

Datenorientierte Untergrundbestimmung für die Suche nach Supersymmetrie in multileptonischen Endzuständen mit dem ATLAS Detektor bei $\sqrt{s} = 13$ TeV

Stefan Maschek

Mike Flowerdew, Hubert Kroha



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



DPG Frühjahrstagung
30. März 2017

Motivation: Das Bezugsmodell

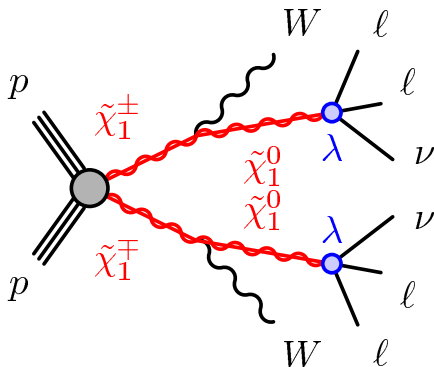
Warum 4 Lepton Signatur?

- Sensitiv auf eine Vielzahl SUSY Modelle
- Sehr geringer Standardmodell-Untergrund
- R-paritätsverletzendes (RPV) Model \rightarrow leichtestes SUSY Teilchen (LSP) kann zu SM zerfallen

R-paritätsverletzender Superpotential-Term

$$\frac{1}{2} \lambda_{ijk} \mathbf{L}_i \mathbf{L}_j \bar{\mathbf{E}}_k$$

i, j, k : Lepton Generation



\rightarrow Suche nach solchen Prozessen mit dem ATLAS Detektor mit $\sqrt{s} = 13$ TeV

SUSY-Suche in Endzuständen mit mindestens 4 Leptonen mit ATLAS: Objekt Selektion

- **Leichte geladene Leptonen** (= Electrons, Myonen)

$$p_T^{\text{Elektron}} > 5 \text{ GeV}$$

$$p_T^{\text{Myon}} > 7 \text{ GeV}$$

- **Jets:**

$$p_T^{\text{jet}} > 20 \text{ GeV}$$

- **Fehlender Transversalimpuls:**

$$\vec{E}_T^{\text{miss}} = - \left(\sum_{\substack{\text{baseline} \\ \text{objects}}} \vec{E}_T + \sum_{\substack{\text{unassociated} \\ \text{inner tracks}}} \vec{E}_T \right)$$

- **Fehlende Transversalenergie:**

$$E_T^{\text{miss}} = \left| \vec{E}_T^{\text{miss}} \right|$$

SUSY-Suche in Endzuständen mit mindestens 4 Leptonen mit ATLAS: Ereignis Selektion

- **Vier (leichte geladene) Leptonen**
- **Z-Veto:** Verwerfe Events, wenn:

$$|m(\ell^+ \ell^-) - m_Z| < 10 \text{ GeV}$$

$$|m(\ell^+ \ell^- \ell'^{\pm}) - m_Z| < 10 \text{ GeV}$$

$$|m(\ell^+ \ell^- \ell'^+ \ell'^-) - m_Z| < 10 \text{ GeV}$$

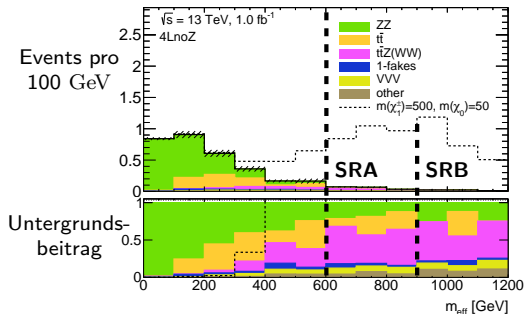
- **Effective Masse:**

$$m_{\text{eff}} = \sum_{\text{leptons}} p_T + \sum_{\text{jets}} p_T + E_T^{\text{miss}}$$

→ **Zwei Signalregionen (SR):**

- ▶ $m_{\text{eff}} > 600 \text{ GeV}$ → Signalregion A (SRA)
- ▶ $m_{\text{eff}} > 900 \text{ GeV}$ → Signalregion B (SRB)

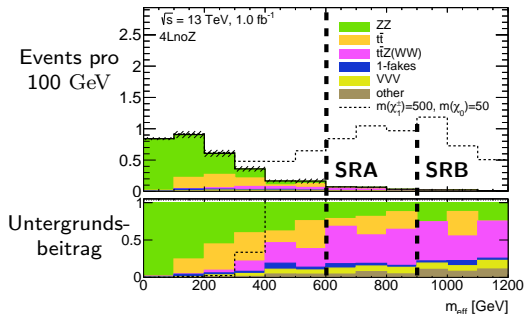
Erwarteter Untergrund (MC)



