

NRW-Phänomenologie

Bad Honnef, 13.1.2006

*Untersuchung des Entdeckungspotentials
für ein leichtes Higgs-Boson im
CPX-Szenario des MSSM mit dem ATLAS-
Detektor am LHC*

Marc Lehmacher
(Universität Bonn)

Inhalt

- Theorie: Supersymmetrie und MSSM
- Suche: LEP-Ergebnisse und ATLAS-Studien
- Signalprozess und Untergrund
- Ereignisselektion und Rekonstruktion
- Ergebnisse
- Zusammenfassung und Ausblick

Minimales Supersymmetrisches Standardmodell

Erweiterung des Standardmodells

- Benötigt 2 Higgs-Doublets H_1 und H_2

$$2 \text{ Doublets} \cong 8 \text{ Freiheitsgrade} \\ \cong 3 \text{ (Masse von } W^\pm, Z) + 5 \text{ (Higgs-Bosonen)}$$

- 2 geladen: $H^\pm$
- 3 ungeladen: H^0, h^0 (CP=1), A^0 (CP=-1)

Auf Born-Niveau:

Higgs-Sektor vollständig festgelegt durch 2 Parameter:

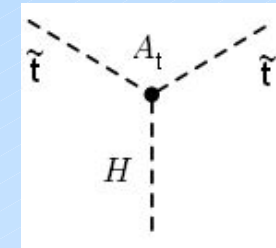
- $\tan(\beta) = \frac{v_2}{v_1}$ mit $\langle H_1 \rangle = \begin{pmatrix} v_1 \\ 0 \end{pmatrix}$, $\langle H_2 \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v_2 \end{pmatrix}$
- Eine Masse, Standardwahl: m_{A^0}

- MSSM Higgs-Sektor CP-erhaltend auf Born-Niveau
- Berücksichtigung von **CP-Verletzung** in MSSM möglich durch Schleifenkorrekturen!
- Einführung analog zu CKM-Mechanismus in SM über nicht wegzudefinierende Phasen

⇒ CP-Eigenzustände h^0 , H^0 und A^0 **keine** Masseneigenzustände mehr!

$$\begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} h^0 \\ H^0 \\ A^0 \end{pmatrix}$$

h^0 , H^0 und A^0 mischen zu Masseneigenzuständen H_1 , H_2 und H_3
mit $m_{H_1} < m_{H_2} < m_{H_3}$



Nicht wegdefinierbare Phasen für: A_t , A_b und μ

Mischung von CP geraden und ungeraden Higgs $\leftrightarrow$ CP-Verletzung

$$\begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} h^0 \\ H^0 \\ A^0 \end{pmatrix} \rightarrow \boxed{\sim \sin(\Phi_{\text{CP}}) |\mu| |A_t| / m_{\text{SUSY}}}$$

mit $\Phi_{\text{CP}} \triangleq \arg(A_t \mu)$

$\Rightarrow$ CP-Verletzung groß, falls $\sin(\Phi_{\text{CP}}) |\mu| |A_t| / m_{\text{SUSY}}$ groß

$\rightarrow$ CPX-Szenario: Parameter s.d. CP-Verletzung maximal,
insbesondere $\Phi_{\text{CP}} = 90^\circ$

Variation von $\tan(\beta)$ und $m_{H^\pm}$ $\rightarrow m_{A^0}$ nicht mehr definiert!

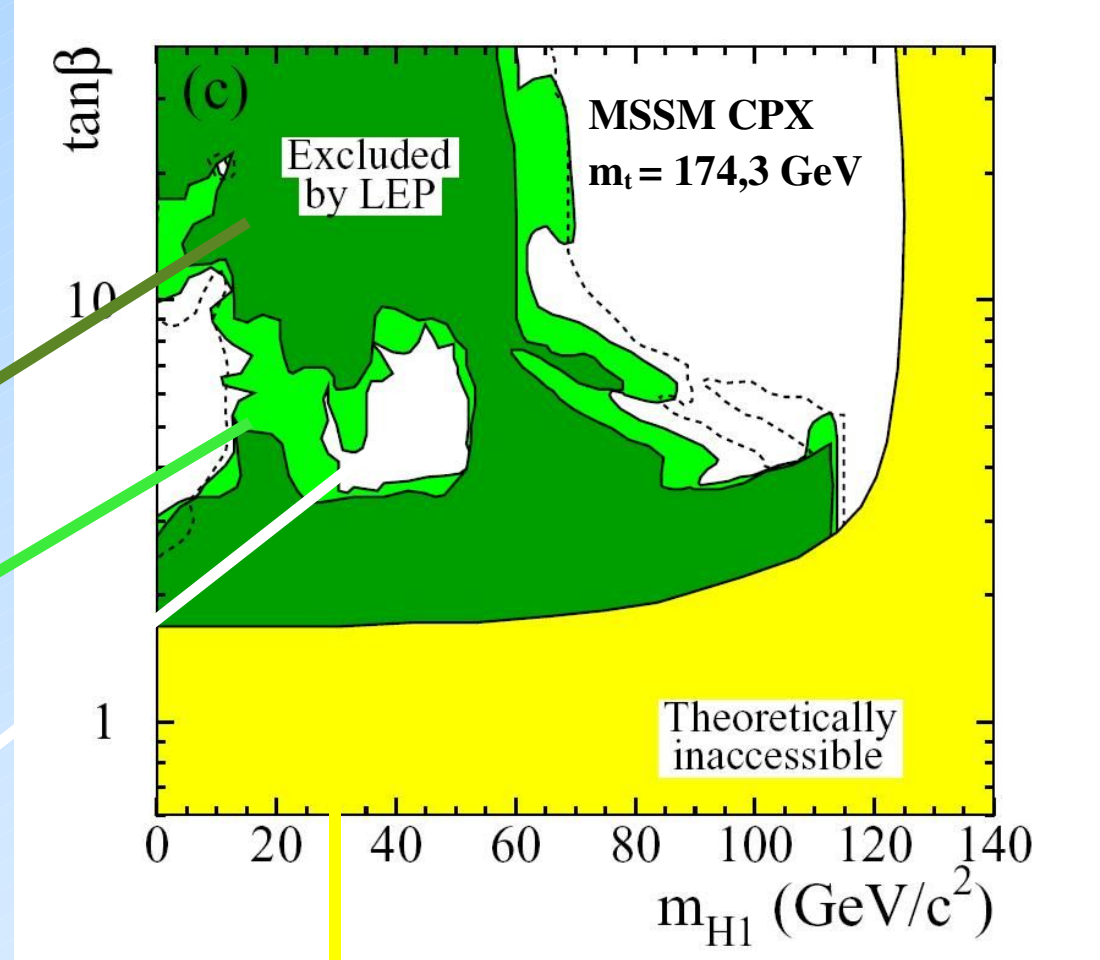
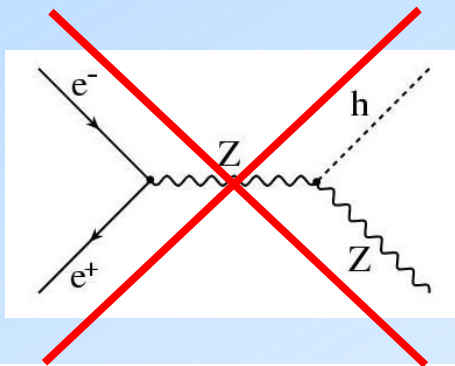
- i.A. Parameter im MSSM **komplex** → CPV Phasen
- Baryogenese: **Sacharow Bedingungen**
 - Nichterhaltung der Baryonenzahl
 - Kein Thermodynamisches Gleichgewicht
 - **Verletzung der CP-Symmetrie**
 - SM**: CP-Verletzung nur durch CKM-Matrix
→ CP-Verletzung nicht groß genug
 - CPX MSSM**: Neue Quellen von CPV
→ CP-Verletzung groß genug

Keine untere Massengrenze für H_1 durch LEP bei $\tan(\beta) \approx 5$!!!!

Ausgeschlossen mit 99,7%
Vertrauensniveau

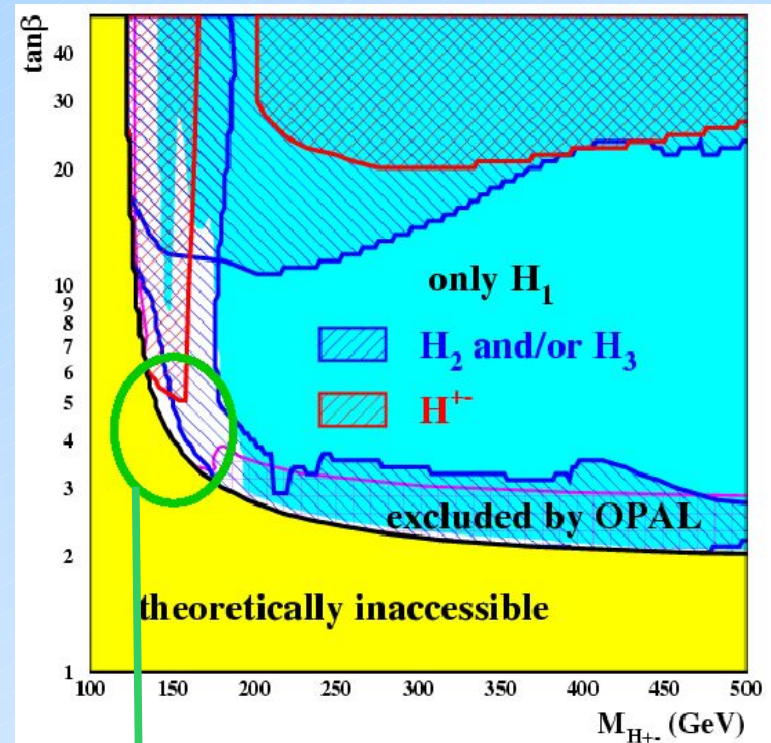
Ausgeschlossen mit 95,0%
Vertrauensniveau

nicht sensitiv



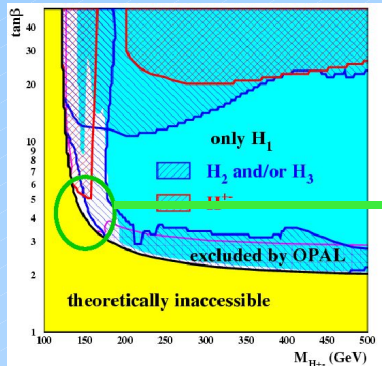
Theoretisch nicht möglich!

Integrierte Luminosität = 300 fb^{-1}



$$m_{H_1} < 70 \text{ GeV}, 105 \text{ GeV} < m_{H_2} < 120 \text{ GeV}, 140 \text{ GeV} < m_{H_3} < 180 \text{ GeV}$$

Beachte: $m_{H^{+-}} < m_t$

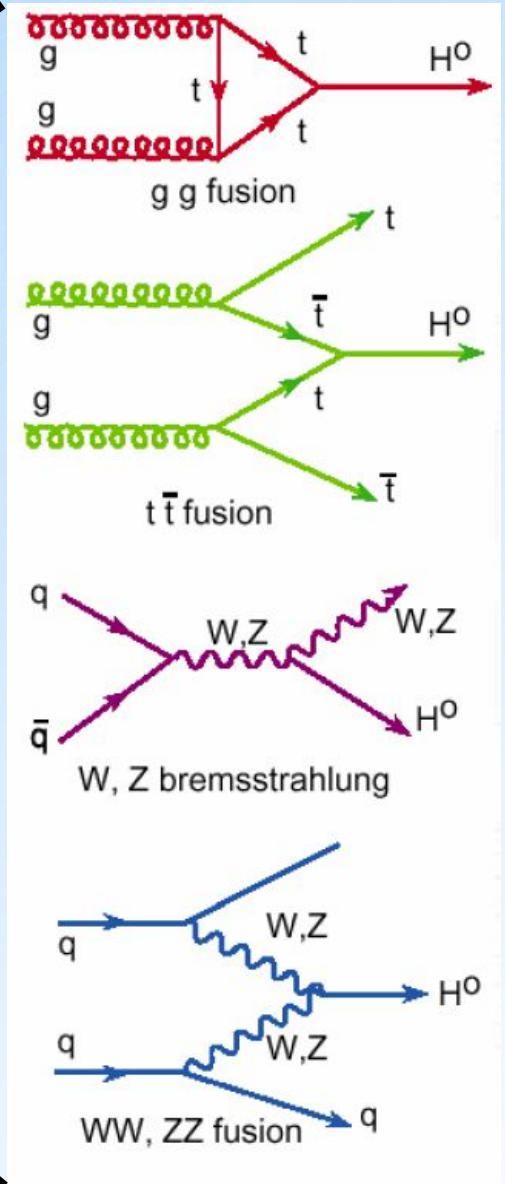


- $m_{H^+} < m_t$
- $m_{H_1} < 70 \text{ GeV}$

Zudem:

- $g_{H_1 tt}$ klein
- $g_{H_1 VV}$ klein

⇒ Übliche Kanäle am LHC spielen keine Rolle

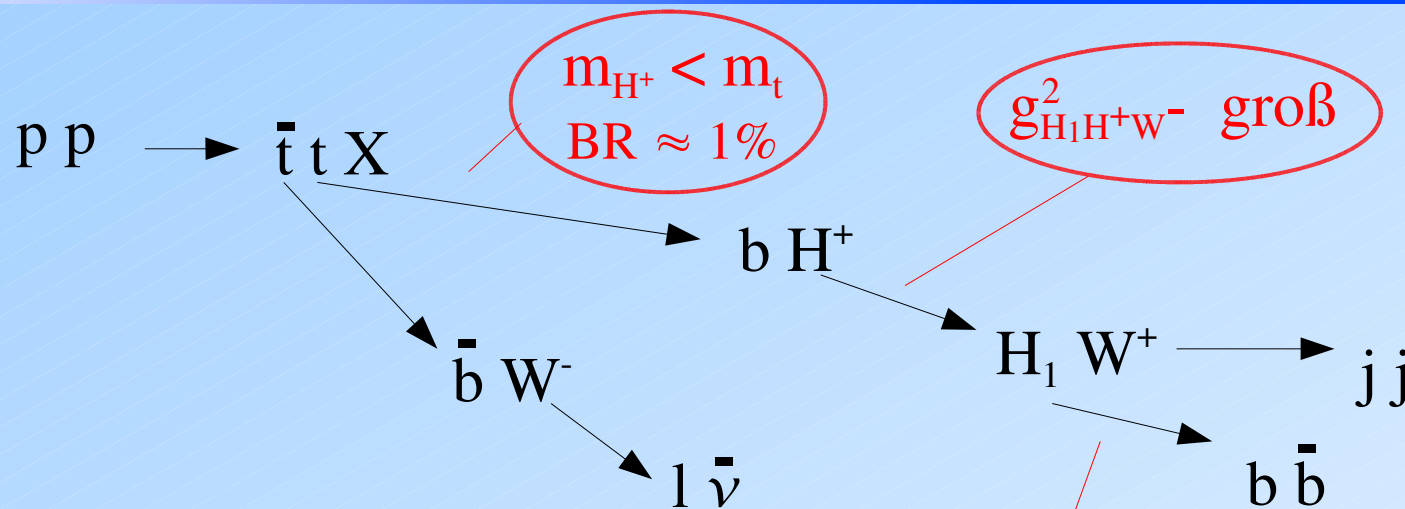


In CPX MSSM gilt: $g_{H_1 V V}^2 + g_{H_1 H^+ W^-}^2 = 1$

d.h. für $g_{H_1 V V}$ klein $\Rightarrow g_{H_1 H^+ W^-}$ groß

Zusammenfassung:

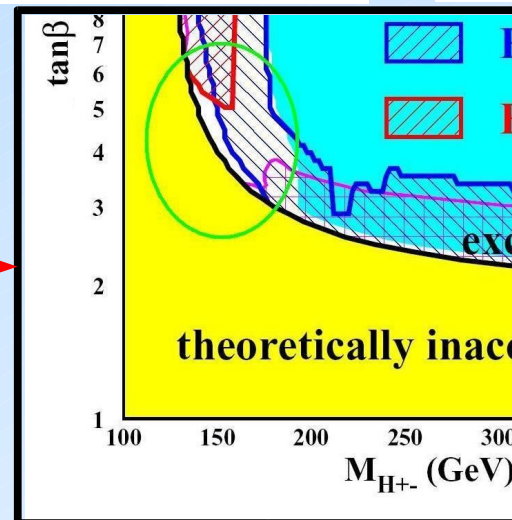
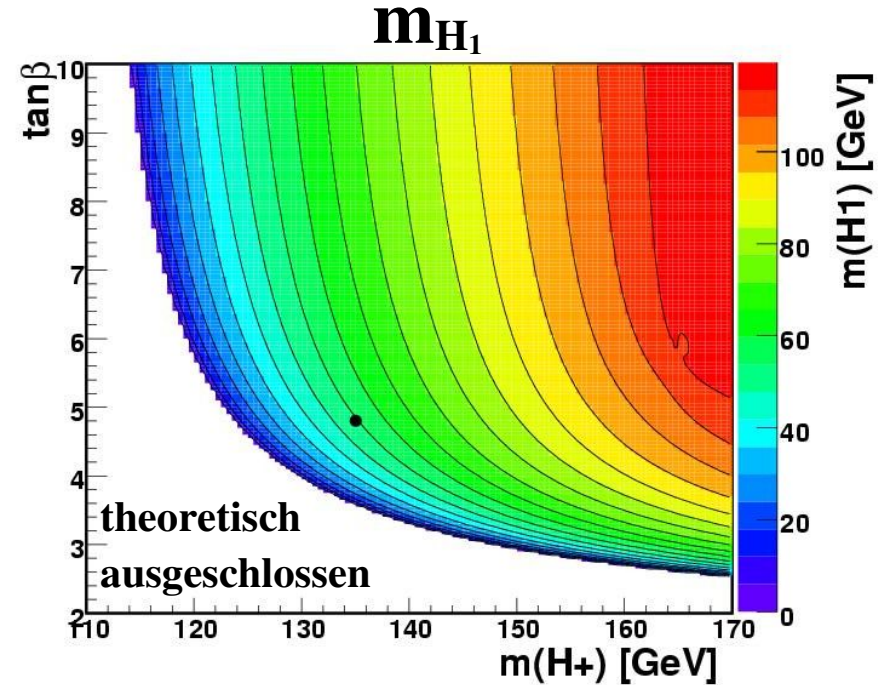
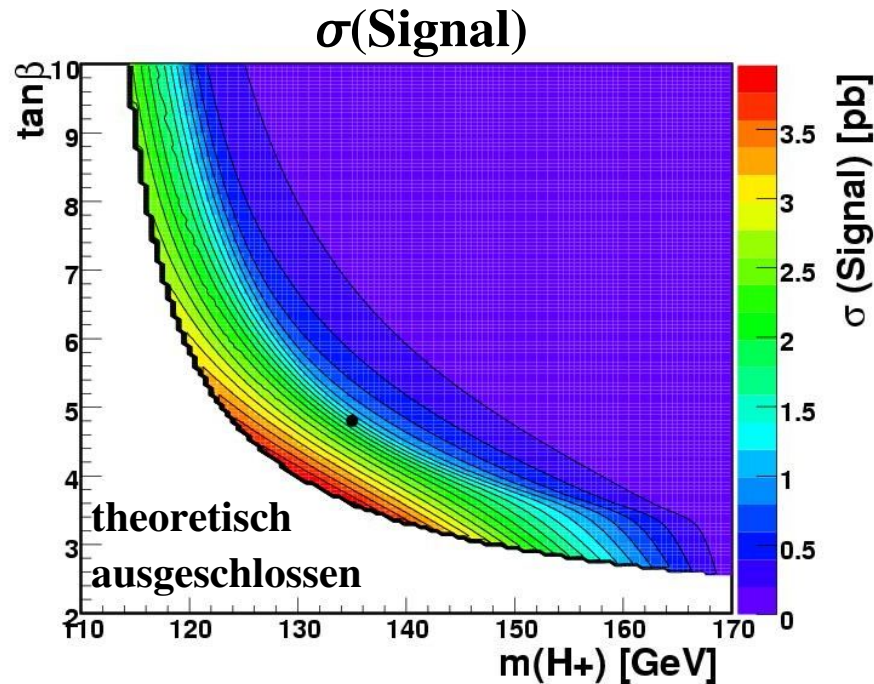
- Keine untere Massengrenze für H_1 von LEP
- Übliche Kanäle am LHC spielen keine Rolle
- Starke Kopplung von H^+ an H_1 über W
- Masse von H^+ kleiner als m_t



d.h. $pp \rightarrow (bbbb)(l\nu)(jj)X$

- 4 b-Jets, 2 „leichte“ Jets, „hartes“ Lepton, p_T^{miss}
- Lepton notwendig für Trigger
- In betrachtetem Parameterbereich dominierender Prozess für Entdeckung von H_1 **und** H^+

Wirkungsquerschnitt



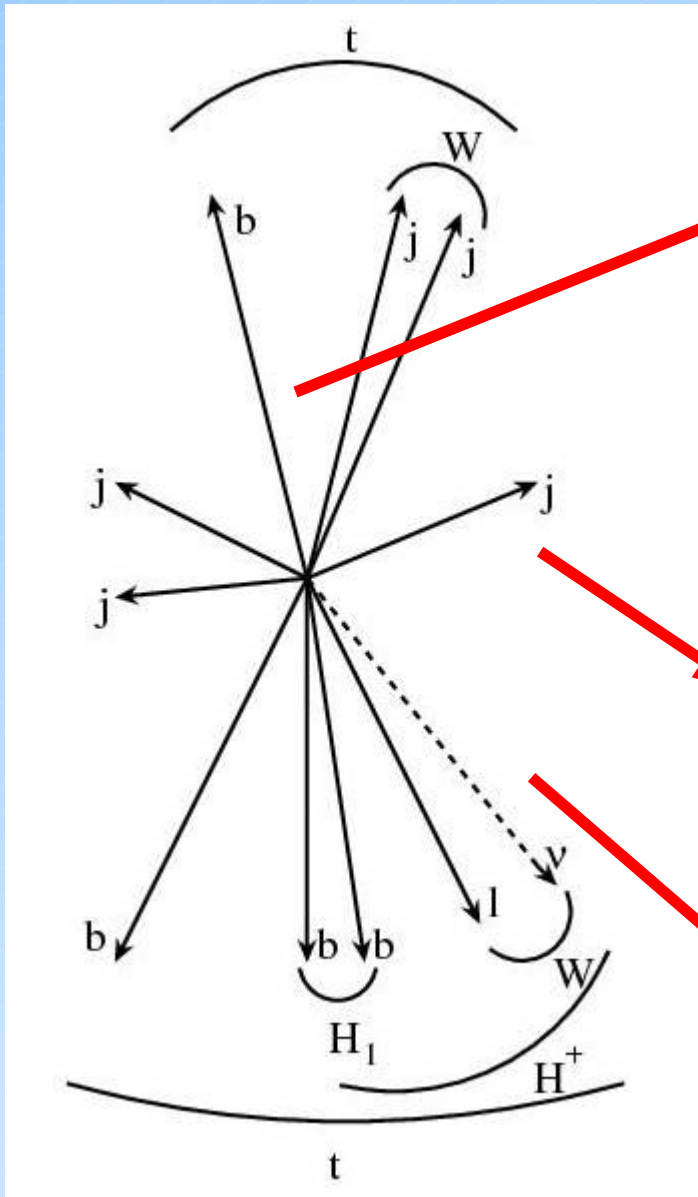
z.B.:

$$m_{H^+} = 135 \text{ GeV}$$

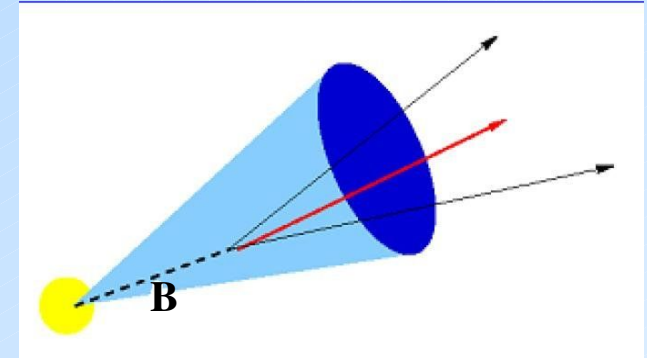
$$m_{H_1} = 54 \text{ GeV}$$

$$\sigma = 1,3 \text{ pb}$$

$$\Rightarrow N = 39000 \text{ für } 30 \text{ fb}^{-1}$$



b-Jets müssen als solche erkannt werden
→ „b-tagging“



Effizienz für Id. von b-Jet = 50%

Zusätzliche „leichte“ Jets

→ Welche Jets gehören zu welchem Teilchen?

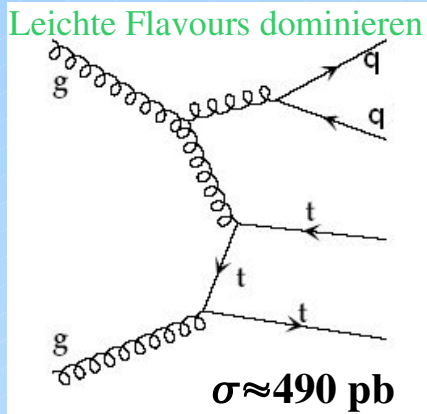
$$p_T^{miss} = p_T^{\nu}$$

p_z^{ν} nicht messbar

Untergrund:

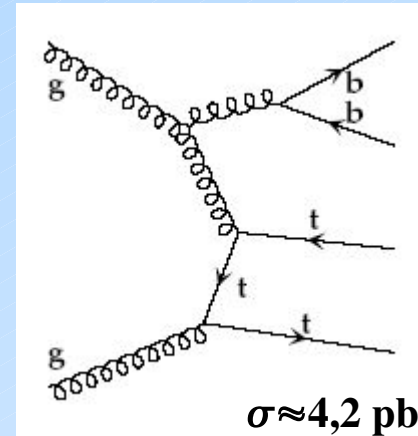
ttjj, ttbb

tt + Jets:



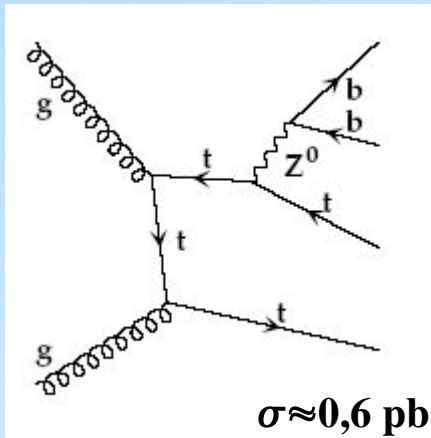
Reduzibel

b-tagging →



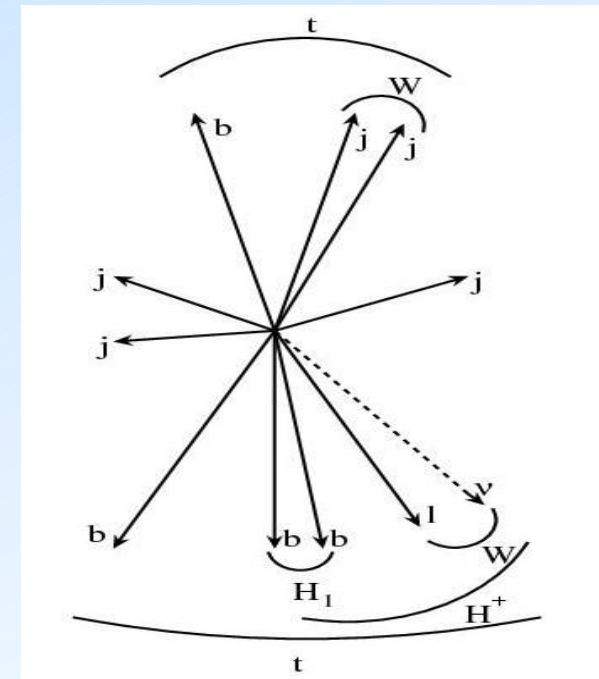
Irreduzibel

ttbb (EW): d.h. $gg \rightarrow Z/\gamma/W \rightarrow ttbb$



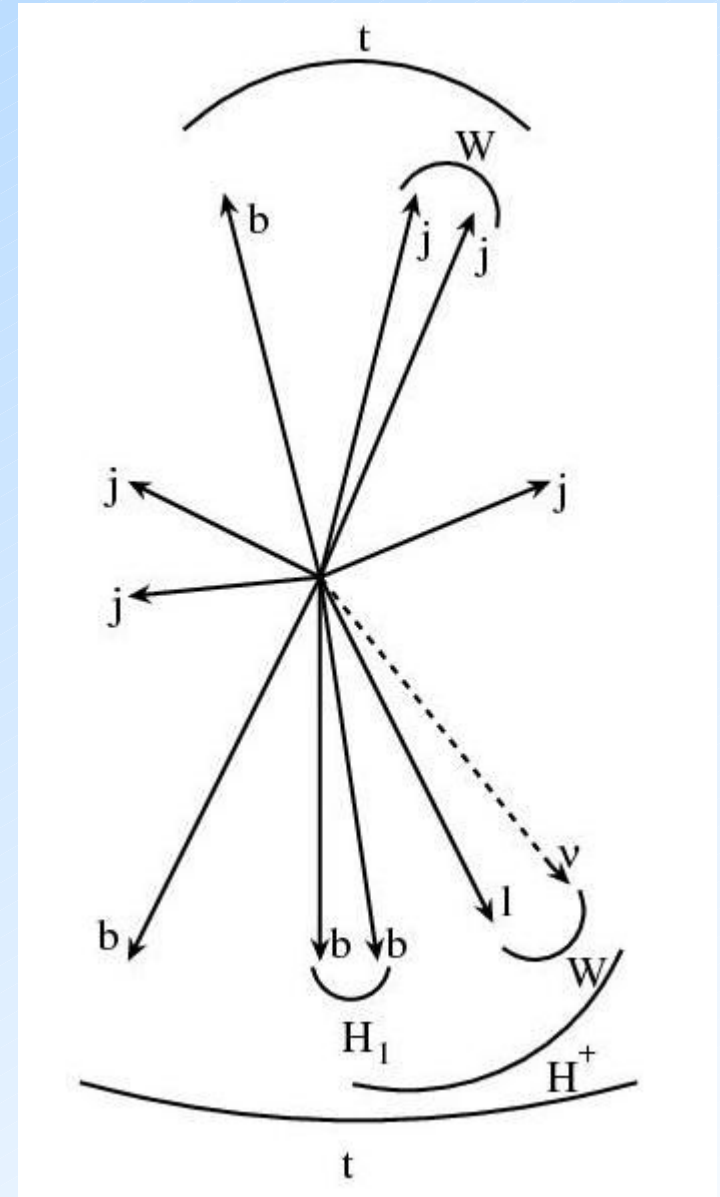
Irreduzibel

Rekonstruktion der Top-Massen notwendig



Schnitte:

- Entweder 1 Elektron oder 1 Myon
 - $p_T^l > 20 \text{ GeV} \rightarrow \text{Trigger}$
 - $p_T^{\text{miss}} > 20 \text{ GeV} \rightarrow \text{Neutrino}$
 - mindestens 4 „b-tagged“ Jets
mit $p_T > 20 \text{ GeV}$
 - mindestens 2 „non-b-tagged“ Jets
mit $p_T > 20 \text{ GeV}$
- Ereignisse kompatibel mit Topologie von Signal



Im Untergrund: Zwei b-tagged Jets nicht aus Top

→ Unterdrückung des Untergrundes durch Rekonstruktion der Top-Massen

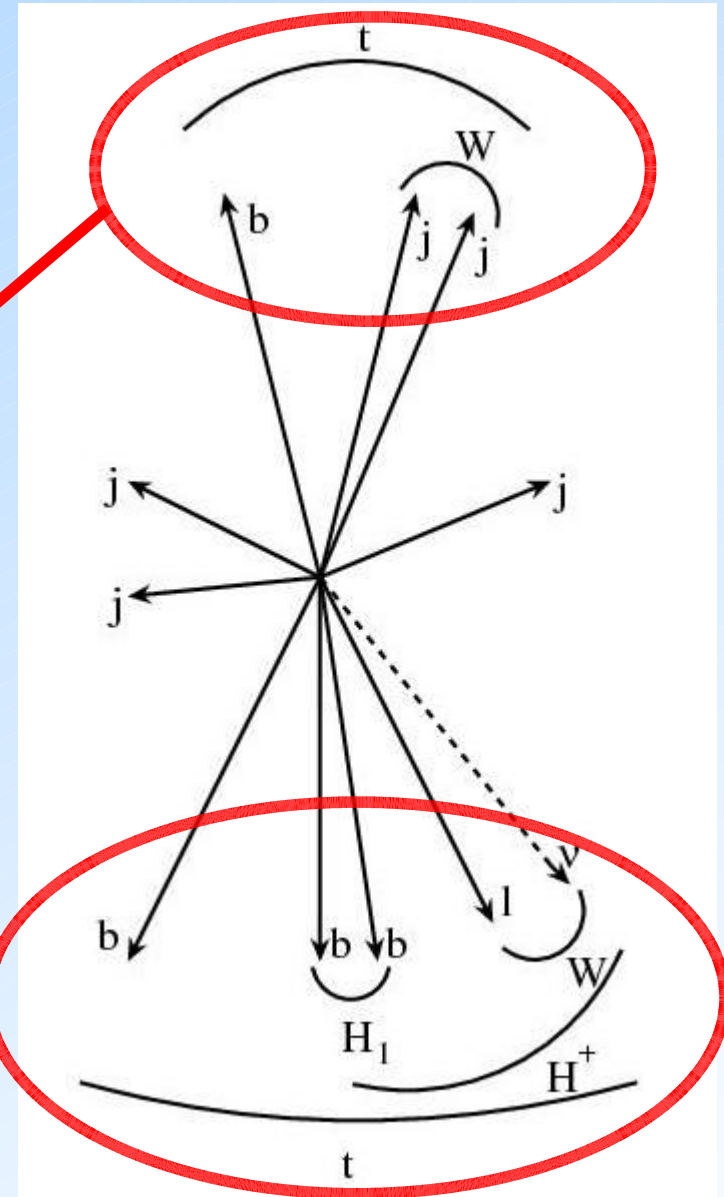
Schnitt:

$$|m_t - m_{bjj}| < 25 \text{ GeV}$$

und

$$|m_t - m_{bbbl\nu}| < 25 \text{ GeV}$$

→ Zuweisung der Jets/Lepton notwendig!!
 p_z^ν nicht messbar!

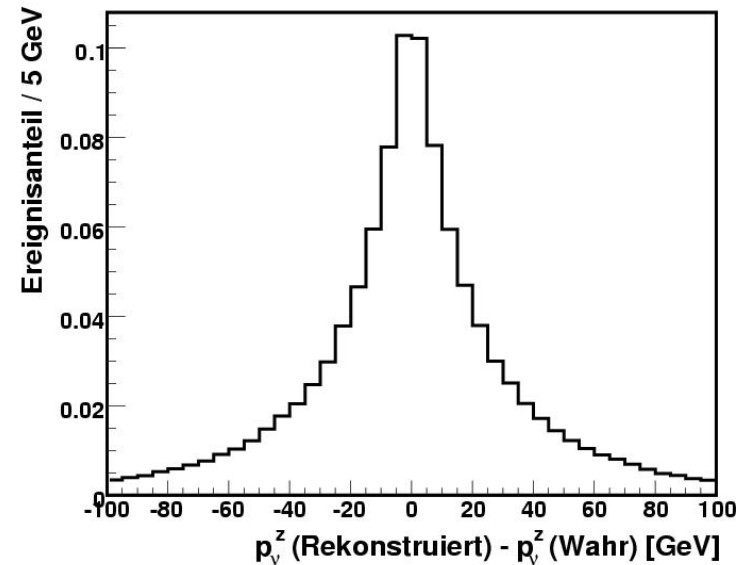
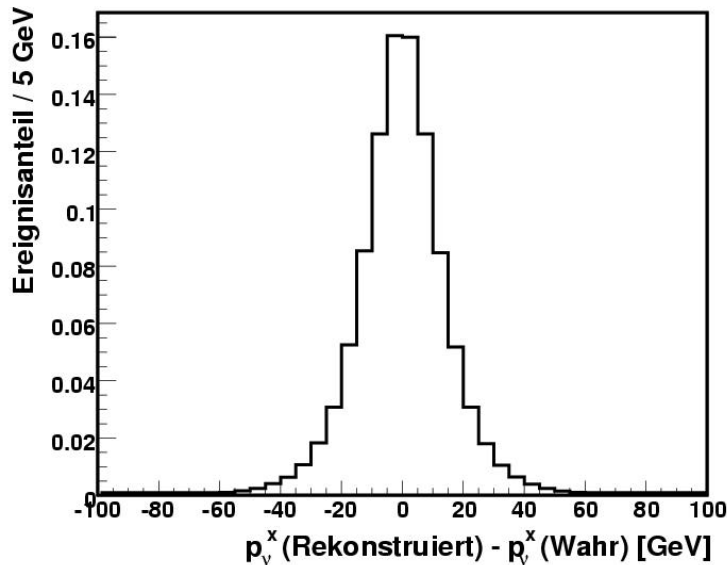


$$1.) \quad p_T^{miss} = p_T^\nu$$

2.) Berechnung von p_z^ν über

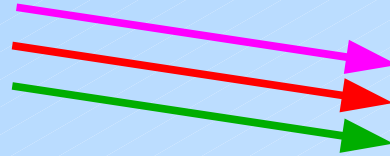
$$(p_l + p_\nu)^2 = (E_\nu + E_l)^2 - (p_T^{miss} + p_T^l)^2 - (p_z^\nu + p_z^l)^2 \stackrel{!}{=} m_W^2$$

→ Forderung: > 0 Lösungen für p_z^ν → Praktisch immer 2 Lsg.

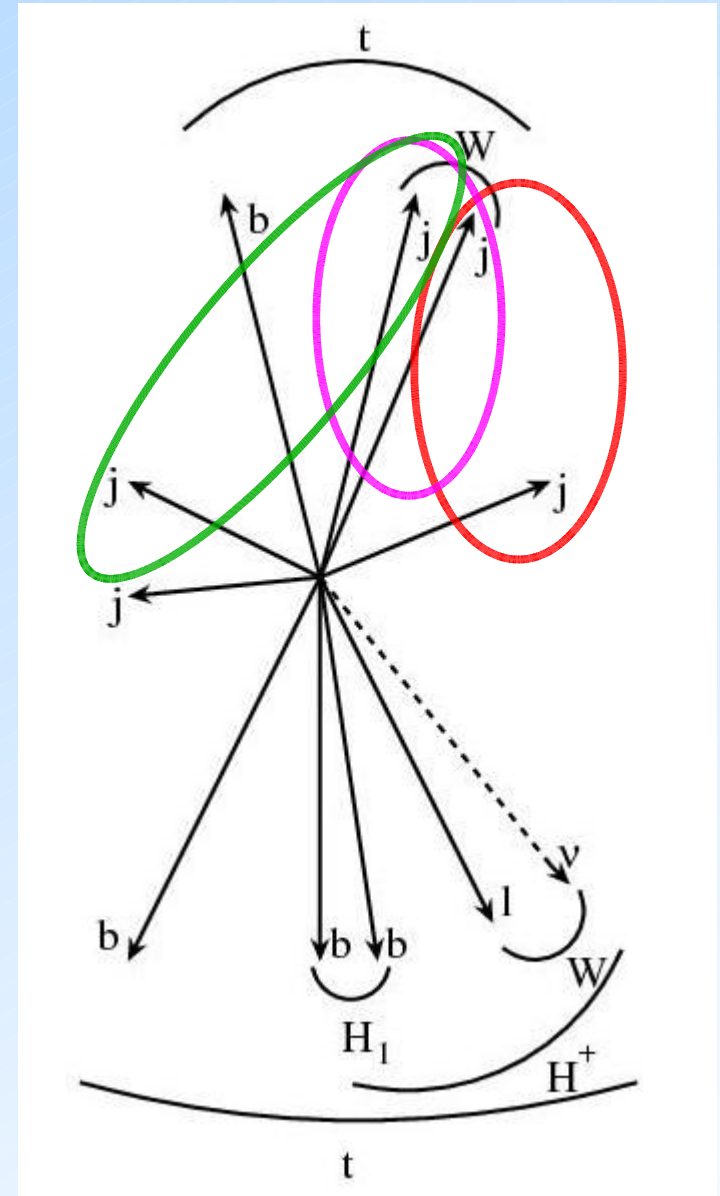
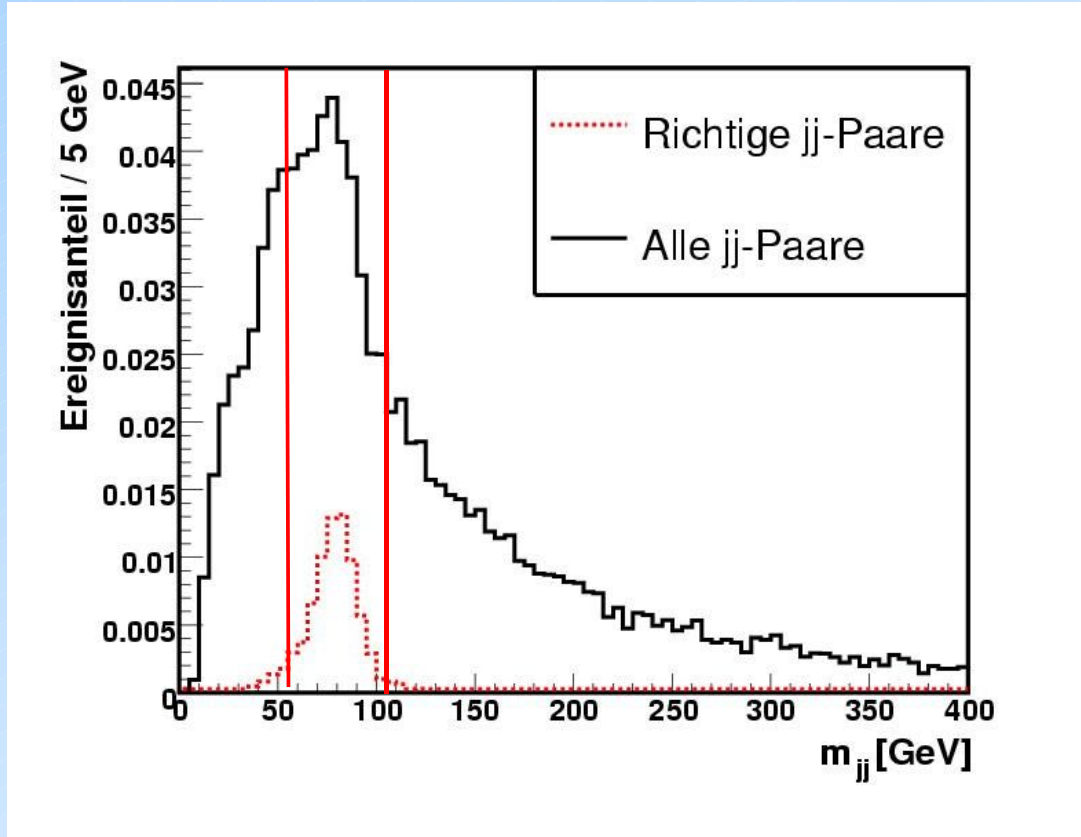


