollaboration (arXiv:1405.5086 [hep-ex]): Suche nach Supersymmetrie bei Ereignissen mit vier oder mehr Leptonen
- Erläuterung der verschiedenen Signalregionen:

Signalregion	$N(e/\mu)$	$N(\tau)$	Z Kandidat	$N_{\text{BSM}}^{\text{obs}}$
SR0noZa	≥ 4	≥ 0	Veto	5,9
SR0noZb	≥ 4	≥ 0	Veto	3,7
SR1noZa	$= 3$	≥ 1	Veto	5,7
SR1noZb	$= 3$	≥ 1	Veto	3,5
SR2noZa	$= 2$	≥ 2	Veto	9,2
SR2noZb	$= 2$	≥ 2	Veto	8,7
SR0Z	≥ 4	≥ 0	erforderlich	8,1
SR1Z	$= 3$	≥ 1	erforderlich	5,3
SR2Z	$= 2$	≥ 2	erforderlich	3,5

arXiv:1405.5086 [hep-ex]

- Untergrundausschluss durch Forderung von E_T^{miss} (alle Signalregionen) oder m_{eff} („b“-Regionen)
- Z-Veto oder Forderung (sämtliche SFOS Kombinationen)



Ziel der Studie

- Verstehen des hohen Ausschlussgrades der 4 Leptonenanalyse
- Simulation von 10 177 pMSSM Modellen mit Herwig++
- Untersuchung der Modelle mit
 - Kinematischen Schnitten auf die erzeugten Leptonen und Jets
 - Ohne Detektorsimulation
 - Zusätzlich mit einer abgeschätzten Rekonstruktionseffizienz
 - NLO+NLL Wirkungsquerschnitt für „stark“ erzeugte Ereignisse
 - LO Wirkungsquerschnitt für „schwach“ erzeugte Ereignisse

Anzahl der beobachtbaren SUSY Ereignisse

$$N = \sigma \cdot L \cdot A \cdot \epsilon$$

Anzahl der beobachtbaren SUSY Ereignisse

Wirkungsquerschnitt

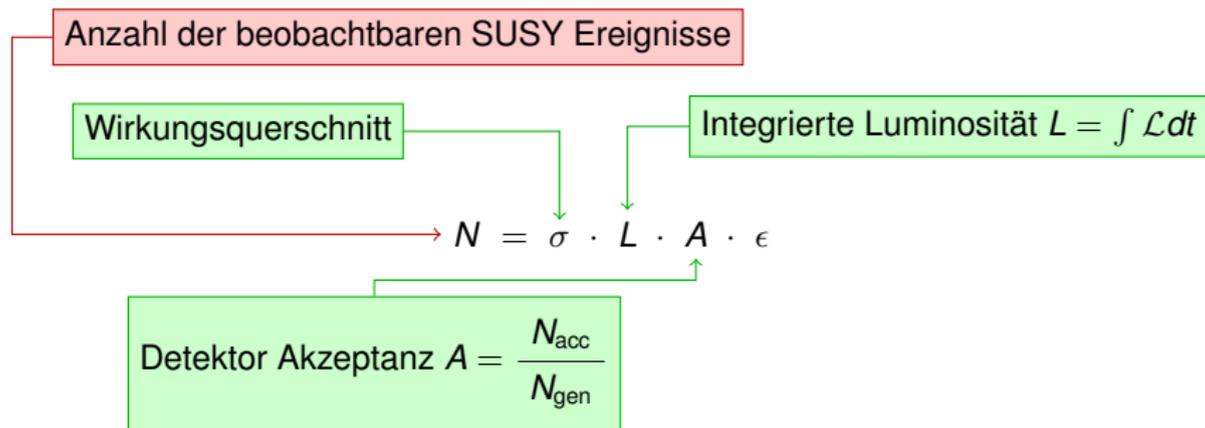
$$N = \sigma \cdot L \cdot A \cdot \epsilon$$

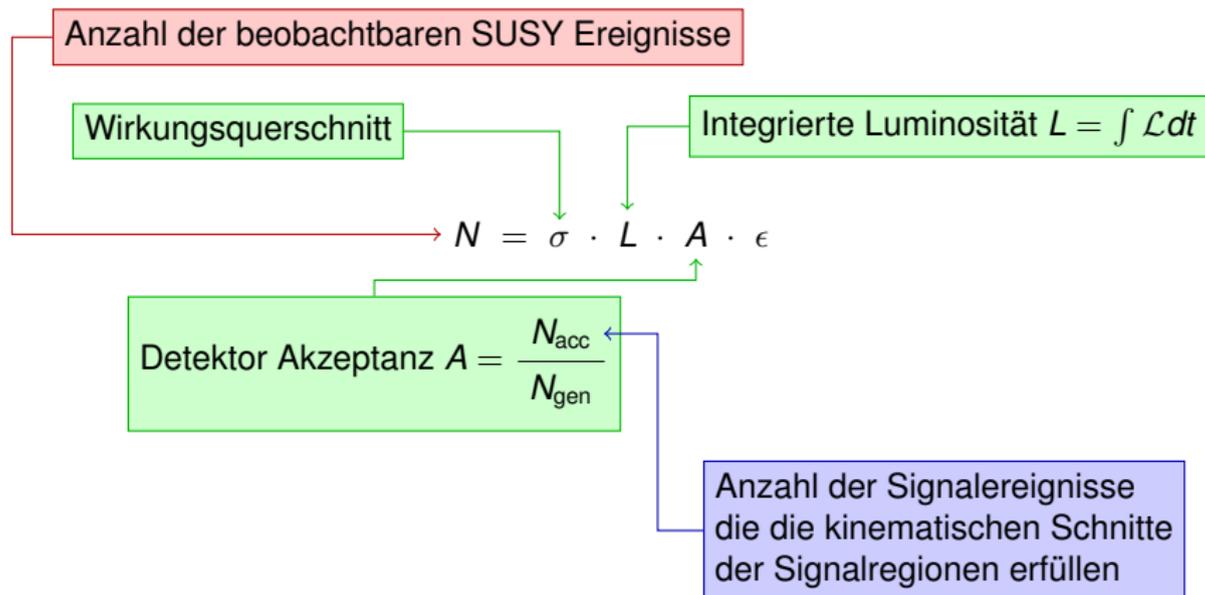
Anzahl der beobachtbaren SUSY Ereignisse