Dominant background processes

- ZZ bei niedrigen m_{eff}
- $t\bar{t}Z$ bei hohen m_{eff} (SR)
- Ebenfalls hoher Beitrag durch $t\bar{t}$

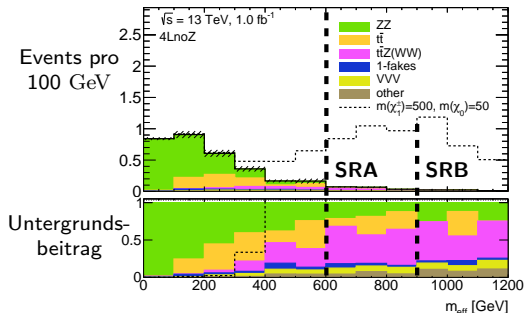
Erwarteter Untergrund (MC)



Dominant background processes

- ZZ bei niedrigen m_{eff} → irreduzibel
- $t\bar{t}Z$ bei hohen m_{eff} (SR) → irreduzibel
- Ebenfalls hoher Beitrag durch $t\bar{t}$ → **reduzibel**

Erwarteter Untergrund (MC)

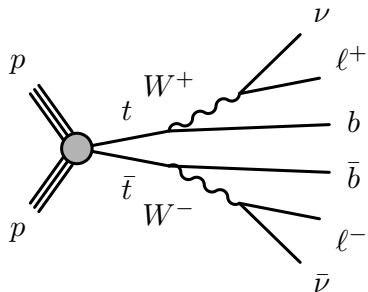


Dominant background processes

- ZZ bei niedrigen m_{eff} → irreduzibel → Monte Carlo
- $t\bar{t}Z$ bei hohen m_{eff} (SR) → irreduzibel → Monte Carlo
- Ebenfalls hoher Beitrag durch $t\bar{t}$ → **reduzibel** → schwer zu simulieren! → datenorientiert

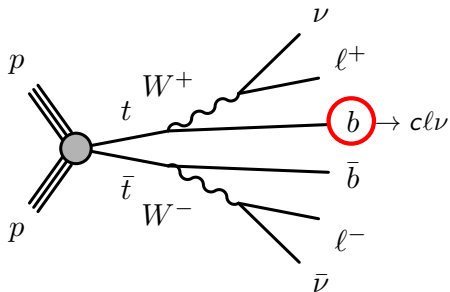
→ Dieser Vortrag beschäftigt sich mit reduzierbaren Untergründen

Reduzierbarer Untergrund und "Fake-Leptonen"



Herkunft der Fake-Leptonen:

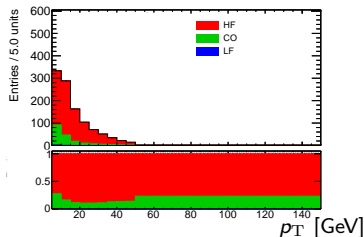
Reduzierbarer Untergrund und "Fake-Leptonen"



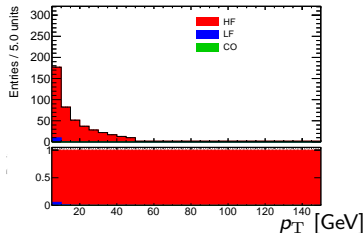
Herkunft der Fake-Leptonen:

- **HF:** Zerfall schwerer Hadronen (heavy flavor hadrons) (> 90%)

Elektronen

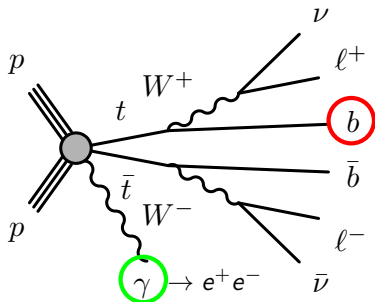


Myonen



Meistens: **herausgefiltert** durch die **Signal-Objekt Kriterien**

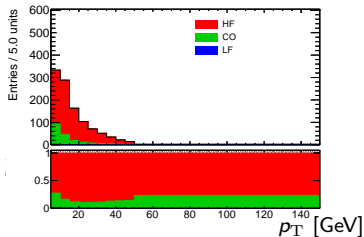
Reduzierbarer Untergrund und "Fake-Leptonen"



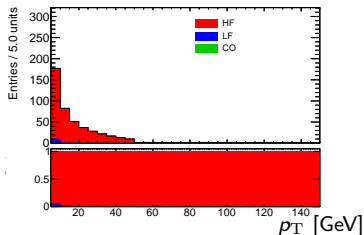
Herkunft der Fake-Leptonen:

- **HF:** Zerfall schwerer Hadronen (heavy flavor hadrons) (> 90%)
- **CO:** Photon conversion, $\gamma \rightarrow e^+e^-$ ($\approx 20\%$ der Fake-Elektronen)