Erstelle Liste von „non-b-tagged“ Jetpaaren

mit $|m_{jj} - m_W| < 25 \text{ GeV}$



Forderung: > 0 Paare



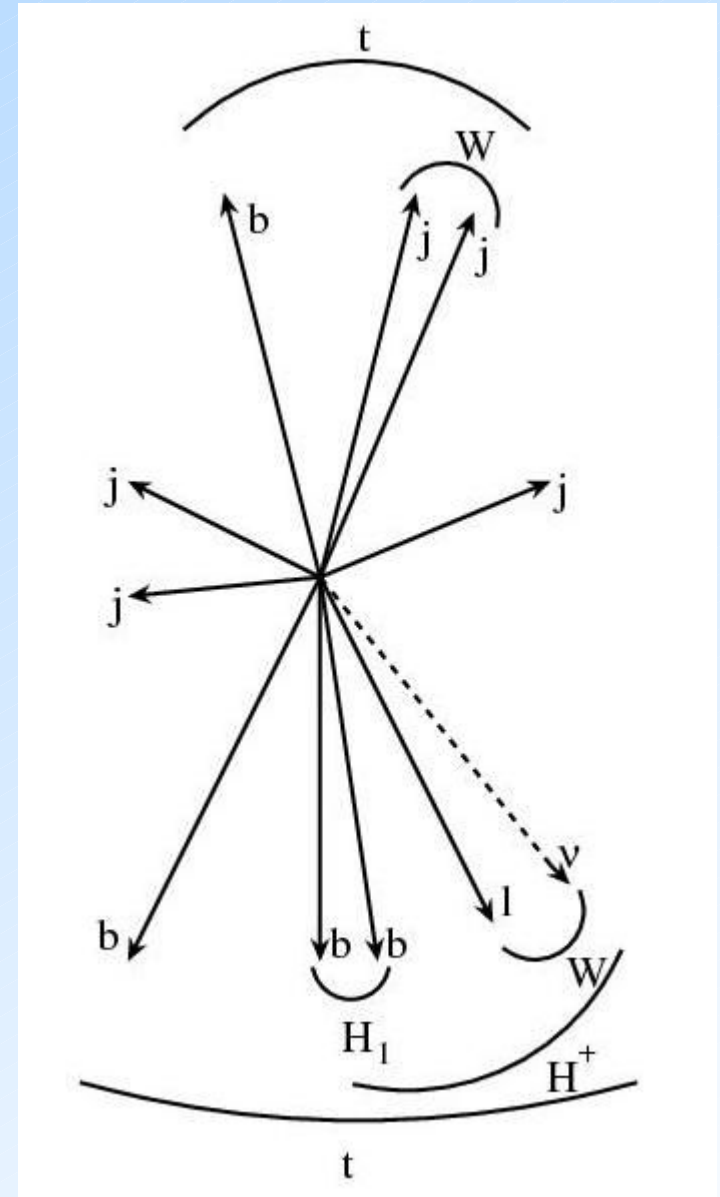
- ≥ 4 b-tagged Jets
- ≥ 1 jj-Paare
- 2 Lgs. für p_z^ν
- 1 Elektron oder 1 Myon

a.) $t_1 \hat{=} b \textcircled{\text{lv}}$ und $t_2 \hat{=} b \textcircled{\text{bb}} \textcircled{\text{jj}}$

$\textcolor{blue}{W}$ $\textcolor{blue}{H_1} \textcolor{red}{W}$

$\textcolor{green}{H^+}$

welche $\Delta = (m_t - m_{t1})^2 + (m_t - m_{t2})^2$ minimiert!



Aber:

$$t_2 \cong b \ b \ b \ jj$$

→ Zuordnung der b-tagged Jets nicht eindeutig!
3 Möglichkeiten!

$$t_2 \cong b \ \textcolor{red}{b} \ \textcolor{red}{b} \ jj$$

H_1

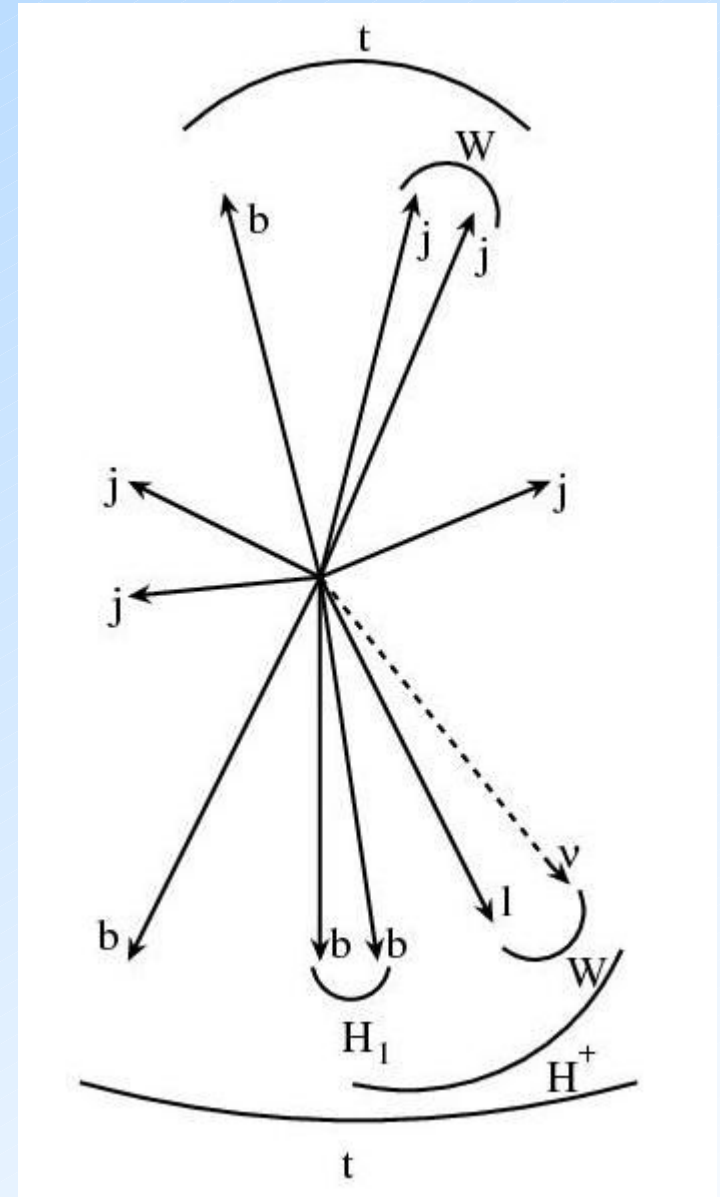
$$t_2 \cong \textcolor{green}{b} \ \textcolor{green}{b} \ b \ jj$$

H_1

$$t_2 \cong \textcolor{violet}{b} \ b \ \textcolor{violet}{b} \ jj$$

H_1

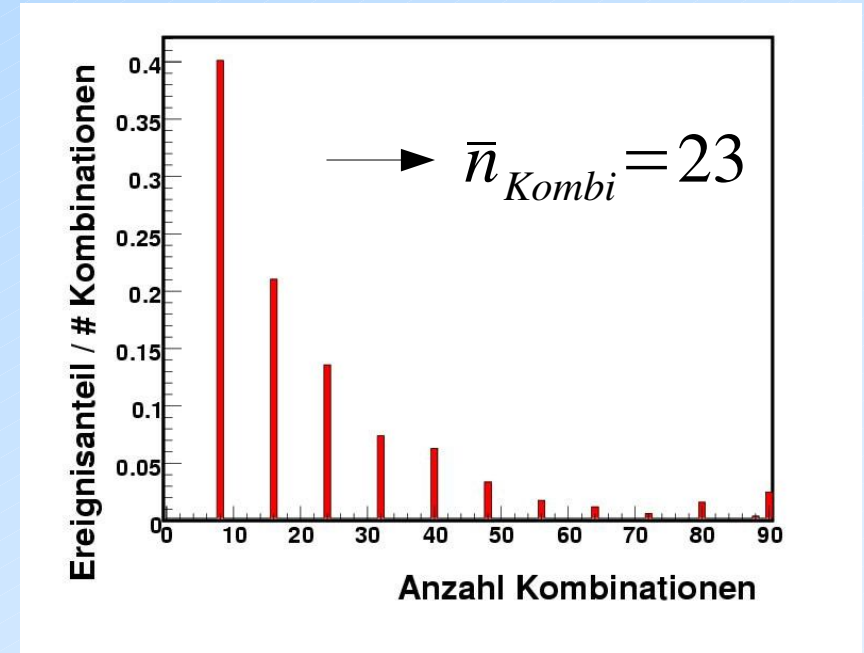
→ Ergeben alle dieselbe Top-Masse



Finde Kombination für:

a.) $t_1 \hat{=} b \textcircled{lv}$ und $t_2 \hat{=} b \textcircled{bb} \textcircled{jj}$
 $\quad \quad \quad W \quad \quad \quad \textcircled{H_1 W}$
 $\quad \quad \quad \quad \quad \quad H^+$

b.) $t_1 \hat{=} b jj$ und $t_2 \hat{=} b bb lv$

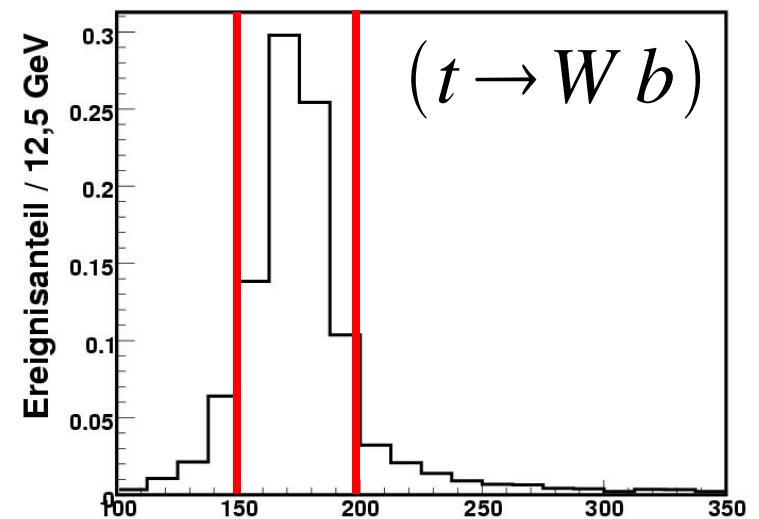
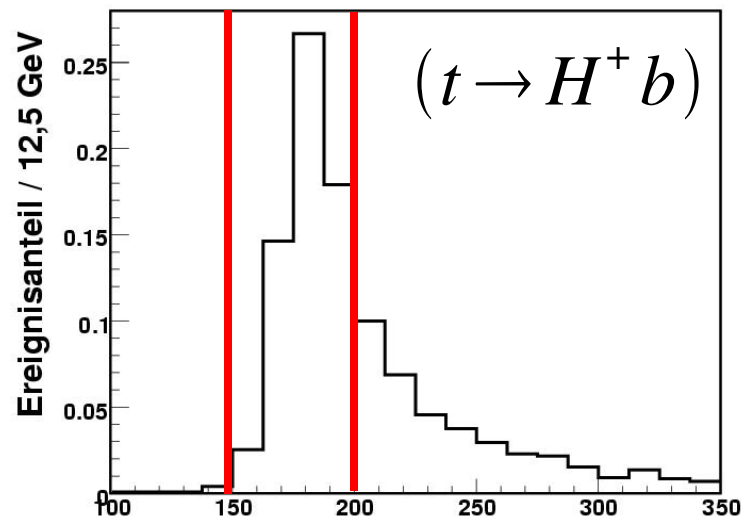


→ Im Mittel insgesamt 46 mögliche Kombinationen!

→ Dreifache Mehrdeutigkeit bleibt!

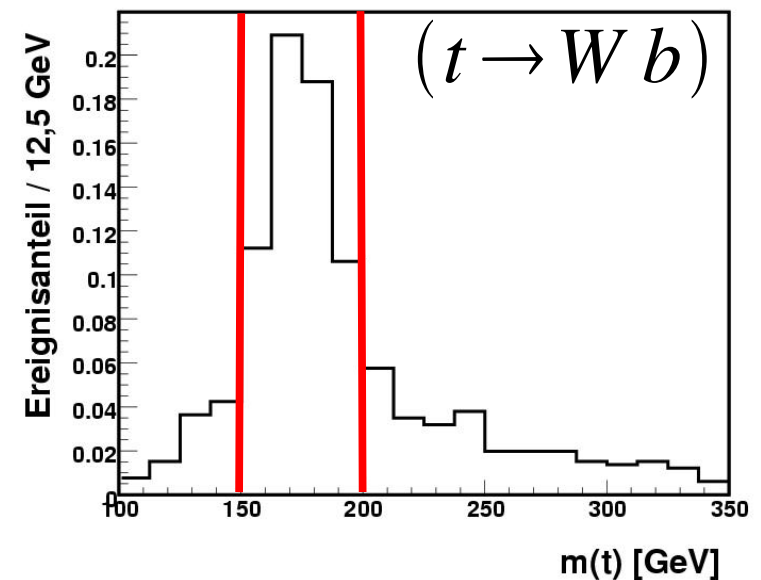
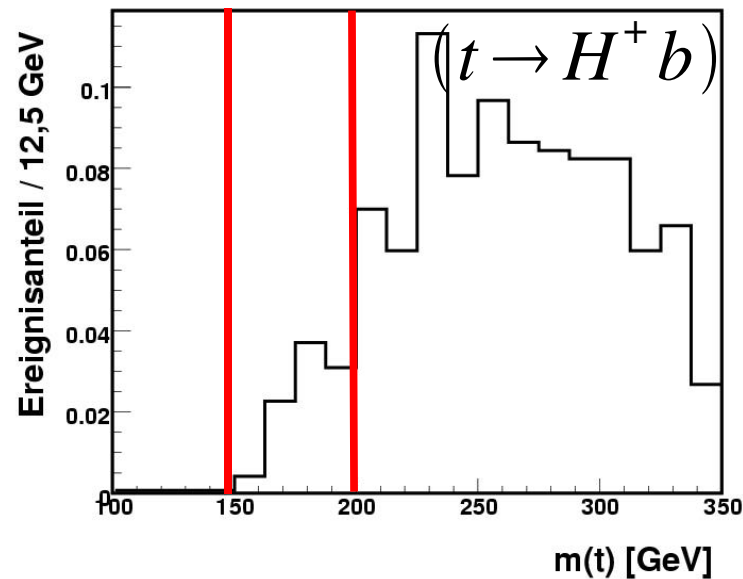
Rekonstruierte Massen

Signal:



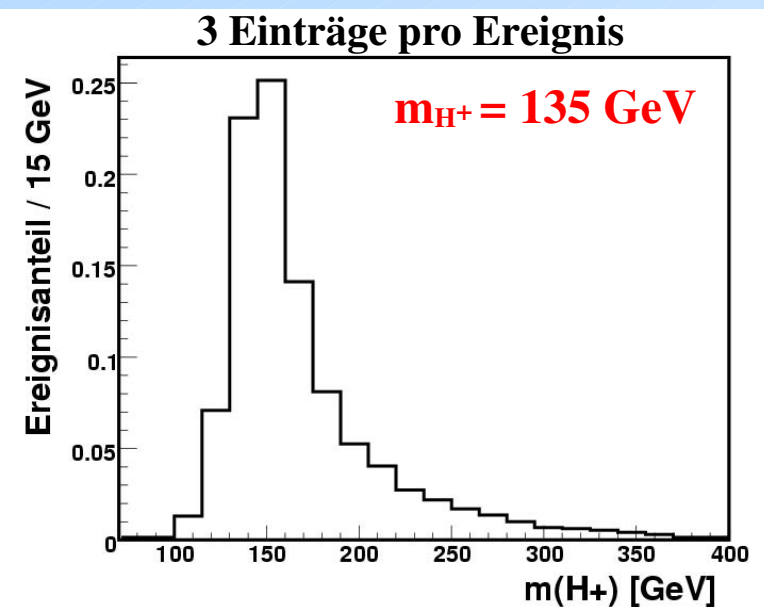
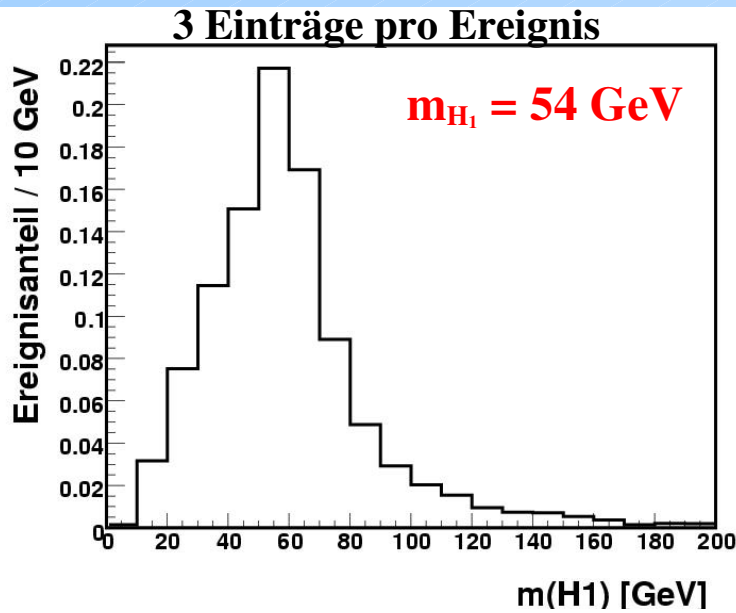
Schnitt auf Massen! $m(t)$ [GeV]

ttbb:

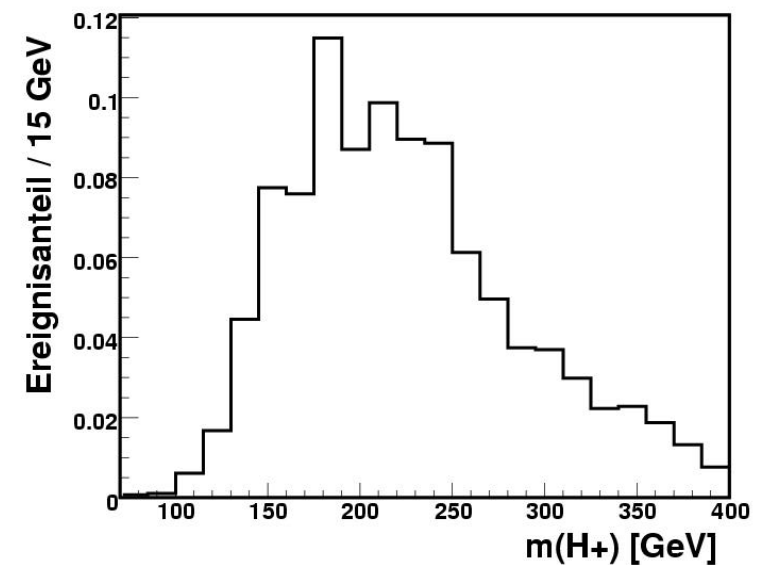
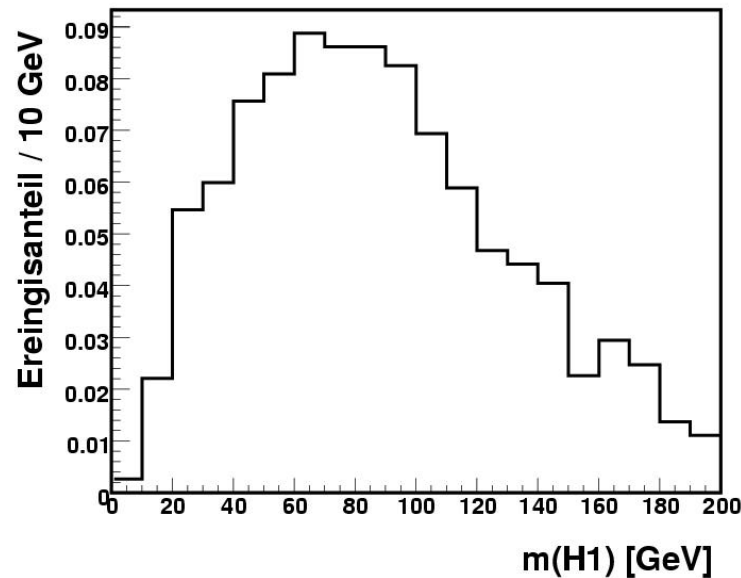


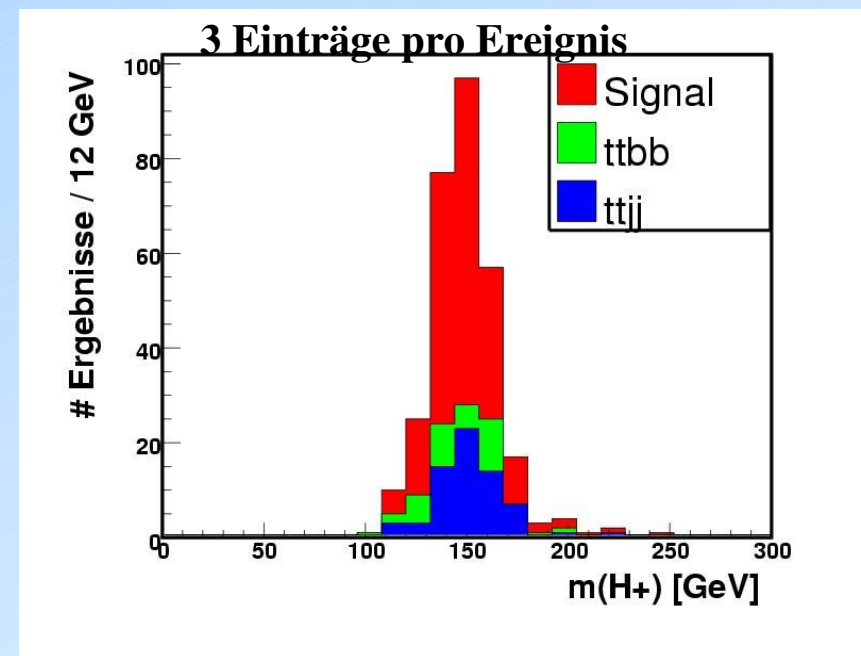
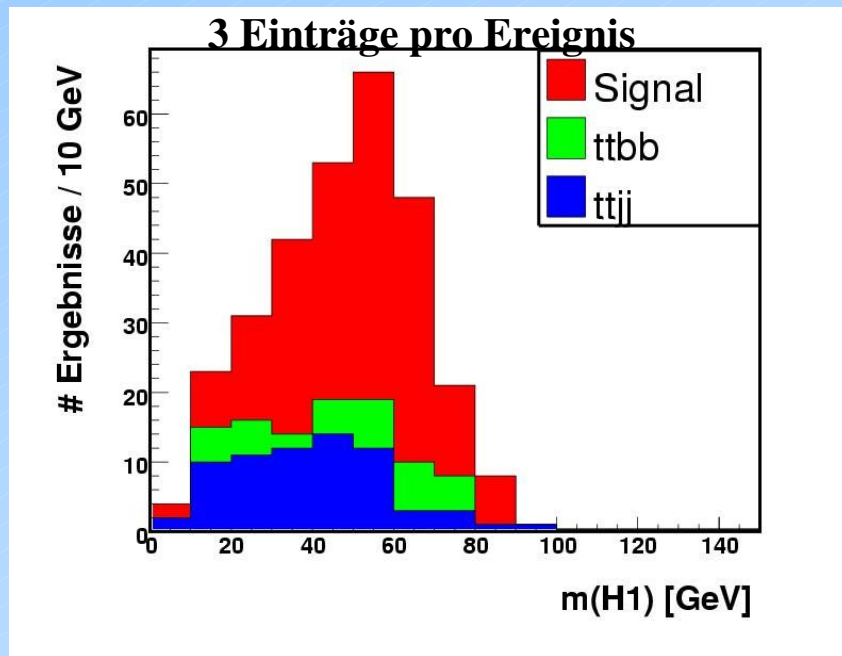
Higgs-Massen (Vor Schnitt)

Signal:



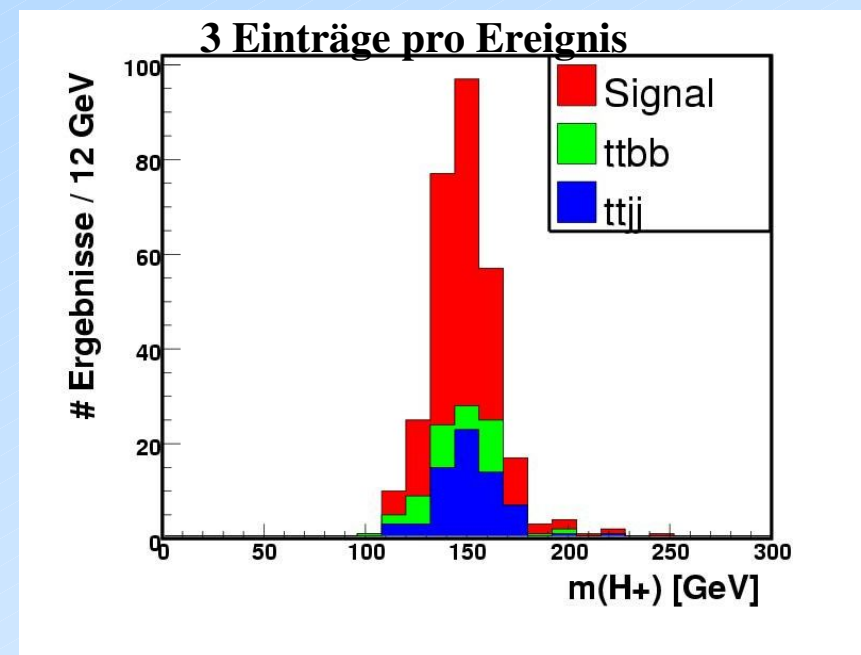
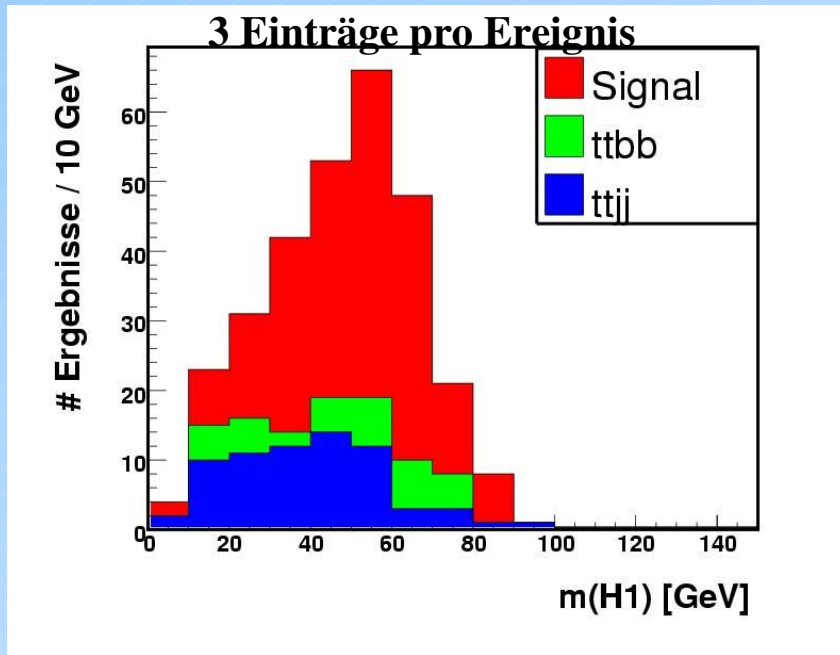
ttbb:





	Signal	ttbb	ttjj	$\frac{B}{S}$
vor Schnitten	39000	144000	$1,5 \cdot 10^7$	400
nach Vorselektion	210	352	328	3
nach Top-Schnitt	64	12	23	0,6

$m_{H^+} = 135 \text{ GeV}$
 $m_{H_1} = 54 \text{ GeV}$
 $\sigma = 1,3 \text{ pb}$



→ Signifikanz: $\frac{S}{\sqrt{B}} = 11$

$m_{H^+} = 135 \text{ GeV}$
 $m_{H_1} = 54 \text{ GeV}$
 $\sigma = 1,3 \text{ pb}$

→ Rekonstruktion für ganze Parameterebene

→ Entdeckungspotential für Higgs-Bosonen

→ Dreifache Mehrdeutigkeit in Higgs-Masse

$t_2 \triangleq b \text{ } \mathbf{b \text{ } b} \text{ } jj$
 H_1 → Eine ist richtig

Zwei sind falsch

$$t_2 \cong \begin{array}{ccccc} & \text{b} & \text{b} & & \text{jj} \\ & \text{H}_1 & & & \end{array}$$

