

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

Stefan Maschek



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



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



DPG Frühjahrstagung  
30. März 2017

# Motivation: Das Bezugsmodell

## Warum 4-Lepton-Signatur?

- Sensitiv gegenüber einer Vielzahl an SUSY-Modellen
- Sehr geringer Standardmodell-Untergrund
- Die R-Parität verletzendes (RPV) Modell  $\rightarrow$  leichtestes SUSY-Teilchen (LSP) kann in Standardmodell-Teilchen zerfallen

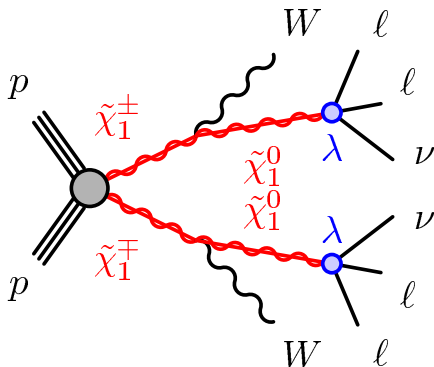
## Die R-Parität verletzender Superpotentialterm

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

$i, j, k$ : Lepton Generation

$\mathbf{L}_i$ : Linkshändiges Lepton-Superfeld

$\bar{\mathbf{E}}_k$ : Rechtshändiges Lepton-Superfeld



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

# SUSY-Suche in Endzuständen mit mindestens 4 Leptonen mit ATLAS: Objektselektion

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

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

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

- **Jets:**

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

# SUSY-Suche in Endzuständen mit mindestens 4 Leptonen mit ATLAS: Objektselektion

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

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

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

- **Jets:**

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

## Signal-Leptonen

- ▶ Stoßparameter
- ▶ Identifikationsqualität
- ▶ Isolierung von hadronischen Aktivitäten

# SUSY-Suche in Endzuständen mit mindestens 4 Leptonen mit ATLAS: Objektselektion

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

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

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

- **Jets:**

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

- **Fehlende Transversalenergie:**

$$E_T^{\text{miss}} = \left| \sum_{\text{rekonstruierte Objekte}} \vec{E}_T + \sum_{\text{unzugeordnete Kalorimeterdepositionen}} \vec{E}_T \right|$$

## Signal-Leptonen

- ▶ Stoßparameter
- ▶ Identifikationsqualität
- ▶ Isolierung von hadronischen Aktivitäten

# SUSY-Suche in Endzuständen mit mindestens 4 Leptonen mit ATLAS: Ereignisselektion

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

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

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

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

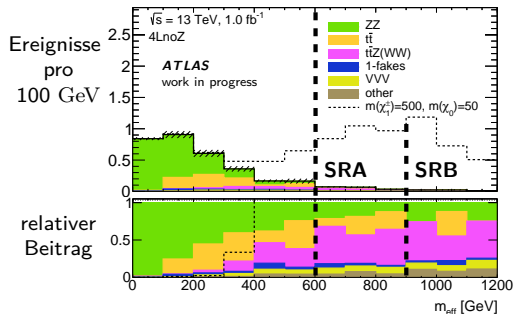
- **Effektive Masse:**

$$m_{\text{eff}} = \sum_{\text{Leptonen}} p_T + \sum_{\text{Jets}} p_T + E_T^{\text{miss}}$$

→ **Zwei Signalregionen (SR):**

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

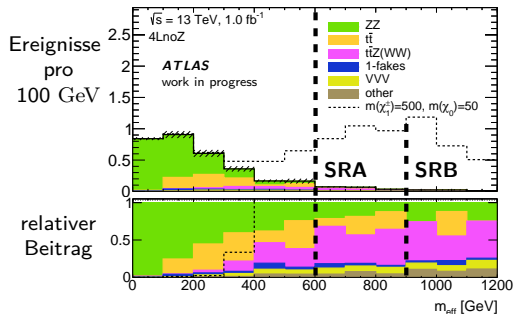
# Erwarteter Untergrund (MC)