Elektronen

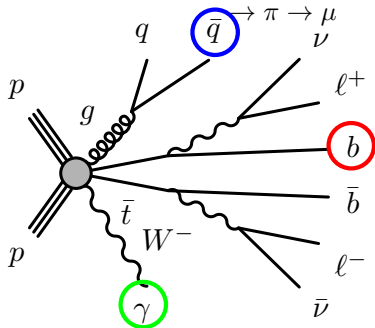


Myonen



Meistens: **herausgefiltert** durch die **Signal-Objekt Kriterien**

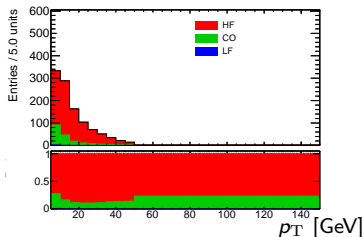
Reduzierbarer Untergrund und "Fake-Leptonen"



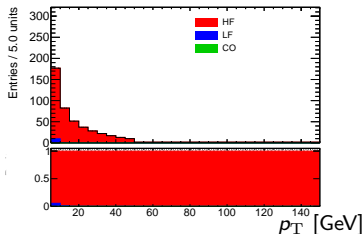
Herkunft der Fake-Leptonen:

- **HF:** Zerfall schwerer Hadronen (heavy flavor hadrons) (> 90%)
- **CO:** Photon conversion, $\gamma \rightarrow e^+e^-$ ($\approx 20\%$ der Fake-Elektronen)
- **LF:** Zerfallende oder missidentifizierte leichte Mesonen ($\approx 5\%$ der Fake-Myonen)

Elektronen



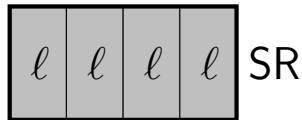
Myonen



Meistens: **herausgefiltert** durch die **Signal-Objekt Kriterien**

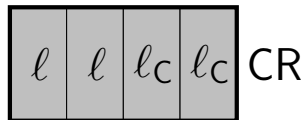
Datenorientierte Untergrundsbestimmung

- 1 Definiere Kontroll-Leptonen (ℓ_C):
Rekonstruierte Leptonen, die die durch
Signalkriterien herausgefiltert würden



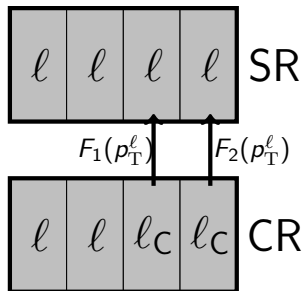
Datenorientierte Untergrundsbestimmung

- 1 Definiere Kontroll-Leptonen (ℓ_C):
Rekonstruierte Leptonen, die die durch Signalkriterien herausgefiltert würden
- 2 Definiere Kontroll-Region (CR):
Zwei Signal-Leptonen werden durch Kontroll-Leptonen ersetzt.



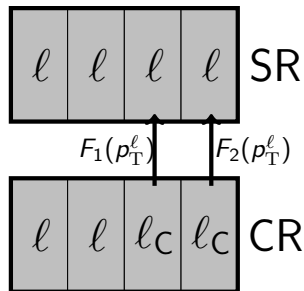
Datenorientierte Untergrundsbestimmung

- 1 Definiere Kontroll-Leptonen (ℓ_C):
Rekonstruierte Leptonen, die die durch Signalkriterien herausgefiltert würden
- 2 Definiere Kontroll-Region (CR):
Zwei Signal-Leptonen werden durch Kontroll-Leptonen ersetzt.
- 3 Bestimmung des reduzierbaren Untergrunds durch Extrapolation von CR nach SR in Daten,
 $N_{SR} = N_{CR} F_1 F_2$.



Datenorientierte Untergrundsbestimmung

- 1 Definiere Kontroll-Leptonen (ℓ_C):
Rekonstruierte Leptonen, die die durch Signalkriterien herausgefiltert würden
- 2 Definiere Kontroll-Region (CR):
Zwei Signal-Leptonen werden durch Kontroll-Leptonen ersetzt.
- 3 Bestimmung des reduzierbaren Untergrunds durch Extrapolation von CR nach SR in Daten,
 $N_{SR} = N_{CR} F_1 F_2$.



Lepton-Fake-Faktor

$$F(p_T^l) = \frac{P(\text{signal})}{P(\text{control})} = \frac{P(\text{signal})}{1 - P(\text{signal})}$$

Bestimmung des Fake-Faktors: Bisherige Methode

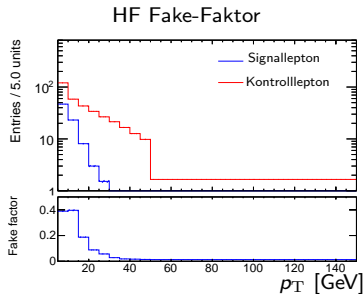
Bestimmung durch ein gewichtetes Mittel

$$F = \sum_{i=HF,LF,CO} R^i F^i C^i$$

- R^i : Erwarteter Beitrag
- F^i : Durch MC bestimmter Fake-Faktor
- C^i : Korrekturfaktor, in Daten bestimmt
 - ▶ Berechnet für HF
 - ▶ Für LF und CO werden hohe Unsicherheiten angenommen.