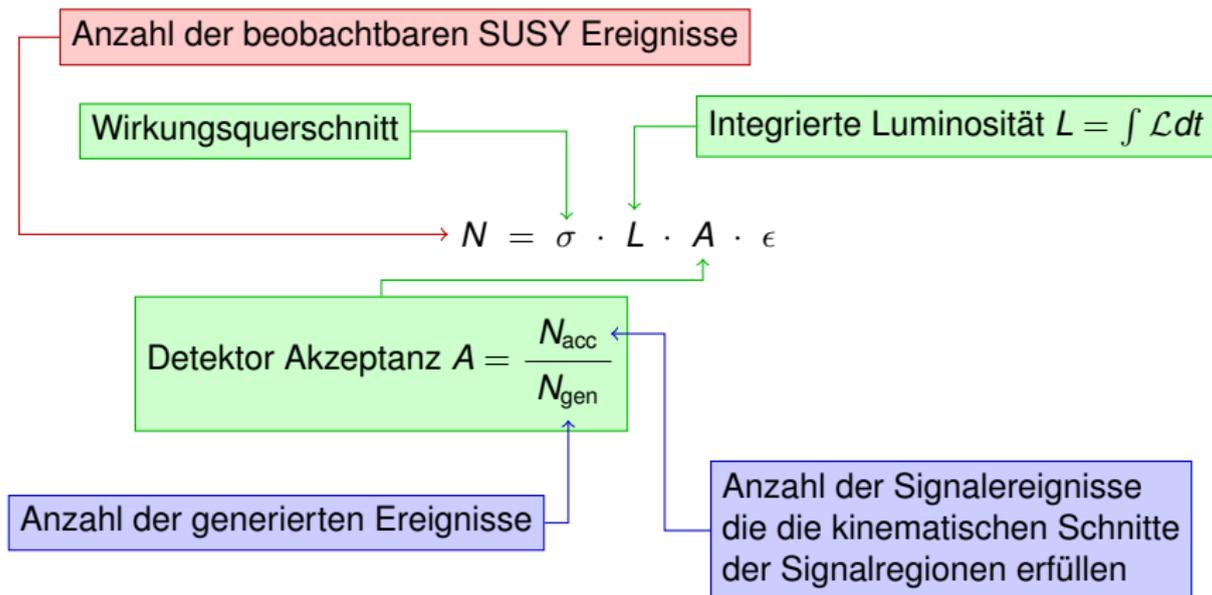
Wirkungsquerschnitt

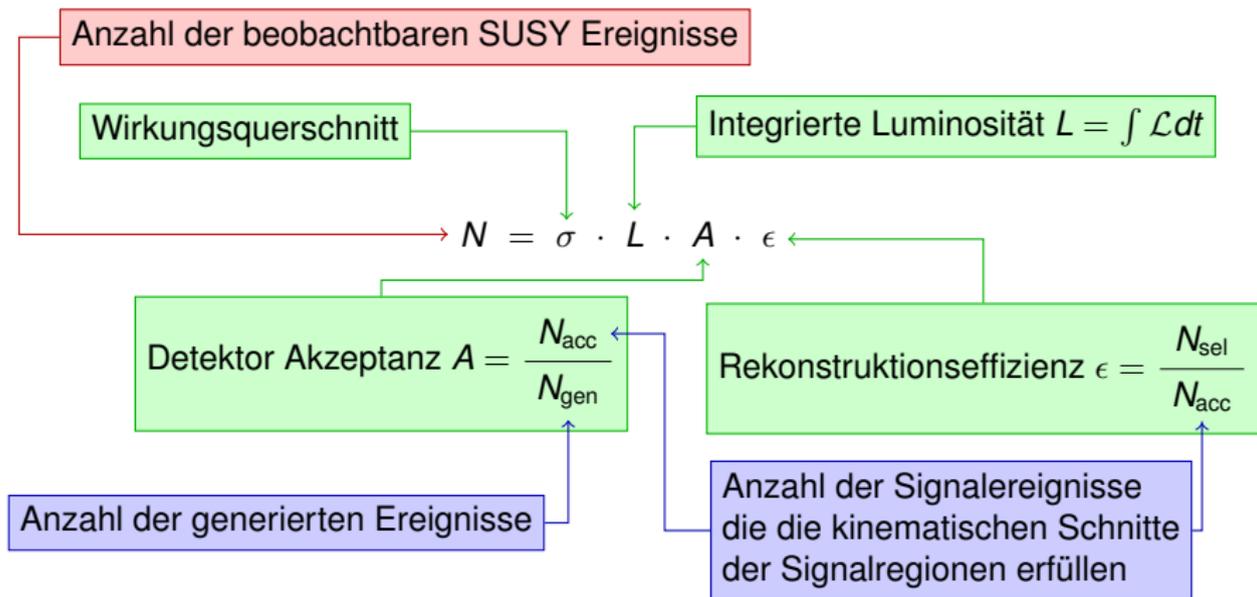
Integrierte Luminosität $L = \int \mathcal{L} dt$