## Hauptuntergründe

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

# Erwarteter Untergrund (MC)

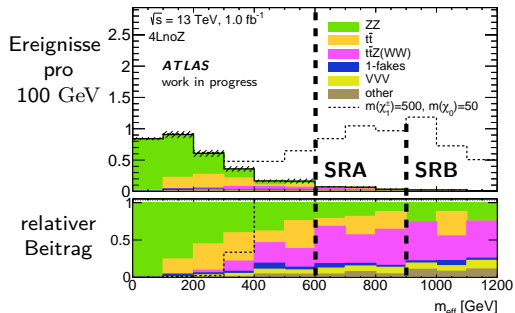


## Hauptuntergründe

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



# Erwarteter Untergrund (MC)

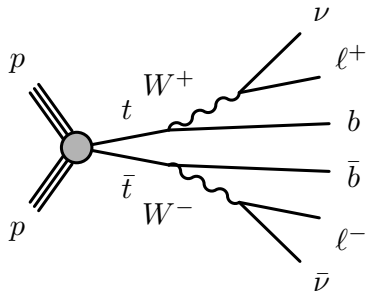


## Hauptuntergründe

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

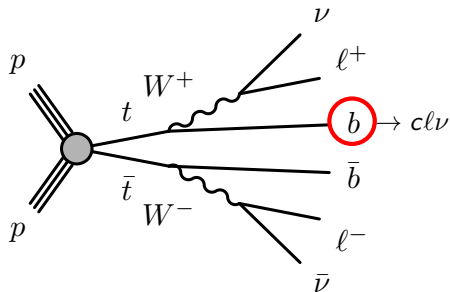
→ Dieser Vortrag beschäftigt sich mit reduzierbaren Untergründen

# Reduzibler Untergrund und "Fake-Leptonen"



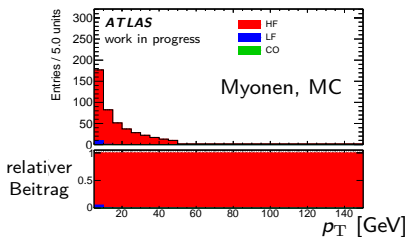
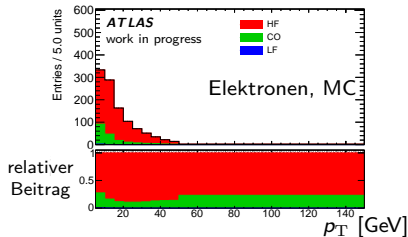
Herkunft der Fake-Leptonen:

# Reduzibler Untergrund und "Fake-Leptonen"

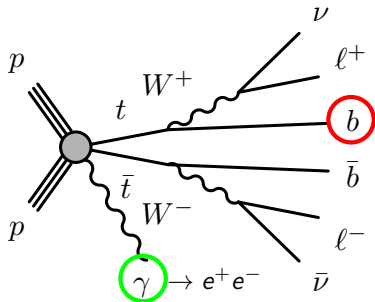


## Herkunft der Fake-Leptonen:

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

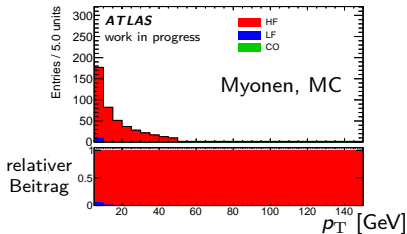
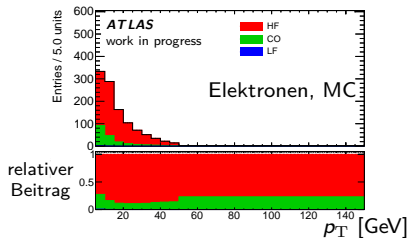


# Reduzibler Untergrund und "Fake-Leptonen"

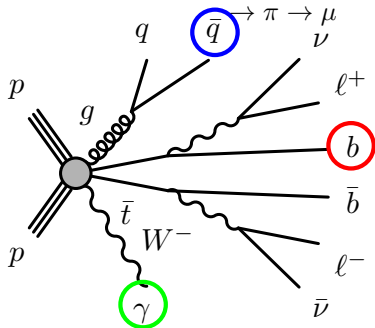


## Herkunft der Fake-Leptonen:

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

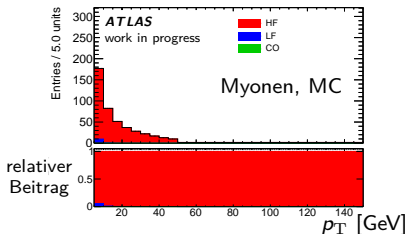
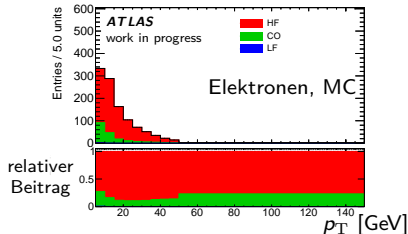