Monte Carlo Fake-Faktor $F = \sum R^i F^i C^i$

- In $t\bar{t}$ MC sample bestimmt
- Fake-Herkunft in Simulation bekannt

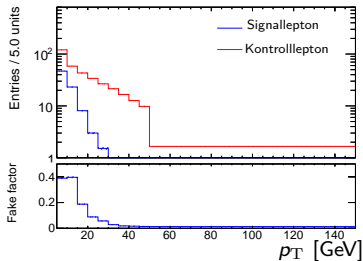


Monte Carlo Fake-Faktor $F = \sum R^i F^i C^i$

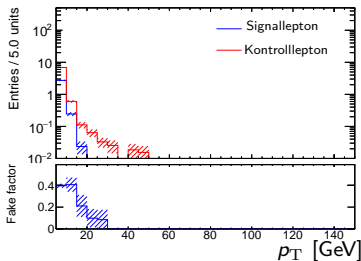
- In $t\bar{t}$ MC sample bestimmt
- Fake-Herkunft in Simulation bekannt

Fake-Faktor hängt stark vom
Transversalimpuls (p_T) ab
 $\rightarrow F = F(p_T)$

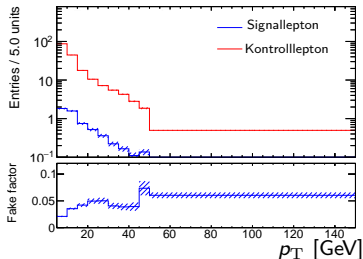
HF Fake-Faktor



LF Fake-Faktor



CO Fake-Faktor



Tag-and-probe:
 $b\bar{b}$ ($c\bar{c}$) angereicherte Region

- Myon innerhalb eines b -jets ("Tag")
- Genau ein weiteres Lepton ("Probe")
→ Probe-Lepton ist Fake

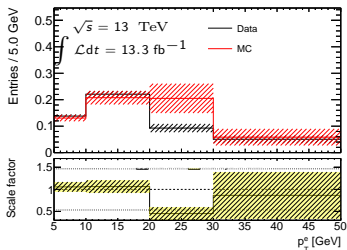
large $b\bar{b}$ Feynman(?)

Korrektur-Faktor

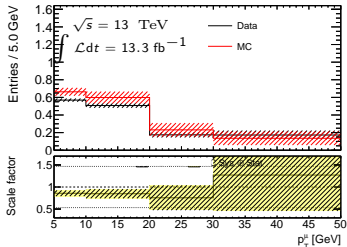
$$C_{t\bar{t}}^{HF} = C_{b\bar{b}}^{HF} = \frac{F_{b\bar{b},HF}^{\text{data}}}{F_{b\bar{b},HF}^{\text{MC}}},$$

Resultierender Korrektur-Faktor, $F = \sum R^i F^i C^i$

Elektronen



Myonen



↪ **Globales Mittel**

Elektronen

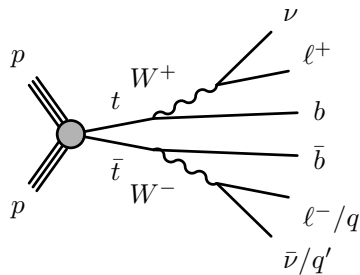
$$C_{(e)}^{HF} = 1.011 \pm 0.079$$

Myonen

$$C_{(\mu)}^{HF} = 0.848 \pm 0.053$$

Direkte Messung des Fake-Faktors in Daten

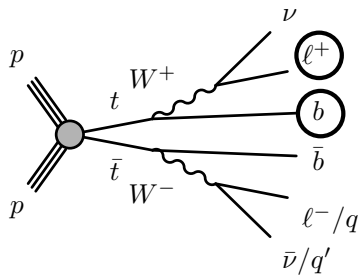
in der $t\bar{t}$ Paarerzeugung.