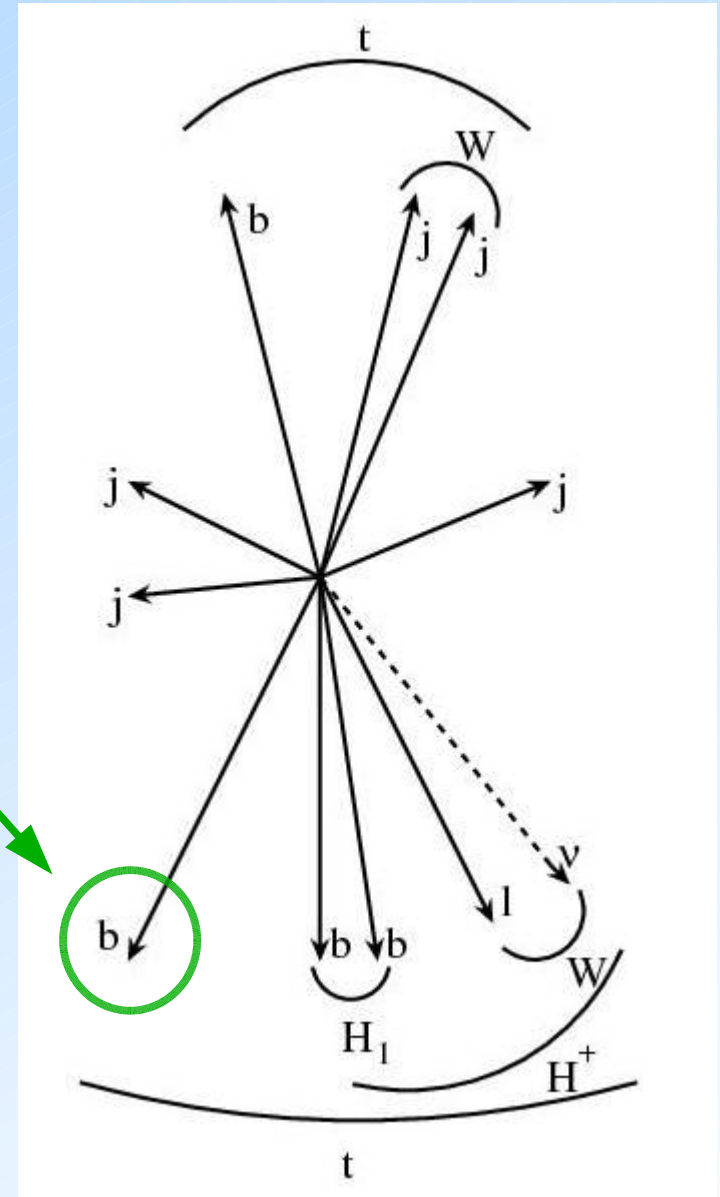
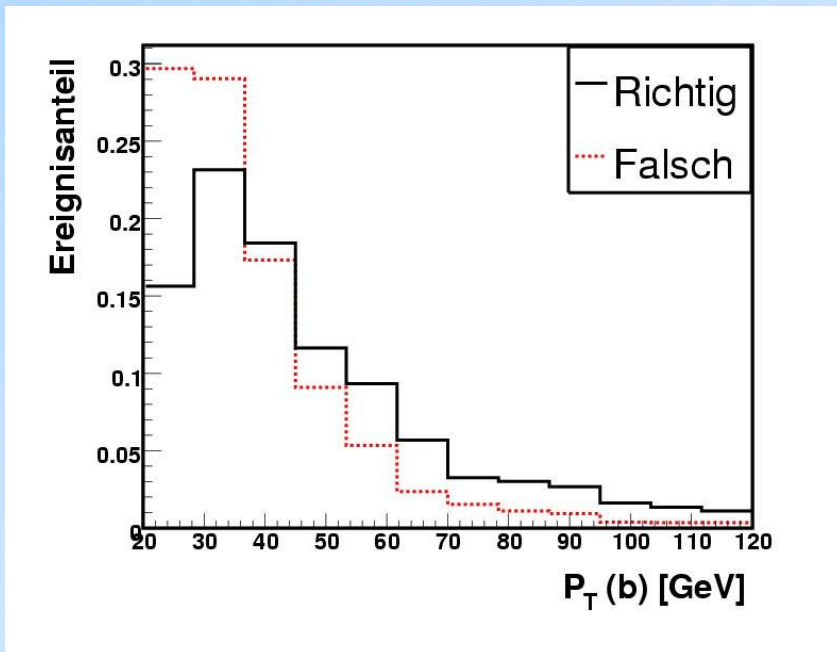
The diagram illustrates the decay of a top quark (t) into a bottom quark (b) and a W boson. The W boson then decays into a lepton (l) and a neutrino (ν). The diagram shows the production of the top quark from a gluon (g) and an anti-bottom quark ($\bar{b}$), and the subsequent decay of the top quark into a bottom quark and a W boson. The W boson decays into a lepton and a neutrino. The diagram is labeled with various particles and their momenta, and includes a red circle highlighting the decay vertex.

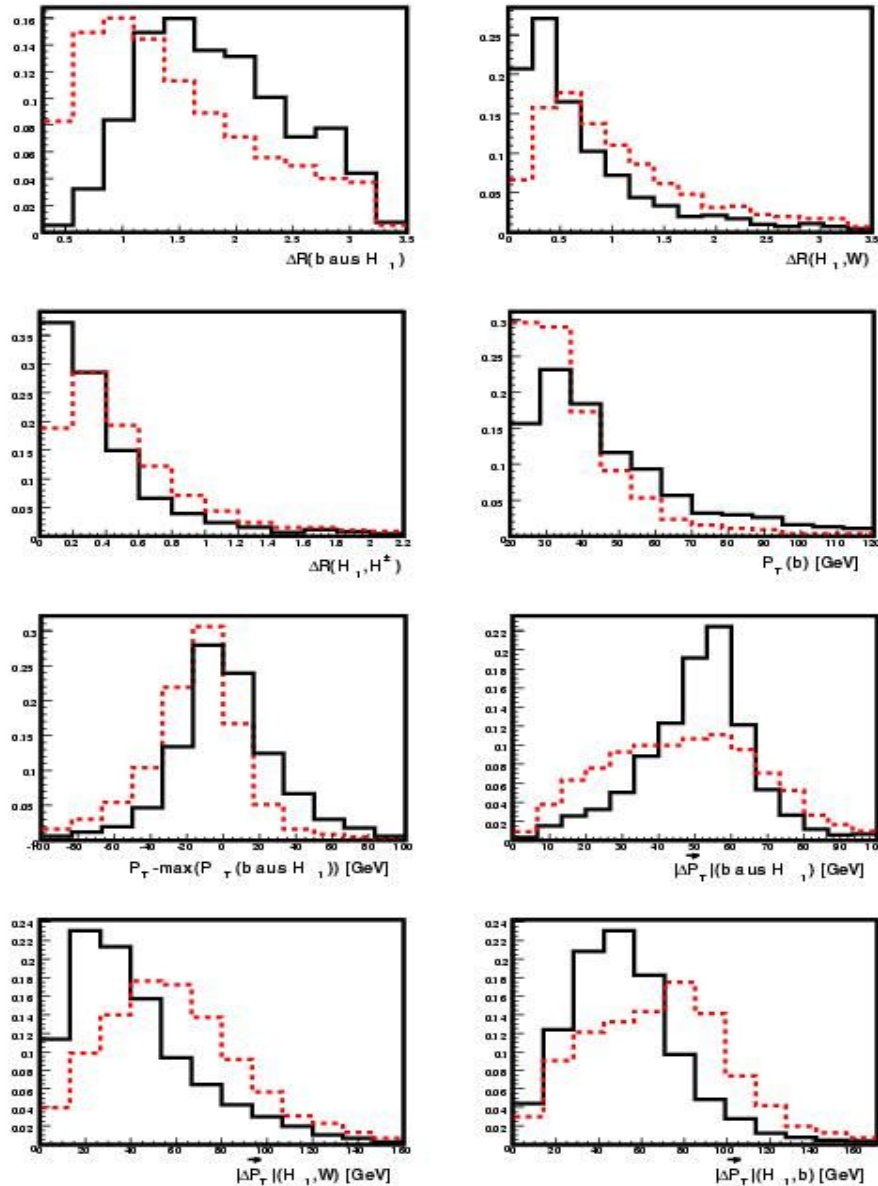
— Falsch

— Richtig

→ Suche trennkraftige Variablen

z.B.: p_T von b-tagged Jet der nicht dem H_1 zugeordnet wird

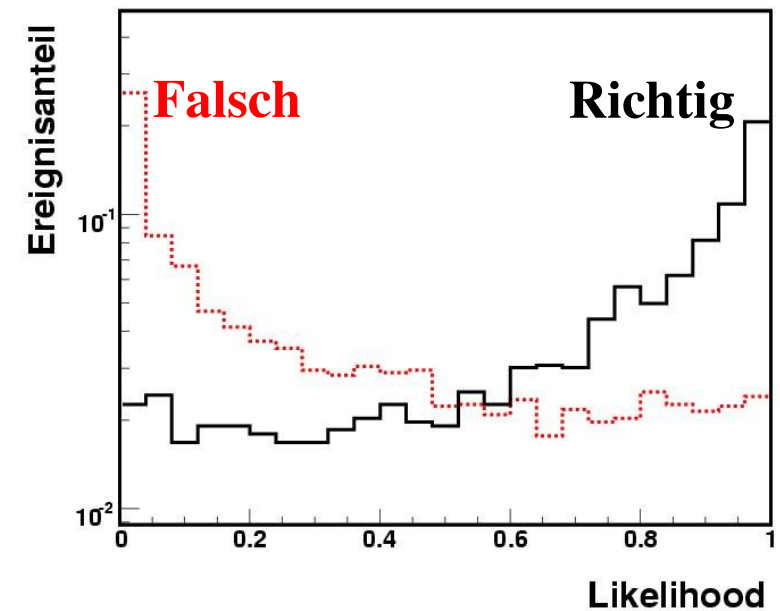




Suche viele solcher Variablen

→ Kombiniere Information aller Variablen in Likelihood **L**

→ **L** ist Maß für Richtigkeit einer Kombination



Jede Kombination ergibt einen Wert für L

$$t_2 \hat{=} b \text{ } \textcolor{red}{b} \text{ } \textcolor{red}{b} \text{ } jj \xrightarrow{\textcolor{red}{L}_1} L_1$$

H_1

$$t_2 \hat{=} \textcolor{green}{b} \text{ } \textcolor{green}{b} \text{ } b \text{ } jj \xrightarrow{\textcolor{green}{L}_2} L_2$$

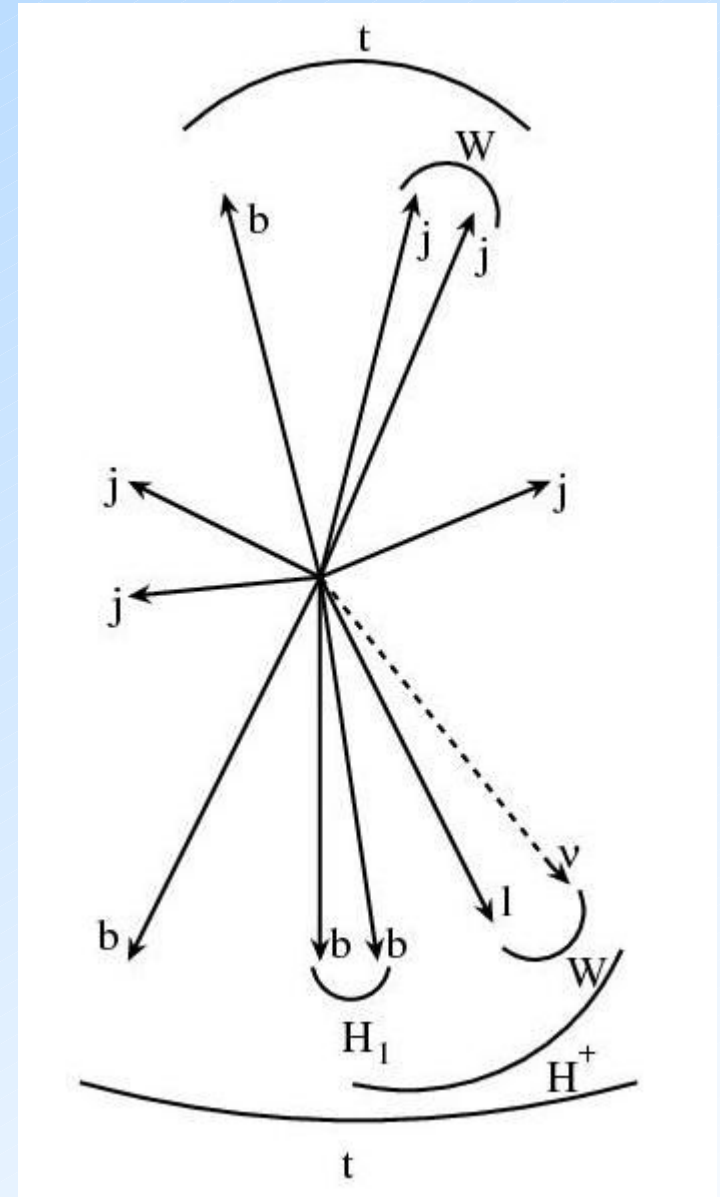
H_1

$$t_2 \hat{=} \textcolor{violet}{b} \text{ } b \text{ } \textcolor{violet}{b} \text{ } jj \xrightarrow{\textcolor{violet}{L}_3} L_3$$

H_1

→ Wähle Kombination mit maximaler Likelihood L_{MAX} z.B. $\textcolor{violet}{L}_3$

→ $\textcolor{violet}{L}_3$ besitzt größte Wahrscheinlichkeit richtig zu sein!