# Reduzibler Untergrund und "Fake-Leptonen"



## 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)



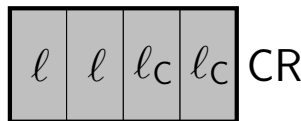
# Datenorientierte Untergrundsbestimmung

- 1 Definiere Kontrolleptonen ( $l_C$ ):  
Rekonstruierte Leptonen, die  
Signalkriterien nicht erfüllen

$l_C$

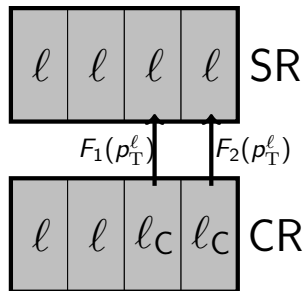
# Datenorientierte Untergrundsbestimmung

- 1 Definiere Kontrollleptonen ( $l_C$ ):  
Rekonstruierte Leptonen, die Signalkriterien nicht erfüllen
- 2 Definiere Kontrollregionen (CR):  
Zwei Signalleptonen werden durch Kontrollleptonen ersetzt.



# Datenorientierte Untergrundsbestimmung

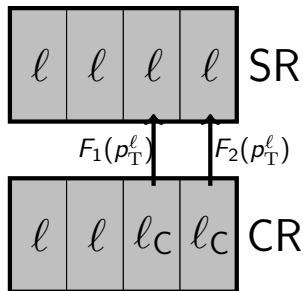
- 1 Definiere Kontrollleptonen ( $l_C$ ):  
Rekonstruierte Leptonen, die Signalkriterien nicht erfüllen
- 2 Definiere Kontrollregionen (CR):  
Zwei Signalleptonen werden durch Kontrollleptonen ersetzt.
- 3 Bestimmung des reduzierten Untergrunds durch Extrapolation von CR nach SR in Daten,  
 $N_{SR} = N_{CR} F_1 F_2$ .





# Datenorientierte Untergrundsbestimmung

- 1 Definiere Kontrollleptonen ( $l_C$ ):  
Rekonstruierte Leptonen, die Signalkriterien nicht erfüllen
- 2 Definiere Kontrollregionen (CR):  
Zwei Signalleptonen werden durch Kontrollleptonen ersetzt.
- 3 Bestimmung des reduzierten Untergrunds durch Extrapolation von CR nach SR in Daten,  
 $N_{SR} = N_{CR} F_1 F_2$ .



## Lepton-Fake-Faktor

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

# Bestimmung des Fake-Faktors: Standardmethode

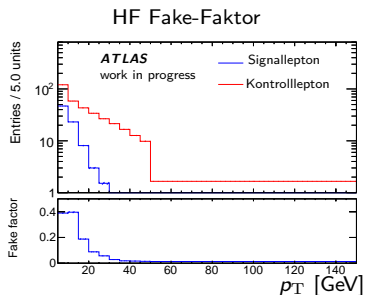
Bestimmung durch ein gewichtetes Mittel

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

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

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

- Aus MC- $t\bar{t}$ -Datensatz bestimmt
- Fake-Ursache in Simulation bekannt

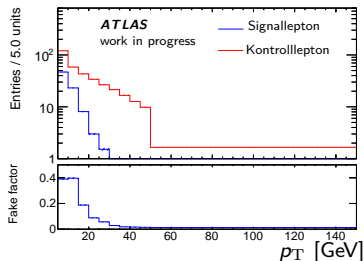


# Fake-Faktor durch Monte Carlo $F = \sum R^i F^i C^i$

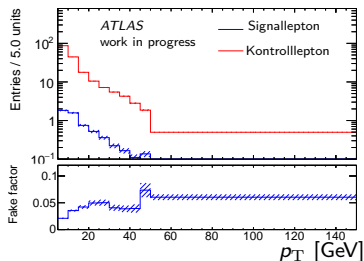
- Aus MC- $t\bar{t}$ -Datensatz bestimmt
- Fake-Ursache in Simulation bekannt