Bestimmung des Fake-Faktors: Alternative Methode

Tag-and-Probe: $t\bar{t}$ angereicherte Region

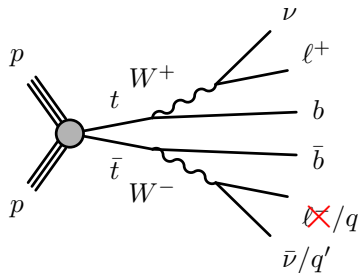
- Ein hochenergetisches Signal-Myon ("Tag"),
- Mindestens ein b -Jet,



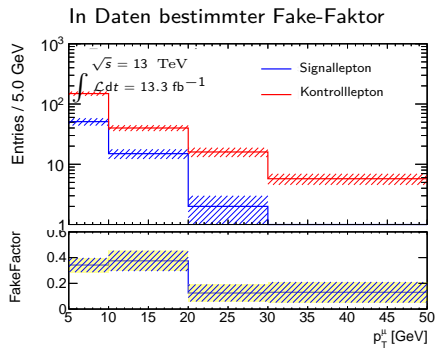
Bestimmung des Fake-Faktors: Alternative Methode

Tag-and-Probe: $t\bar{t}$ angereicherte Region

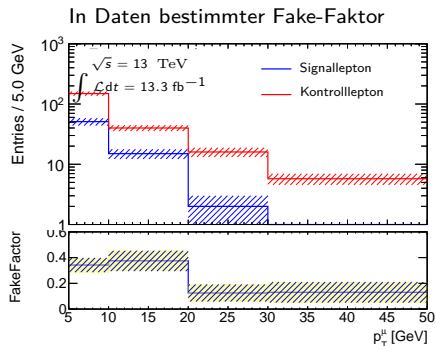
- Ein hochenergetisches Signal-Myon ("Tag"),
- Mindestens ein b -Jet,
- Ein weiteres Lepton ("Probe") mit **gleicher Ladung** wie das Tag-Myon
→ Probe-Lepton ist Fake



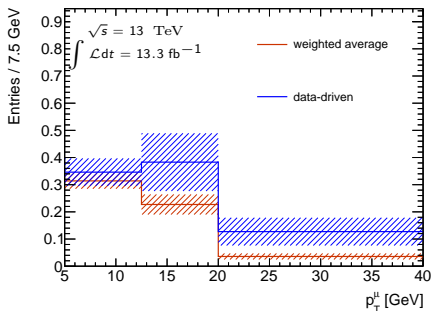
In Daten bestimmter Fake-Faktor



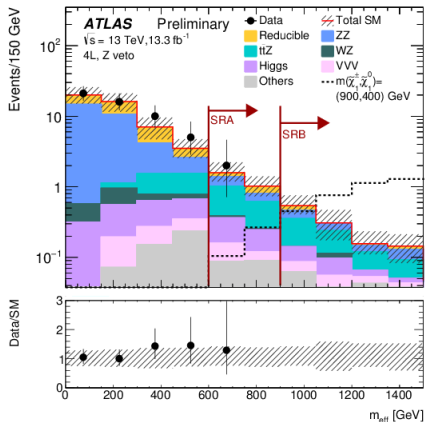
In Daten bestimmter Fake-Faktor verglichen mit bisheriger Methode



Vergleich mit vorangegangener Methode

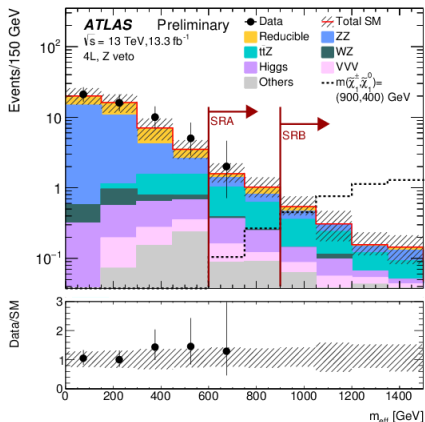


Ergebnisse der Run-2 Analyse

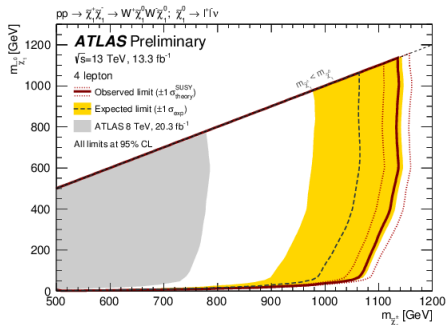


- Integrierte Luminosität 13.3 fb^{-1}
- Data-MC Vergleich in niedrigen m_{eff} -Bereich
Validierung der Untergrundabschätzung
- 2 Events aufgezeichnet
- Konsistent mit SM

Ergebnisse der Run-2 Analyse



- Integrierte Luminosität 13.3 fb^{-1}
- Data-MC Vergleich in niedrigen m_{eff} -Bereich
Validierung der Untergrundabschätzung
- 2 Events aufgezeichnet
- Konsistent mit SM



- Interpretation: Ausschluss von Massenbereichen im Bezugsmodell
- Grenzen aus Run-1 wurden erweitert
 $0.75 \text{ TeV} \rightarrow 1.14 \text{ TeV}$