$$N = \sigma \cdot L \cdot A \cdot \epsilon$$









Anzahl der beobachtbaren SUSY Ereignisse

Wirkungsquerschnitt

Integrierte Luminosität $L = \int \mathcal{L} dt$

$$N = \sigma \cdot L \cdot A \cdot \epsilon$$

Detektor Akzeptanz $A = \frac{N_{\text{acc}}}{N_{\text{gen}}}$

Rekonstruktionseffizienz $\epsilon = \frac{N_{\text{sel}}}{N_{\text{acc}}}$

Anzahl der generierten Ereignisse

Anzahl der Signalereignisse die die kinematischen Schnitte der Signalregionen erfüllen

Anzahl der selektierten Ereignisse nach Berücksichtigung von Fehlrekonstruktion, Fehlidentifikation und anderen Detektor-Level Effekten

Anzahl der beobachtbaren SUSY Ereignisse

Wirkungsquerschnitt

Integrierte Luminosität $L = \int \mathcal{L} dt$

$$N = \sigma \cdot L \cdot A \cdot \epsilon$$

Detektor Akzeptanz $A = \frac{N_{\text{acc}}}{N_{\text{gen}}}$

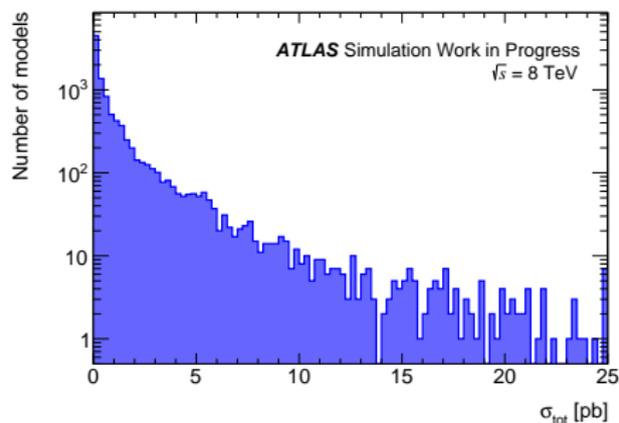
Rekonstruktionseffizienz $\epsilon = \frac{N_{\text{sel}}}{N_{\text{acc}}}$

Anzahl der generierten Ereignisse

Anzahl der Signalereignisse die die kinematischen Schnitte der Signalregionen erfüllen

Anzahl der selektierten Ereignisse nach Berücksichtigung von Fehlrekonstruktion, Fehlidentifikation und anderen Detektor-Level Effekten

Mit prozessspezifischem Wirkungsquerschnitt $\Rightarrow N = L \sum_{\text{proc}} \sigma_{\text{proc}} A_{\text{proc}} \epsilon_{\text{proc}}$