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

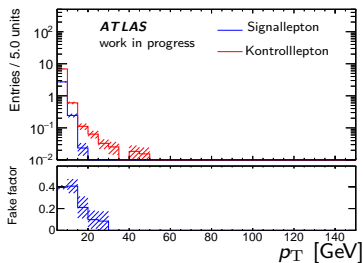
## HF Fake-Faktor



## CO Fake-Faktor

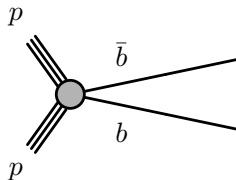


## LF Fake-Faktor



# Datenorientierte Bestimmung des Korrekturfaktors $F = \sum R^i F^i C^i$

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



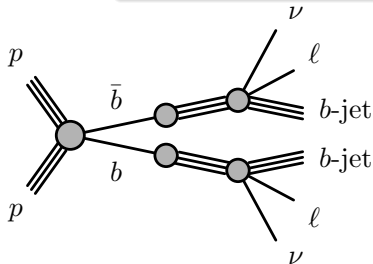
Korrektur-Faktor

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

# Datenorientierte Bestimmung des Korrekturfaktors $F = \sum R^i F^i C^i$

## 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

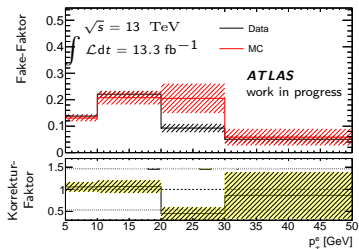


## Korrektur-Faktor

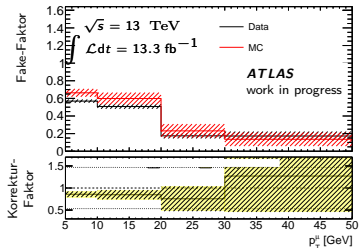
$$C_{t\bar{t}}^{HF} = C_{b\bar{b}}^{HF} = \frac{F_{b\bar{b},HF}^{\text{data}}}{F_{b\bar{b},HF}^{\text{MC}}}$$

# Resultierender Korrekturfaktor, $F = \sum R^i F^i C^i$

## Elektronen



## Myonen



↪ Globales Mittel

Elektronen

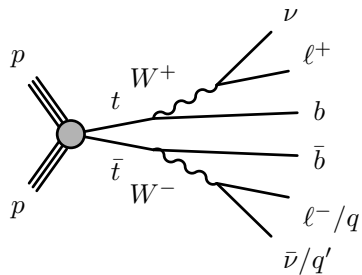
$$C_{(e)}^{HF} = 1.011 \pm 0.079$$

Myonen

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

## Direkte Messung des Fake-Faktors in Daten

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

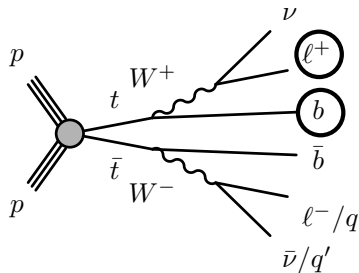




# Bestimmung des Fake-Faktors: Alternative Methode

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

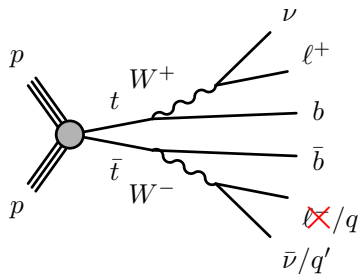
- Ein hochenergetisches Signalmyon ("Tag"),
- Mindestens ein  $b$ -Jet,



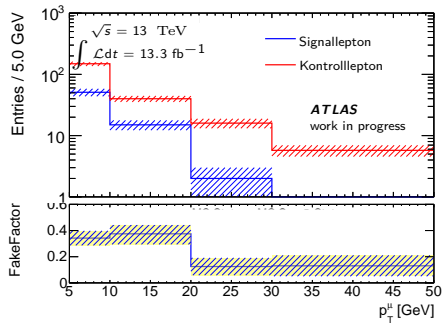
# Bestimmung des Fake-Faktors: Alternative Methode