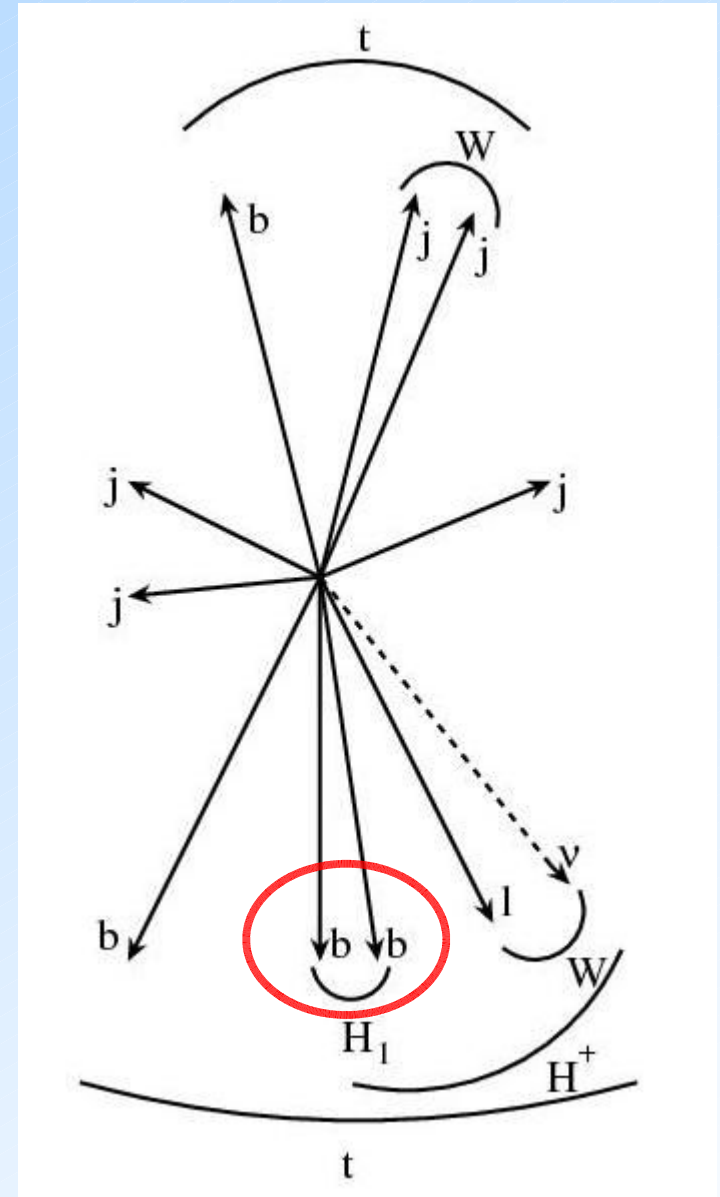
Ergebnis:

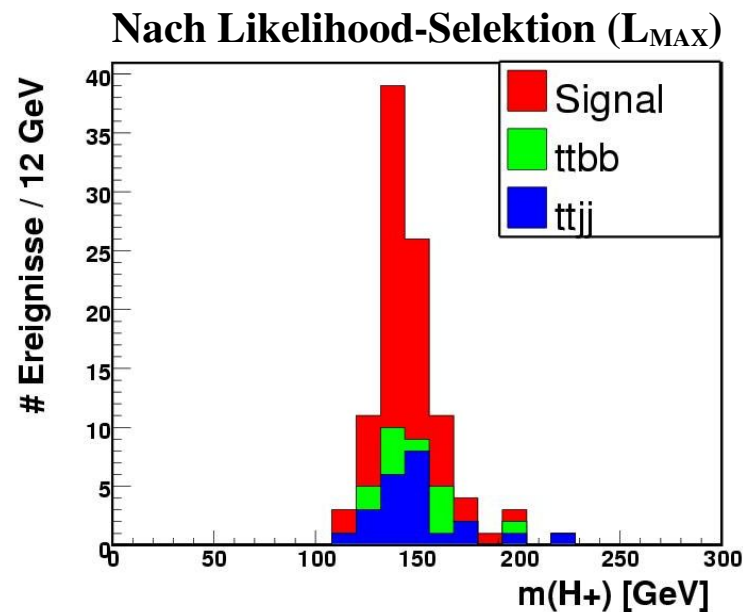
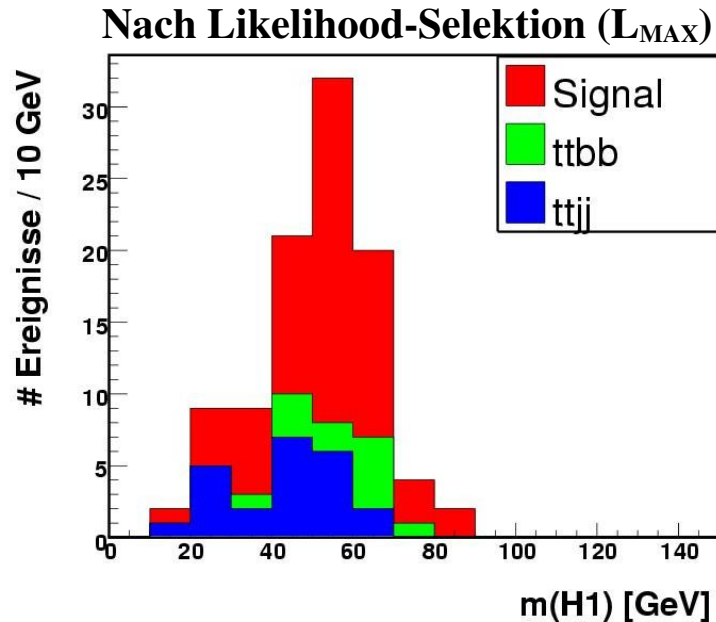
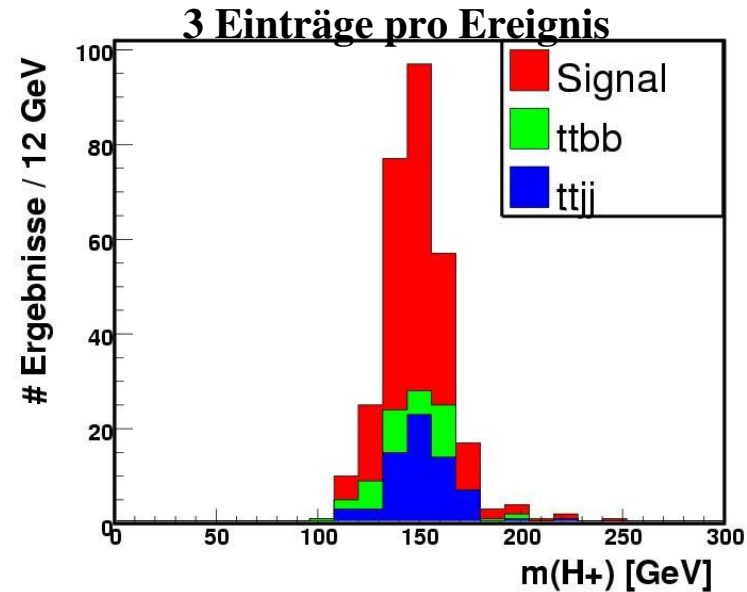
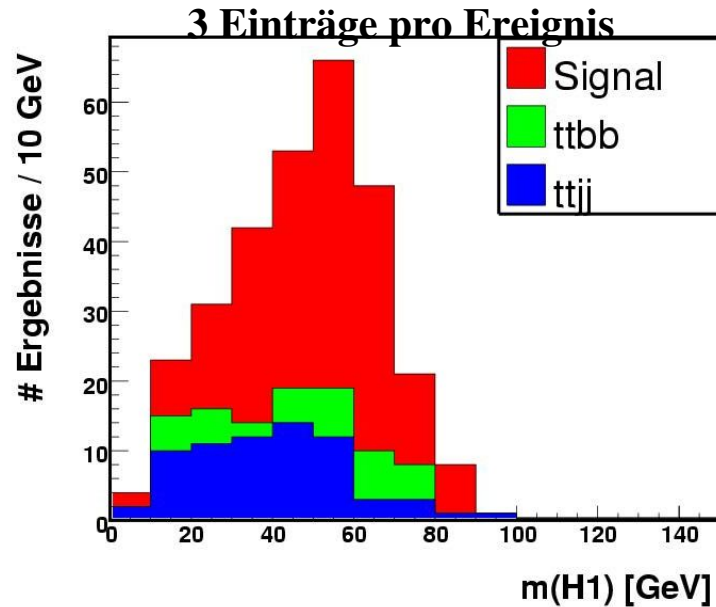
Sind beide **b-Jets** aus H_1 unter den b-Jets in

$$t_2 \triangleq b \quad b \quad b \quad qq$$

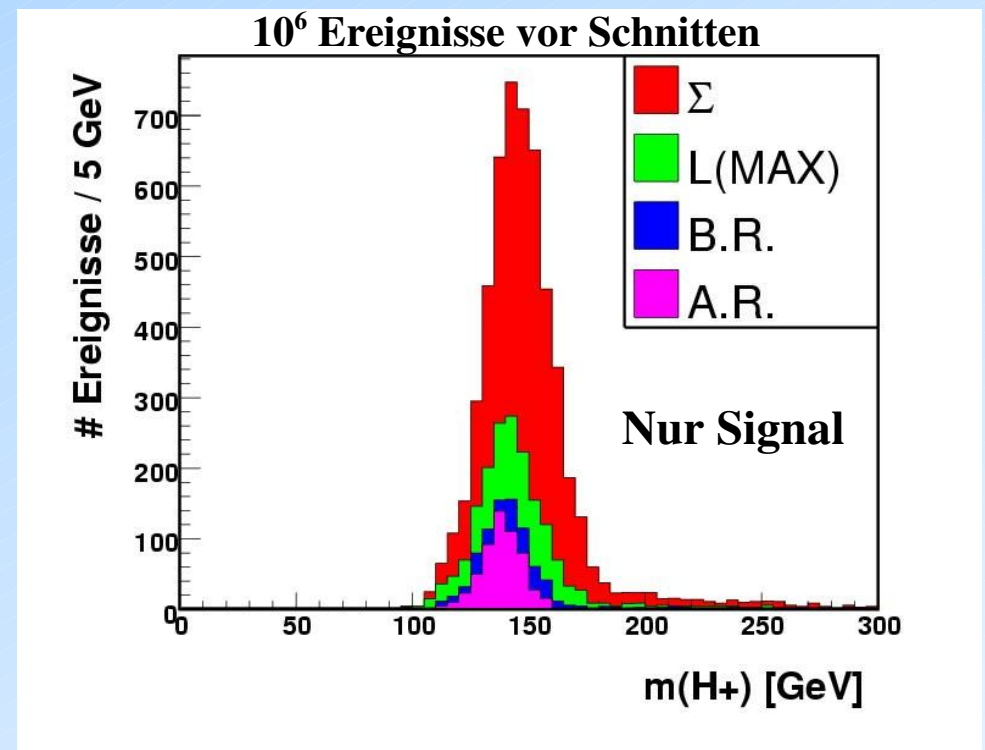
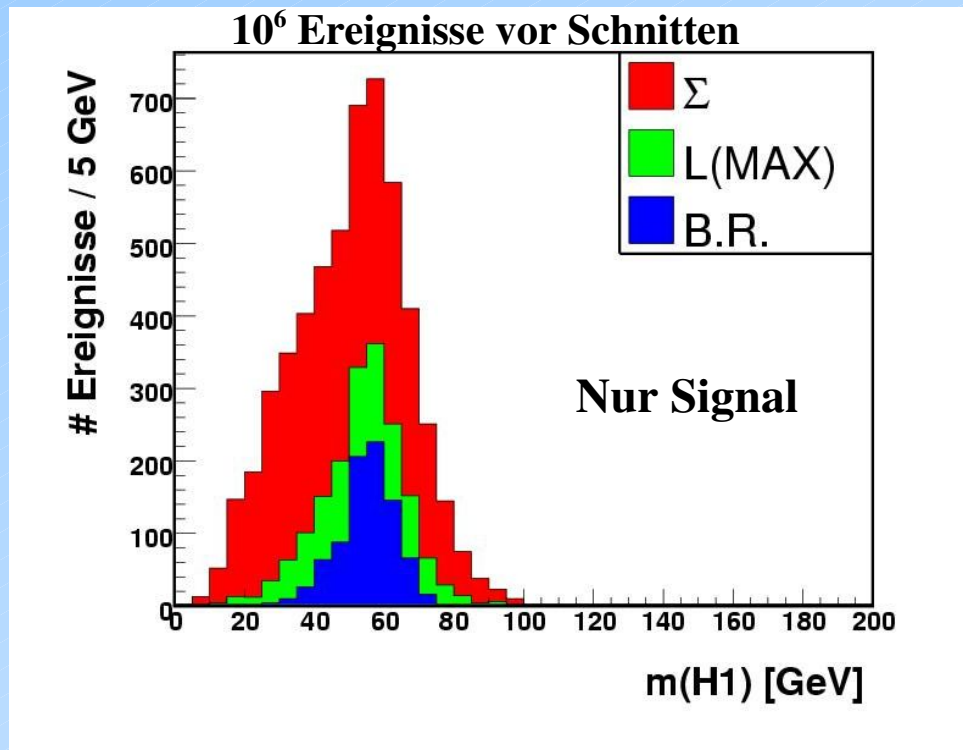
dann werden sie in 68% der Fälle auch dem H_1 zugewiesen

Für zufällige Wahl der Kombination geschieht dies nur in 33% der Fälle!





$m_{H^+} = 135 \text{ GeV}$
 $m_{H_1} = 54 \text{ GeV}$
 $\sigma = 1,3 \text{ pb}$