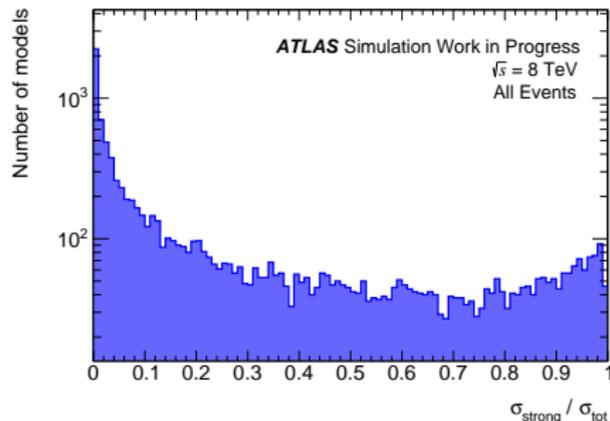


Totaler Wirkungsquerschnitt

$$\sigma_{\text{tot}} = \sum_{\text{proc}} \sigma_{\text{proc}}$$

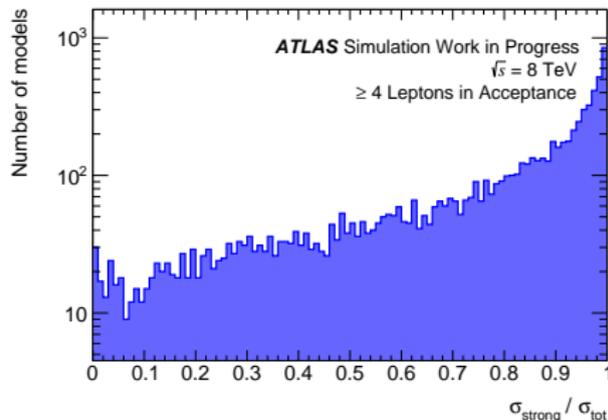
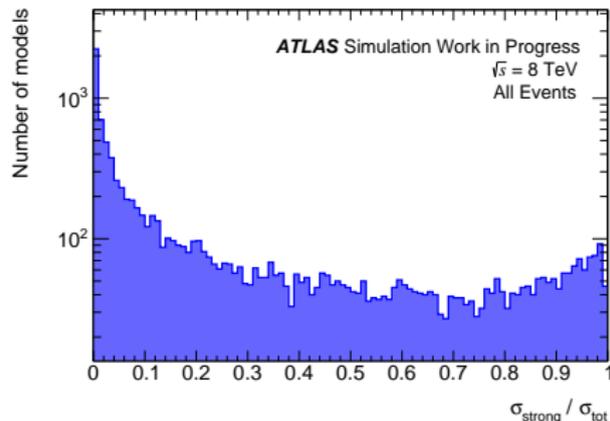
- $\sigma_{\text{tot}} < 1 \text{ pb}$ für die meisten Modelle
- Wenige besitzen hohen Wirkungsquerschnitt bis zu 45 pb
- Auswirkung der Vernachlässigung des NLO Anteiles elektroschwacher Prozesse?

→ Untersuchung des Verhältnisses $\sigma_{\text{strong}}/\sigma_{\text{tot}}$



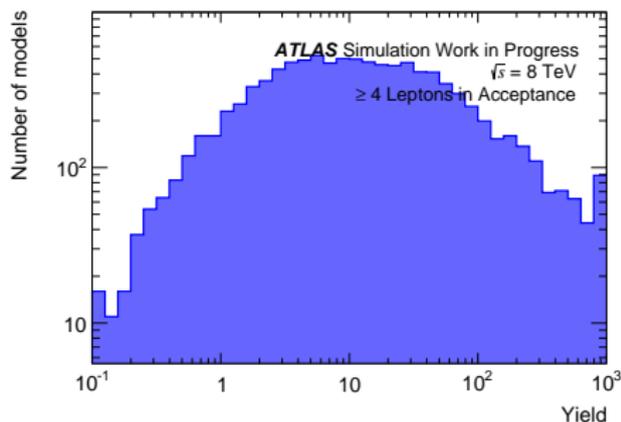
- Großteil der Modelle nahe bei Null (50% unterhalb 0,1)
 - Nur 6% der Modelle haben überwiegend starke Prozesse ($\sigma_{\text{strong}} / \sigma_{\text{tot}} > 0,9$)
- Nur wichtig falls diese Prozesse Ereignisse mit vier geladenen Leptonen erzeugen

Anteil der Prozesse mit starker Wechselwirkung

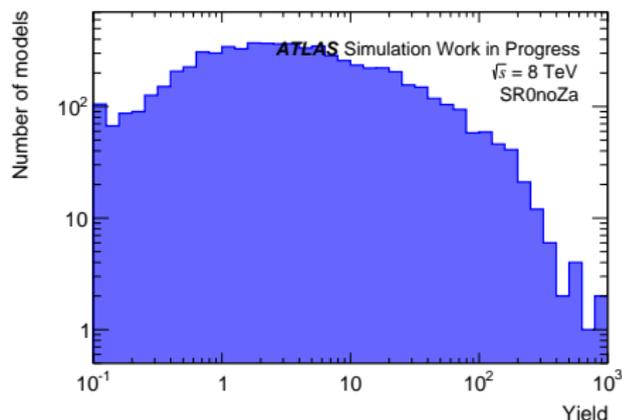
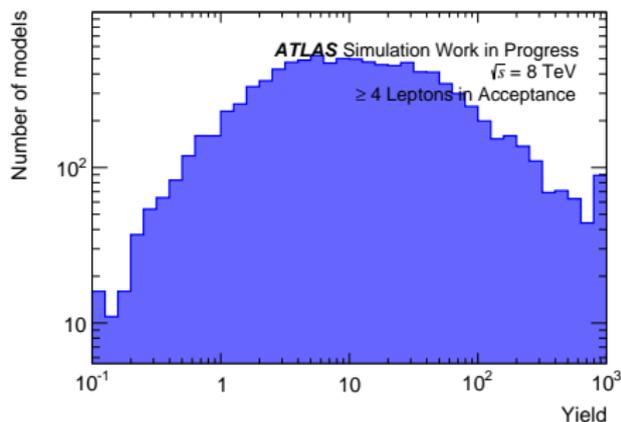


- Großteil der Modelle nahe bei Null (50 % unterhalb 0,1)
 - Nur 6 % der Modelle haben überwiegend starke Prozesse ($\sigma_{\text{strong}} / \sigma_{\text{tot}} > 0,9$)
- Nur wichtig falls diese Prozesse Ereignisse mit vier geladenen Leptonen erzeugen

- Großteil der Modelle nahe bei Eins (44 % oberhalb 0,9)
 - Nur 2 % der Modelle haben überwiegend elektroschwache Prozesse ($\sigma_{\text{strong}} / \sigma_{\text{tot}} < 0,1$)
- 4 Lepton Ereignisse meistens durch Squark und Gluino Zerfälle erzeugt



- Großteil der Modelle hat nur wenige Signalereignisse bei $20,3 \text{ fb}^{-1}$
- Mittelwert bei 53 Signalereignissen
- Aber: Signalregion Selektionskriterien noch nicht angewandt