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

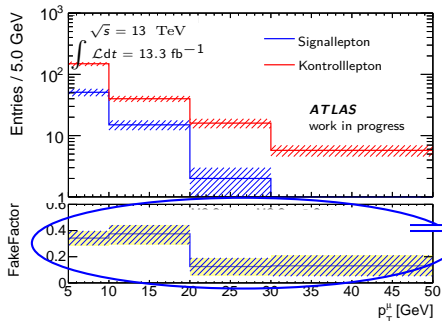
- Ein hochenergetisches Signalmyon ("Tag"),
- Mindestens ein  $b$ -Jet,
- Ein weiteres Lepton ("Probe") mit **gleicher Ladung** wie das Tag-Myon  
→ Probe-Lepton ist Fake



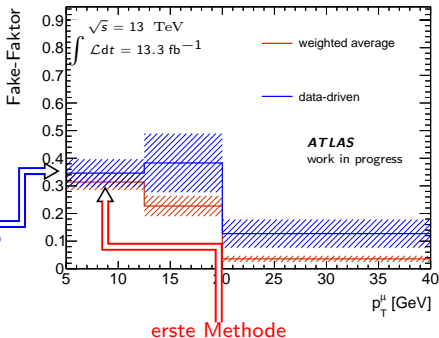
# In Daten bestimmter Fake-Faktor



# In Daten bestimmter Fake-Faktor

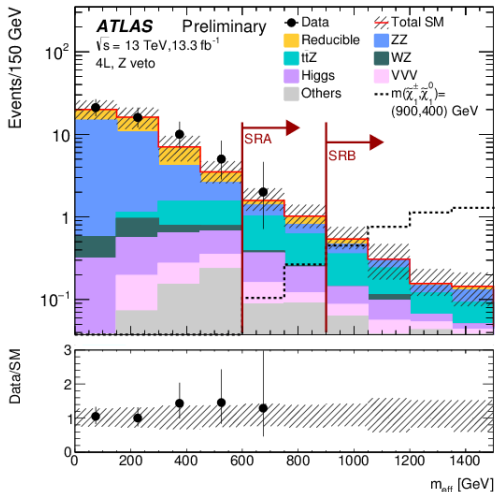


## Vergleich mit bisheriger Methode



⇒ Konsistente Ergebnisse

# Ergebnisse der Run-2 Analyse

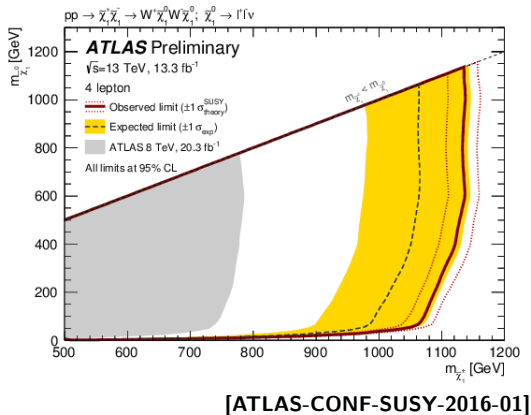


- Integrierte Luminosität  $13.3 \text{ fb}^{-1}$
- Data-MC Vergleich in niedrigen  $m_{\text{eff}}$ -Bereich  
Validierung der Untergrundabschätzung
- Unsicherheiten des reduzierbaren Untergrunds: Statistik in CR
- 2 Events aufgezeichnet in der Signalregion
- Sehr gute Übereinstimmung mit dem Standardmodell

[ATLAS-CONF-SUSY-2016-01]

# Ergebnisse der Run-2 Analyse: Interpretation

- Interpretation: Ausschluss von Massenbereichen im Bezugsmittel
- Grenzen aus Run-1 wurden erweitert  
0.75 TeV  $\rightarrow$  1.14 TeV