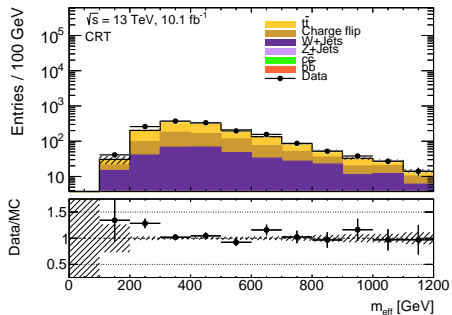
- Suche nach R-paritätsverletzenden Zerfälle im **Vier-Lepton-Kanal** mit dem ATLAS-Detektor bei $\sqrt{s} = 13$ TeV
- Vorstellung einer **datenorientierten Methode der Untergrundabschätzung** des **reduzierten Untergrunds**
- Zwei unterschiedliche Methoden zur Bestimmung der **Fake-Faktoren** zeigen konsistente Ergebnisse
- **Ausschluss** von Chargino Massen im the RPV-Model bis zu 1.14 TeV

Danke für die Aufmerksamkeit

Danke für die Aufmerksamkeit

Danke für die Aufmerksamkeit

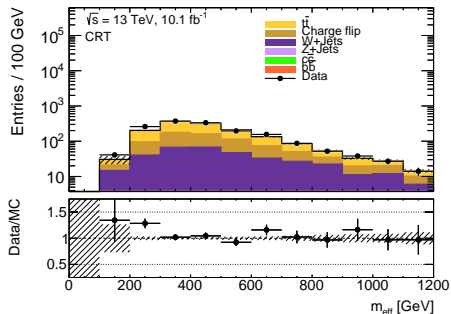
Zusammensetzung in der $t\bar{t}$ -Region



Untergrund

- $W + \text{jets}$
- "Charge-Flip" bei Elektronen

Zusammensetzung in der $t\bar{t}$ -Region



Untergrund

- $W + \text{jets}$
- "Charge-Flip" bei Elektronen

Solution

- $W + \text{jets} \rightsquigarrow$ Schnitt auf $(b-)$ Jet Multiplizitäten
- Charge-Flip: Datenorientierte Bestimmung möglich

→ Hier: MC-bestimmter Untergrund wird von Daten abgezogen

MSSM

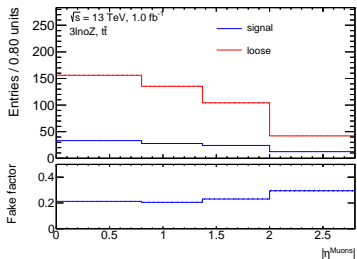
$$W_{\text{MSSM}} = y_u^{ij} \bar{U}_i \bar{Q}_j H_u - y_d^{ij} \bar{D}_i \bar{Q}_j H_d - y_e^{ij} \bar{E}_i \bar{L}_j H_d + \mu H_u H_d,$$

RPV Terms

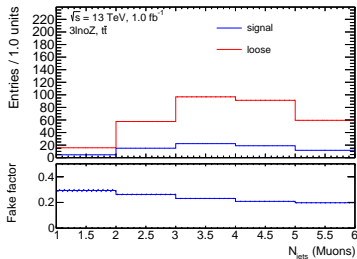
$$W_{\text{RPV}} = \frac{1}{2} \lambda_{ijk} \vec{L}_i \vec{L}_j \bar{E}_k + \lambda'_{ijk} \vec{L}_i \bar{Q}_j \bar{D}_k + \kappa_i \vec{L}_i H_u + \frac{1}{2} \lambda''_{ijk} \bar{U}_i \bar{D}_j \bar{D}_k,$$