- Großteil der Modelle hat nur wenige Signalereignisse bei $20,3 \text{ fb}^{-1}$
- Mittelwert bei 53 Signalereignissen
- Aber: Signalregion Selektionskriterien noch nicht angewandt

- Deutliche Reduzierung der Signalereignisse bei $20,3 \text{ fb}^{-1}$
- Mittelwert bei 14 Signalereignissen

→ Dennoch gute Aussichten viele Modelle auszuschließen ($N_{\text{BSM}}^{\text{obs}} \lesssim 4 - 9 \text{ Ereignisse}$)

- 3664 von 10 177 Modellen lassen sich ausschließen (36 %)
- Ausschluss nach Signalregion:

Signalregion	Ausgeschl. Modelle
SR0noZa/b	2832 ± 24
SR1noZa/b	2936 ± 25
SR2noZa/b	1146 ± 11
SR0Z	1538 ± 15
SR1Z	462 ± 5
SR2Z	172 ± 2

ATLAS Simulation Work in Progress

- Die meisten Modelle werden durch mehrere Signalregionen (inklusive Regionen mit Taus) ausgeschlossen
- Signalregionen mit Z Veto zeigen höheren Ausschluss also welche die ein Z Boson fordern; nur wenige Modelle haben reale Z Bosonen in ihrem Endzustand

- Um die Rekonstruktionseffizienz des ATLAS Detektors zu berücksichtigen wird folgende Annahme gemacht:
 - Für „SR0“-Regionen: $\epsilon = 0,7$
 - Für „SR1“-Regionen: $\epsilon = 0,2$
 - Für „SR2“-Regionen: $\epsilon = 0,1$
- Verringerung der Anzahl ausgeschlossener Modelle auf 2609 (26 %)
- Ausschluss nach Signalregion:

Signalregion	Ausgeschl. Modelle	Ausgeschl. Modelle mit ϵ
SR0noZa/b	2832 ± 24	2347 ± 21
SR1noZa/b	2936 ± 25	1212 ± 12
SR2noZa/b	1146 ± 11	94 ± 1
SR0Z	1538 ± 15	1071 ± 11
SR1Z	462 ± 5	89 ± 1
SR2Z	172 ± 2	4 ± 1

ATLAS Simulation Work in Progress

- Ausschlussrate verringert sich drastisch für Signalregionen die Taus vordern
- 98 % aller ausgeschlossenen Modelle werden durch „SR0“-Regionen ausgeschlossen

- Die Sensitivität der ATLAS SUSY-Suche in Endzuständen mit 4 Leptonen für Modelle mit geringer Feinabstimmung im pMSSM wurde untersucht
 - Ereignisse mit 4 Leptonen treten hauptsächlich durch Squark und Gluino Produktion auf (starke Wechselwirkung)
 - Mit realistischer Rekonstruktionseffizienz: Großteil der Sensitivität kommt von Ereignissen wo nur Elektronen und Myonen gefordert werden
 - Ausschlussrate geringer als in ursprünglicher Veröffentlichung (47 %), dennoch relativ hoch (26 %)
- **Multilepton Suche die zusätzlich Jets fordert kann ein mächtiges Werkzeug zur Überprüfen von low-FT SUSY Szenarios sein**

Danke für die Aufmerksamkeit!

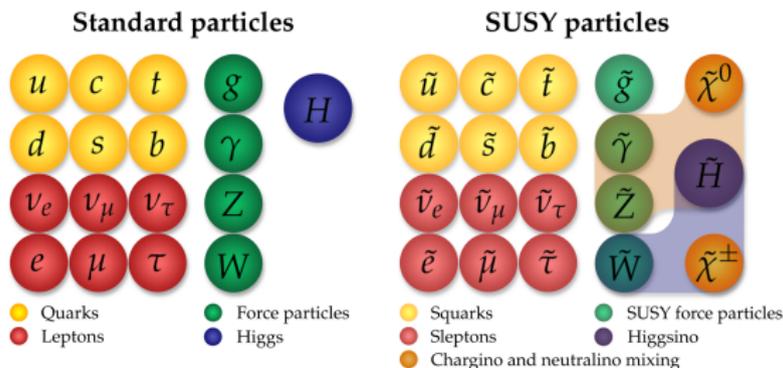
Supersymmetrie als Erweiterung des Standardmodells

(Eine) Motivation: Das **Hierarchieproblem**

- Großer Unterschied zwischen der Stärke der schwachen Kraft und der Gravitation im Standardmodell nicht erklärbar
- Higgsmasse $m_H = 125 \text{ GeV}$ sollte durch Loop-Korrekturen nahe der Planckmasse von 10^{19} GeV liegen

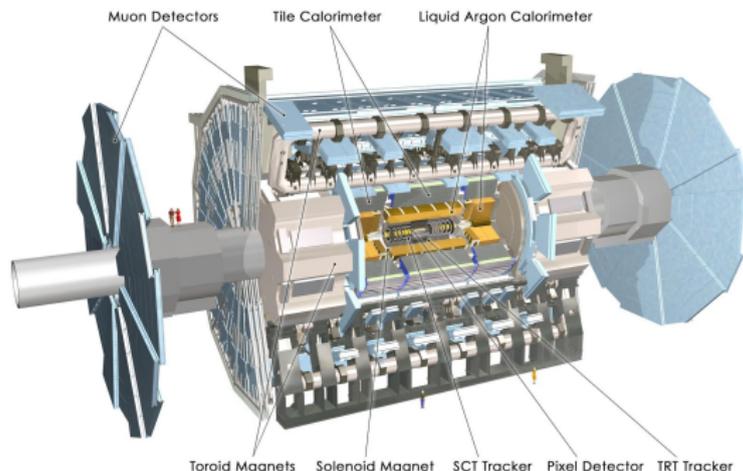
Mögliche Lösung: **Supersymmetrie (SUSY)**