- Suche nach SUSY-Zerfällen, die R-Parität verletzen, im **Vier-Lepton-Kanal** bei  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$
- Vorstellung **datenbasierter Methoden der Untergrundabschätzung** des **reduziblen Untergrunds** von  $t\bar{t}$ -Paarproduktion
- Zwei unterschiedliche Methoden zeigen konsistente Ergebnisse
  
- **Ausschluss** von Chargino Massen bis zu 1.14 TeV

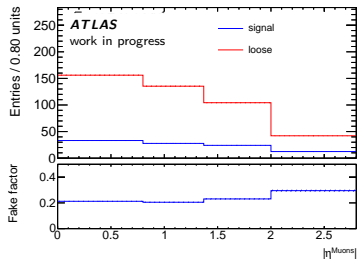
Danke für die Aufmerksamkeit



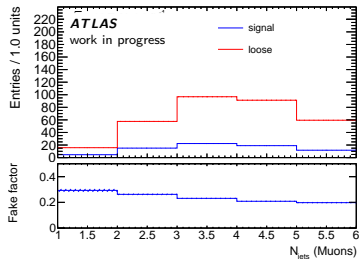
Danke für die Aufmerksamkeit

Danke für die Aufmerksamkeit

- Polar coordinate

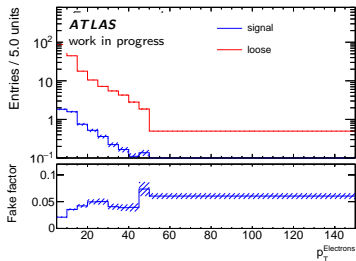


- Jet multiplicity

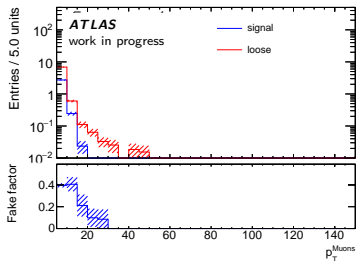


## Backup: Other fake processes

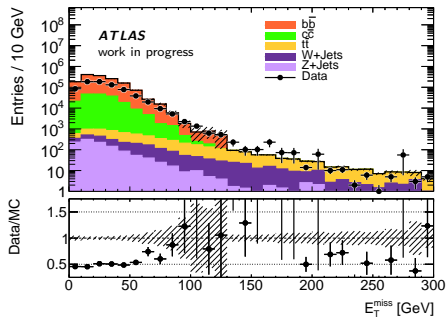
- CO:  $\gamma \rightarrow e^+ e^-$



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



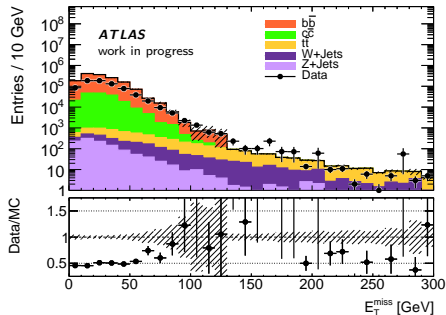
# Backup: Reinheit in der $b\bar{b}$ -Region



Untergrund

•  $t\bar{t}$

# Backup: Reinheit in der $b\bar{b}$ -Region



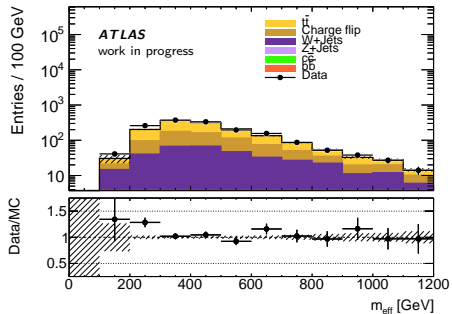
## Untergrund

- $t\bar{t}$

## Lösung

- Subtrahiere Untergrund (MC)

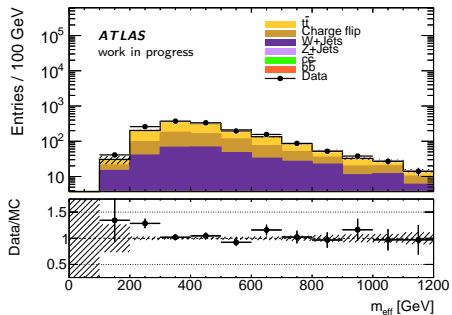
# Backup: Reinheit in der $t\bar{t}$ -Region