Other variables

- Polar coordinate

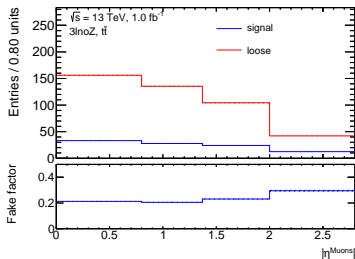


- Jet multiplicity

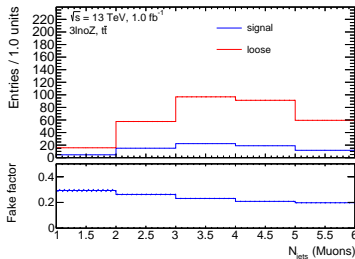


Other variables

- Polar coordinate

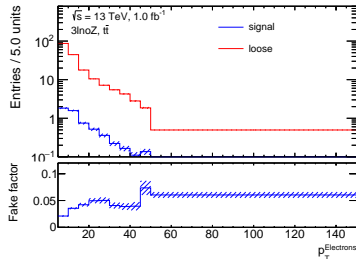


- Jet multiplicity

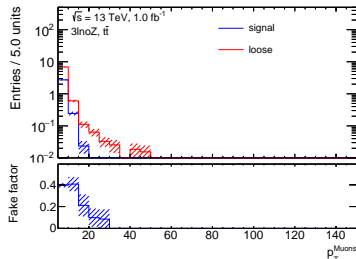


Other fake processes

- CO: $\gamma \rightarrow e^+e^-$



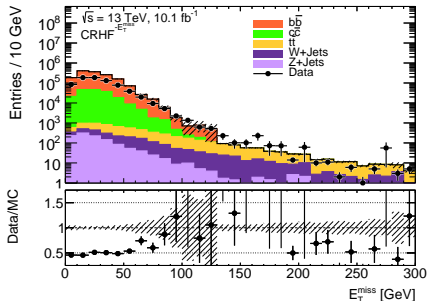
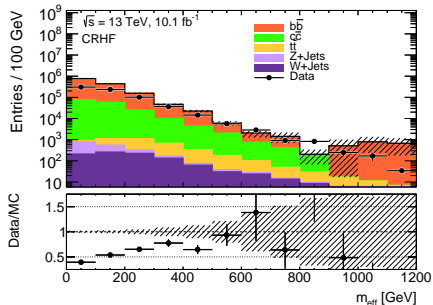
- LF: z.B.: $\pi \rightarrow \mu \nu_\mu$



2) Data measurement: Correction for HF fake factor $F = \sum (R^i F^i C^i)$

Advantages

- Very pure in HF
- Very good statistics in data
- Application possible to other HF fake factors (e.g.: Z+jets)



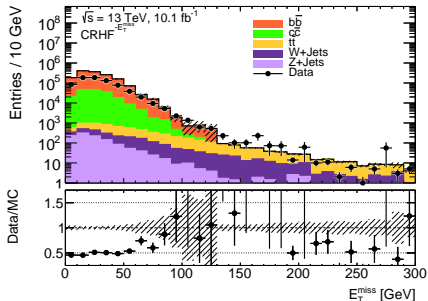
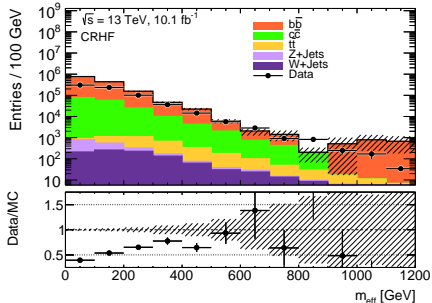
2) Data measurement: Correction for HF fake factor $F = \sum (R^i F^i C^i)$

Advantages

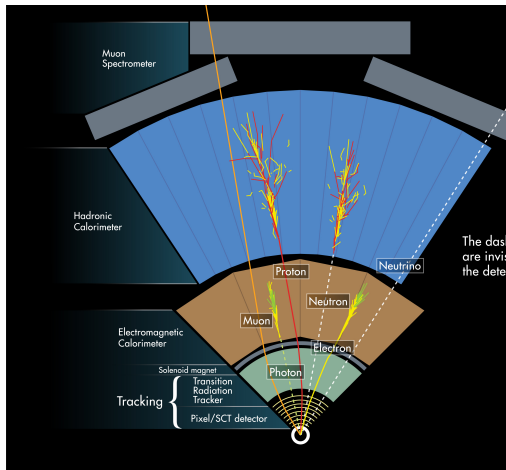
- Very pure in HF
- Very good statistics in data
- Application possible to other HF fake factors (e.g.: Z+jets)

Problem

Bad MC $b\bar{b}$ samples available

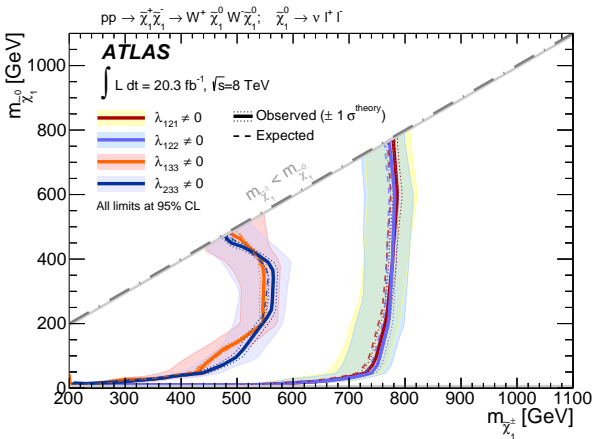


- 4π solid angle
- Uses magnets to measure momenta of charged particles
- Measures deposited energy in calorimeter
- Detects nearly all SM particles (except neutrino)
- Identifies e.g. electrons, muons, hadrons (jets, b-jets)
- Missing transverse momentum, E_T^{miss}