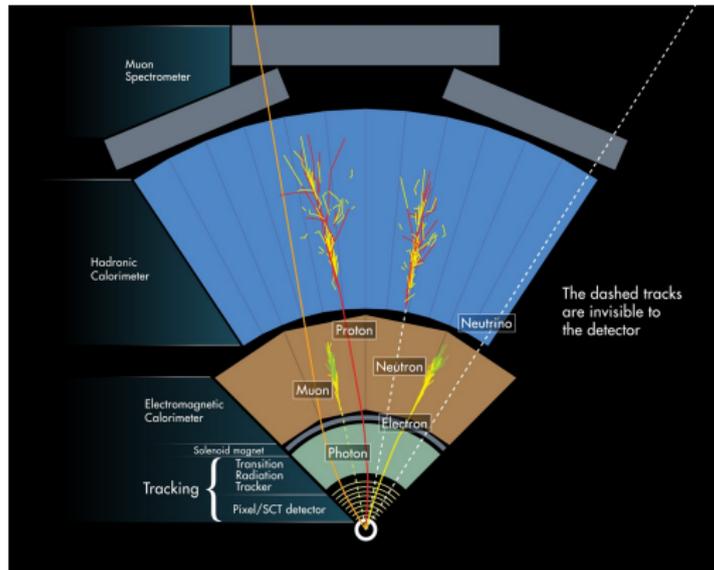
- Finde Symmetrie die die Loop-Korrekturen automatisch behebt
- Korrekturen von Fermionen und Bosonen haben unterschiedliches Vorzeichen
- Idee: Jedem Fermion (Boson) wird ein supersymmetrisches Boson (Fermion) zugeordnet



- Trotz ausgiebiger Suche wurde bisher kein supersymmetrisches Teilchen gefunden
- Supersymmetrie muss eine **gebrochene Symmetrie** sein
- Minimales supersymmetrisches Standardmodell (MSSM): Erweiterung des Standardmodells das Supersymmetrie realisiert mit geringster Anzahl an zusätzlichen Feldern (R -Paritätserhaltung) → **105 neue Parameter**
- Anzahl freier Parameter zu groß für allgemeine Studien
- Häufiges Vorgehen: Verwendung eines speziellen SUSY Modelles um Parameter mittels einem bestimmten Brechungsmechanismus zu reduzieren
- Aber Mechanismus kann ein anderer sein
- Sinnvoll: Betrachtung einer Theorie die keine Annahme über den Ursprung der Symmetriebrechung macht

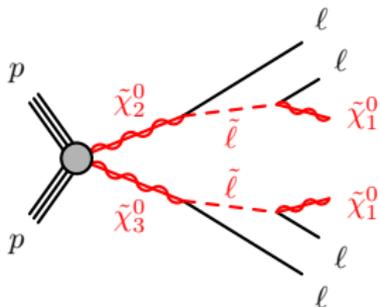
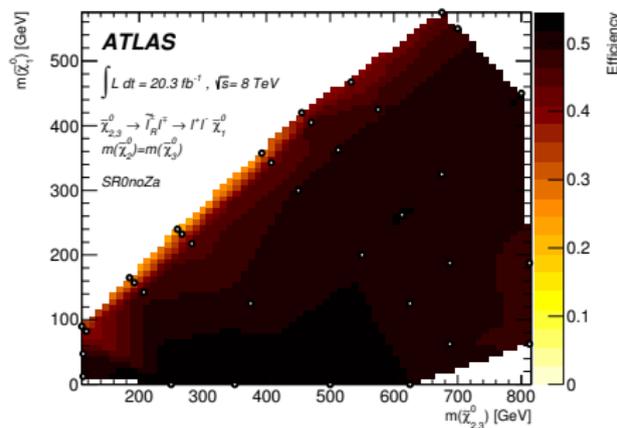
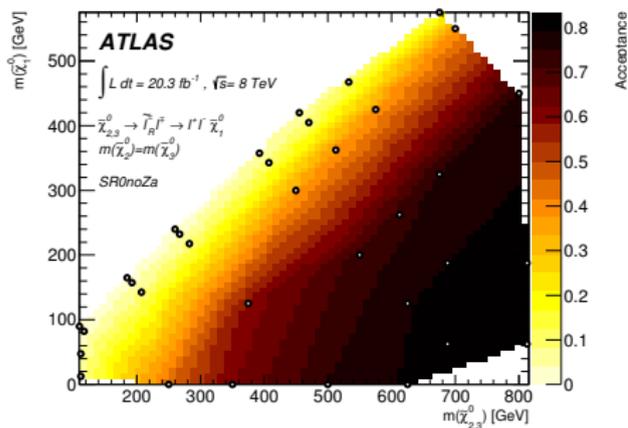
- Teilchendetektor am LHC am CERN
- Höchste Schwerpunktsenergie für Proton-Proton Kollisionen $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$
- Ab Juni Erhöhung auf $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$
- Hohe instantane Luminosität von $\mathcal{L}_{\text{max}} = 7,7 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Drei Hauptkomponenten
 - Innerer Detektor
 - Kalorimetersystem
 - Muonspektrometer