## Untergrund

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

## Backup: Reinheit in der $t\bar{t}$ -Region



### Untergrund

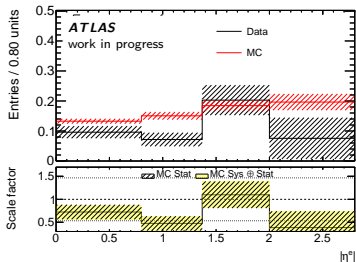
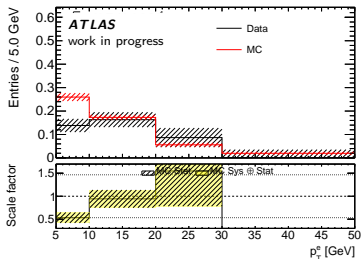
- $W + \text{jets}$
- "Charge-Flip" bei Elektronen

### Lösung

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

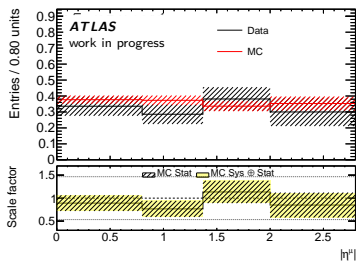
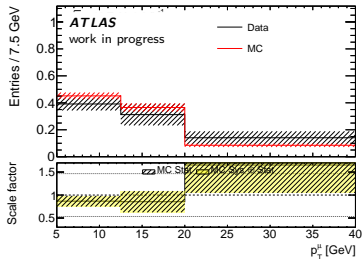


# Scale Factor aus der $t\bar{t}$ Region Elektronen (Vorläufig)



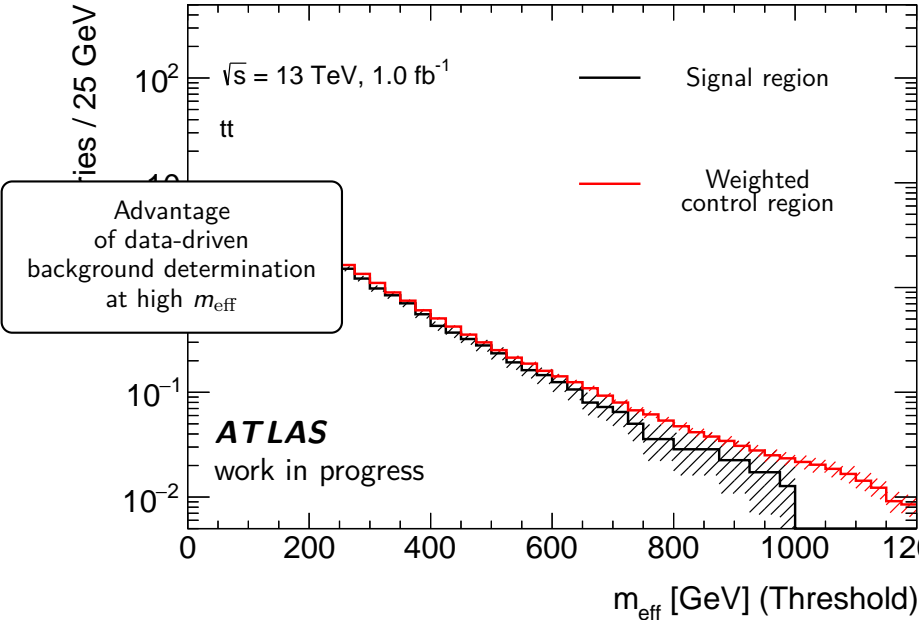
$$sf_{(e)}^{HF} = 0.728 \pm 0.108$$

# Myonen



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

# Backup: Closure test Fake-Faktor Methode



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

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

## Electrons

- Track in the inner detector
- Energy deposit in the calorimeter

## Muons

- Track in the Inner Detector
- Track in the Muon Spectrometer

## Hadronen-Shower (jets, $b$ -jets)

- Energy deposit in the calorimeter
- Charged Hadrons: Track in the Inner Detector

## Missing transverse momentum, $E_T^{\text{miss}}$

- Negative vector sum of all measured momenta
- For indirect detection of neutrinos