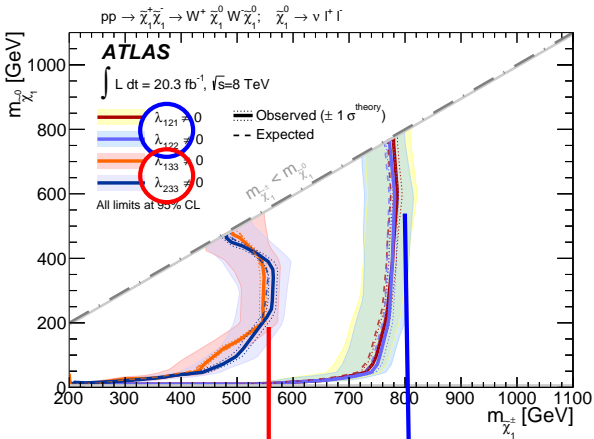
Conclusion of the four-lepton search at $\sqrt{s} = 8$ TeV

- No significant excess from the Standard Model predictions
- Set exclusion limits to some SUSY scenarios, e.g.



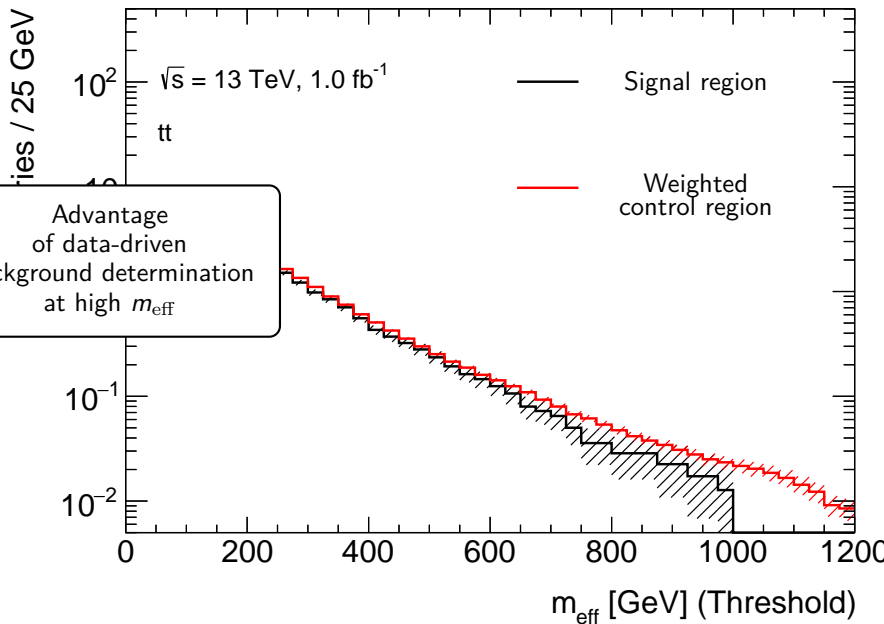
Conclusion of the four-lepton search at $\sqrt{s} = 8$ TeV

- No significant excess from the Standard Model predictions
- Set exclusion limits to some SUSY scenarios, e.g.
 - ▶ decay to only light leptons ($\lambda_{121}, \lambda_{122}$):
 - ▶ decay partially to τ -leptons ($\lambda_{133}, \lambda_{233}$):

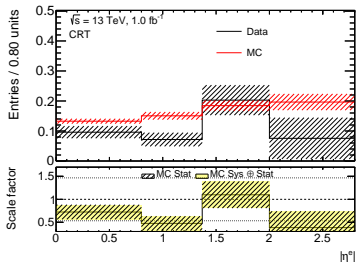
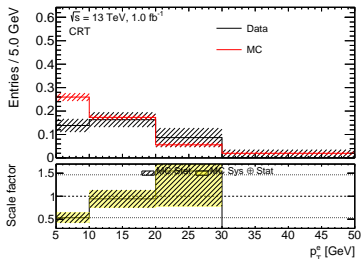


$$\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tau, \mu, e \quad \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \mu, e$$

Closure test

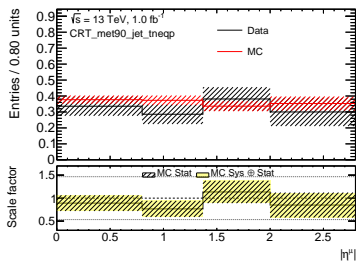
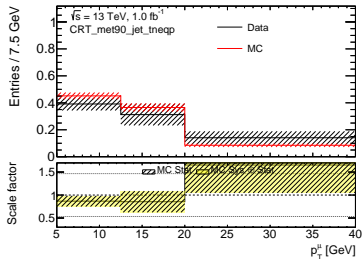


Scale Factor aus der $t\bar{t}$ Region Elektronen (Vorläufig)



$$sf_{(e)}^{HF} = 0.728 \pm 0.108$$

Myonen



$$sf_{(\mu)}^{HF} = 0.909 \pm 0.103$$