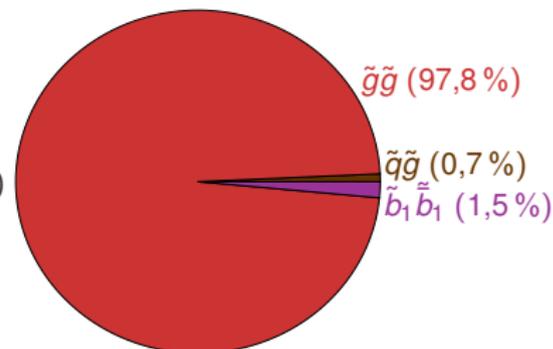
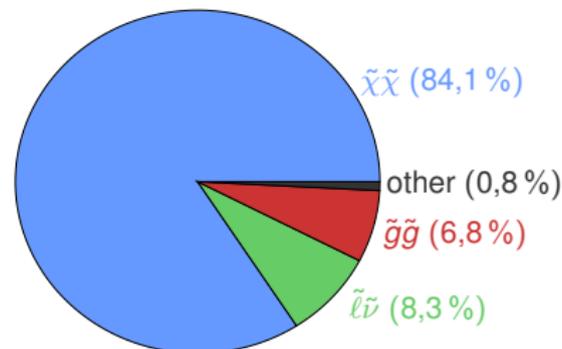
- Innerer Detektor: Tracking & Impulsmessung mittels eines solenoidalen B-Feldes
- Kalorimeter (elektromagnetisch und hadronisch): Energiedeposition
- Muonspektrometer: Tracking & Impulsmessung mittels eines toroidalen B-Feldes
- Jets: Hadronen treten i. A. nicht isoliert auf → gemeinsame Flugrichtung

Akzeptanz – Rekonstruktionseffizienz



- Akzeptanz: Beinhaltet sämtliche mögliche Schnitte (p_T , E_T^{miss} , m_{eff} , ...)
- Akzeptanz: einfach zu simulieren
- Rekonstruktionseffizienz: rel. homogen über den gesamten Bereich verteilt
- Rekonstruktionseffizienz: aufwändig zu simulieren

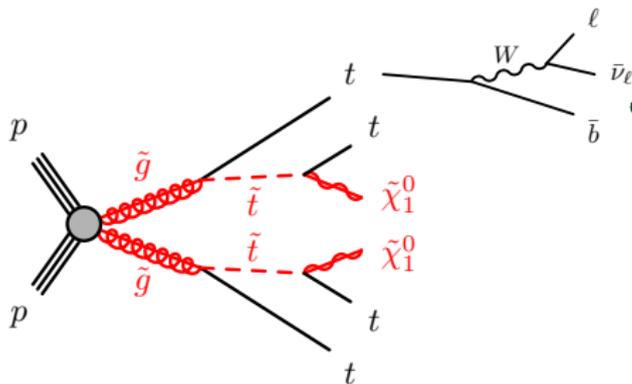
$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$



- $\sigma_{\text{strong}}/\sigma_{\text{tot}} = 0,07$ für alle Ereignisse
 - $\sigma_{\text{strong}}/\sigma_{\text{tot}} = 1$ für alle Ereignisse mit 4 oder mehr geladenen Leptonen
- Starke Verschiebung des Verhältnisses $\sigma_{\text{strong}}/\sigma_{\text{tot}}$

Untersuchung eines charakteristischen Modells

m [GeV]	Zerfallsprod.	BR
$\tilde{\chi}_1^0$	stabil	–
$\tilde{\chi}_2^0$	$\tilde{\chi}_0^1 \ell^\mp \ell^\pm$	0,07
$\tilde{\chi}_3^0$	$\tilde{\nu}_l \nu_l$	1
$\tilde{\chi}_1^\pm$	$\tilde{\chi}_1^0 \ell^\pm \nu_{\ell^\pm}$	0,33
\tilde{L}	$\tilde{\chi}_{1,2,3}^0 l$	1
$\tilde{\nu}_l$	$\tilde{\chi}_1^0 \nu_l$	1
\tilde{g}	$\tilde{\chi}_{1,2,3}^0 t\bar{t}$	0,54
	$\tilde{\chi}_1^- t\bar{b}$	0,44



● Chargino / Neutralino Paare

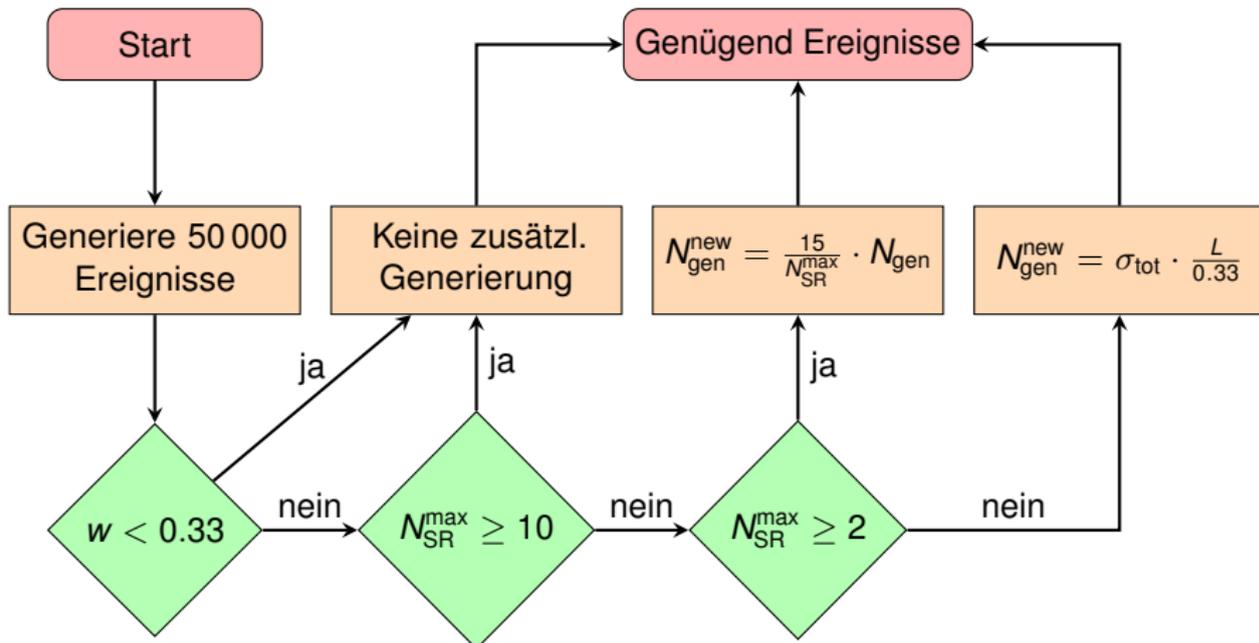
- Für $\tilde{\chi}_2^0 \tilde{\chi}_2^0$ Paarerzeugung $\sigma = 467$ ab $\Rightarrow 0,05$ Ereignisse in Endzuständen mit vier Leptonen in $20,3 \text{ fb}^{-1}$ Daten
 - $\tilde{\chi}_3^0$ und $\tilde{\chi}_1^\pm$ zerfallen nicht in Leptonenpaare
- \rightarrow Keine 4 Leptonen Endzustände

● Slepton & Sneutrino Paare

- Sneutrino zerfällt in kein Lepton
 - Zerfallsbreite $< 10^{-6}$ für $\tilde{l} l \rightarrow (\tilde{\chi}_2^0 l)(\tilde{\chi}_3^0 l) \rightarrow (\tilde{\chi}_1^0 l l)(\tilde{\nu}_l \nu_l l)$
- \rightarrow Keine 4 Leptonen Endzustände

● Gluinopare

- Gluinos erzeugen Top-Quarks mit Zerfallsbreite von 98 %
 - Für $\tilde{g}\tilde{g}$ Paarerzeugung $\sigma = 28 \text{ fb} \Rightarrow 1,9$ Ereignisse in Endzuständen mit vier Leptonen in $20,3 \text{ fb}^{-1}$ Daten
- \rightarrow 4 Leptonen Endzustände

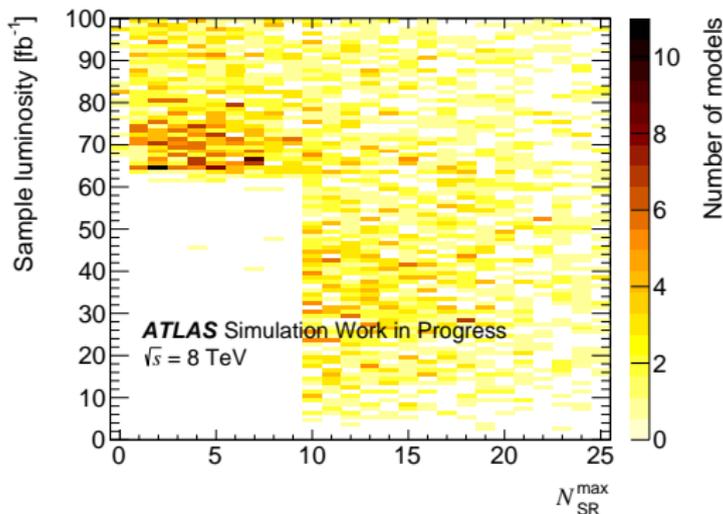


Ereignisgewicht $w = \frac{1}{N_{\text{gen}}} \sum_{\text{events}} \frac{\sigma_{\text{proc}} L}{N_{\text{gen}}^{\text{proc}}} = \frac{\sigma_{\text{tot}} L}{N_{\text{gen}}} = \frac{L}{L_s}$ mit Sample Luminosität $L_s = \frac{N_{\text{gen}}}{\sigma_{\text{tot}}}$

$N_{\text{SR}}^{\text{max}}$: Maximale Anzahl an Signalereignissen aller Signalregion

$N_{\text{gen}}^{\text{new}}$: Anzahl neuzugenerierender Ereignisse

Sample Luminosität gegen maximale Anzahl an Signalereignissen



- Ereignisgenerierung mit bis zu 3 Millionen Ereignissen pro Modell
- Nur 5 Modelle (0,05 %) in der Region $L_s < 60 \text{ fb}^{-1}$ und $N_{SR}^{max} < 10$
- 60 fb^{-1} entsprechen der dreifachen Datenmenge des ATLAS-Detektors ($20,3 \text{ fb}^{-1}$)