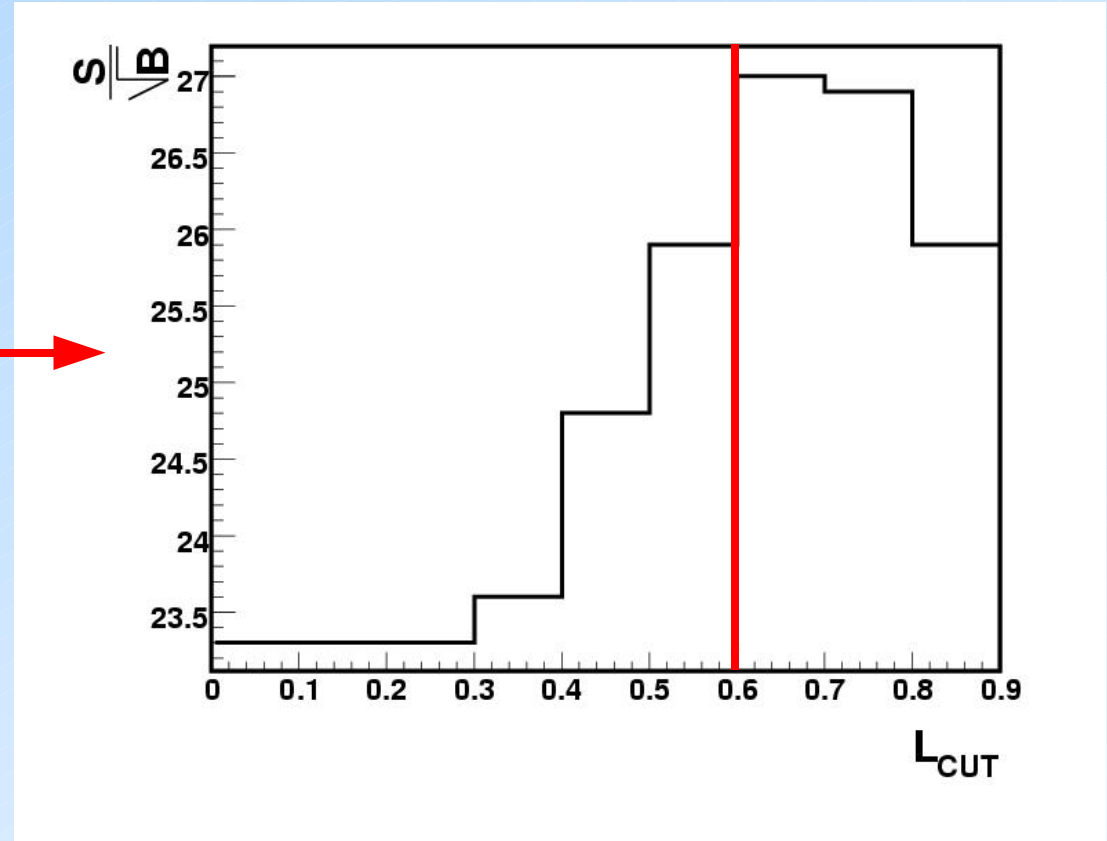
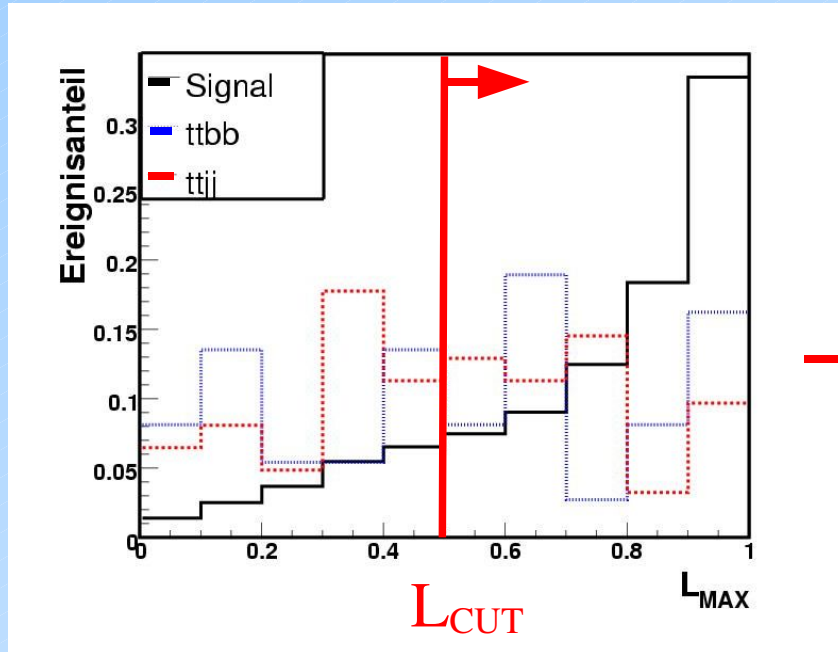
Σ : Summe über drei Kombinationen

L(MAX): Nur Kombination mit maximalem L

B.R.: (b-Jets richtig) Nur Ereignisse mit richtig zugewiesenen b-Jets

A.R.: (Alles richtig) Nur Ereignisse mit richtig zugewiesenen b-Jets, leichten Jets und Neutrino-Lösungen

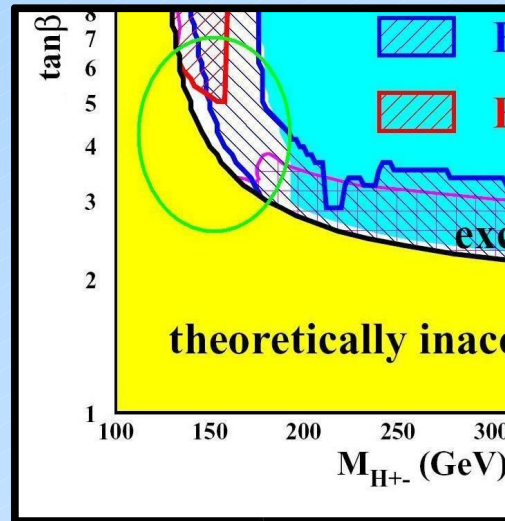
Nutze Likelihood zur Unterdrückung des Untergrundes:



Schnitt auf L_{MAX} bei L_{CUT}

→ Optimaler Wert bei $L_{\text{CUT}}=0,6$

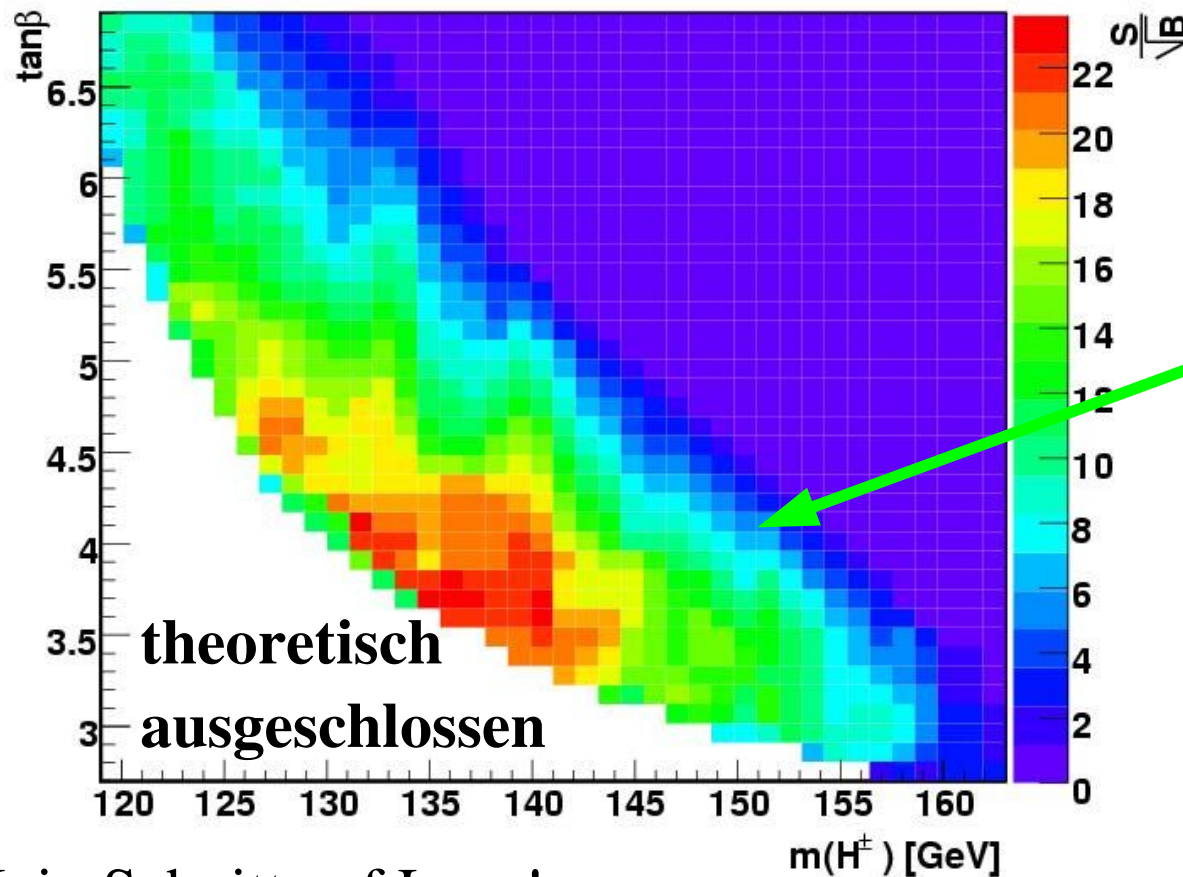
Erinnerung:



Vorgehensweise: Wende Rekonstruktion auf möglichst viele Punkte in Parameterebene an

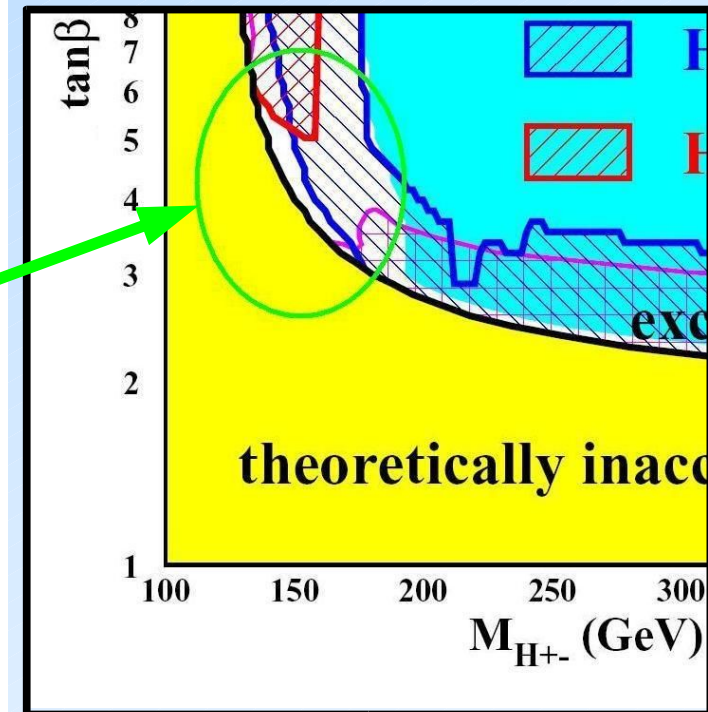
- Bestimme Signifikanz in Abhängigkeit von $\tan\beta$ und $m_{H^\pm}$
- Bisher durchgeführt für 30fb^{-1} mit und ohne Schnitt auf L_{MAX} , in beiden Fällen kein Schnitt auf Higgs-Massen

Rekonstruktion an 150 Punkten

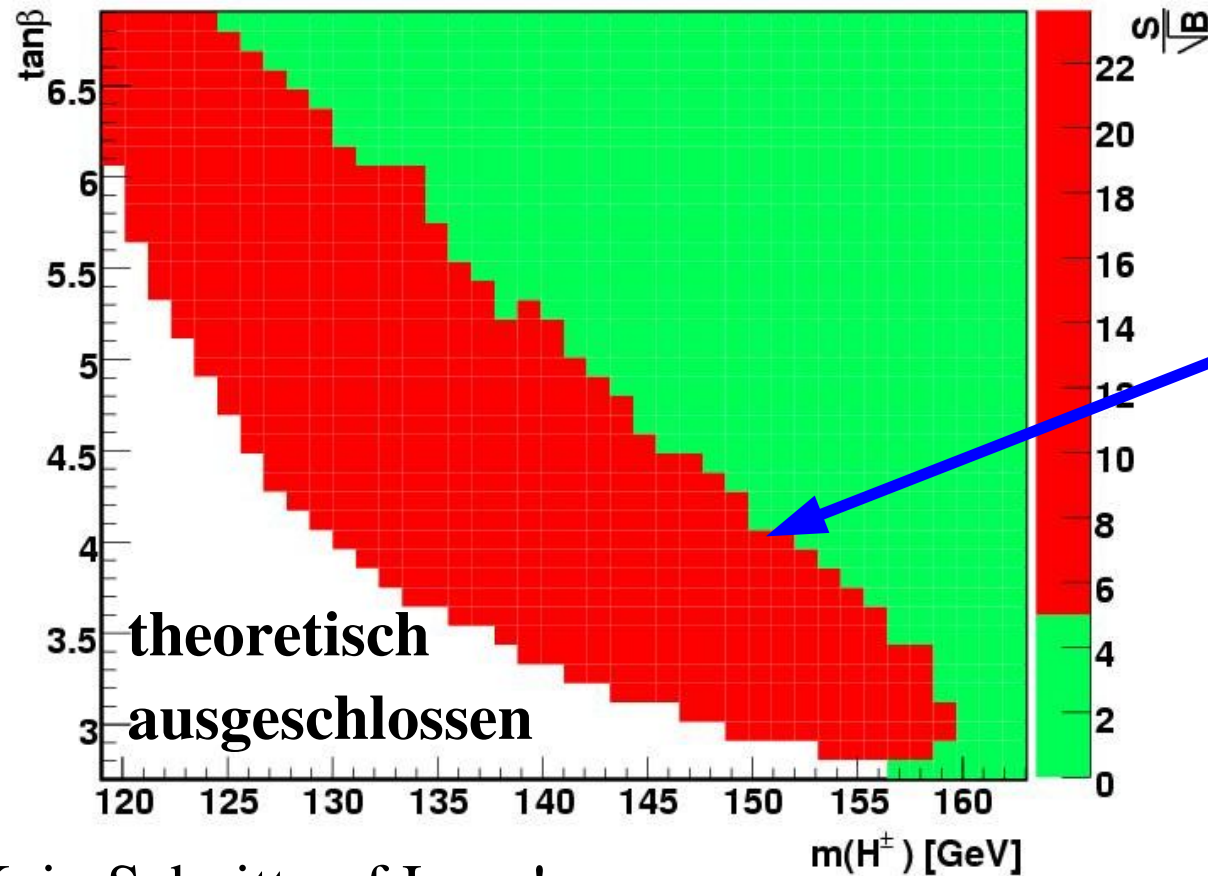
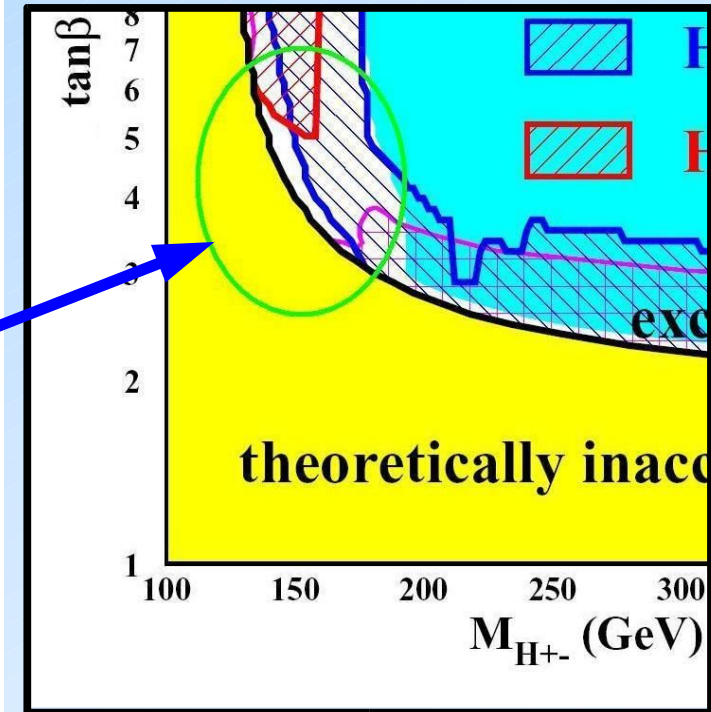


Kein Schnitt auf L_{MAX} !

300fb^{-1}



Rekonstruktion an 150 Punkten

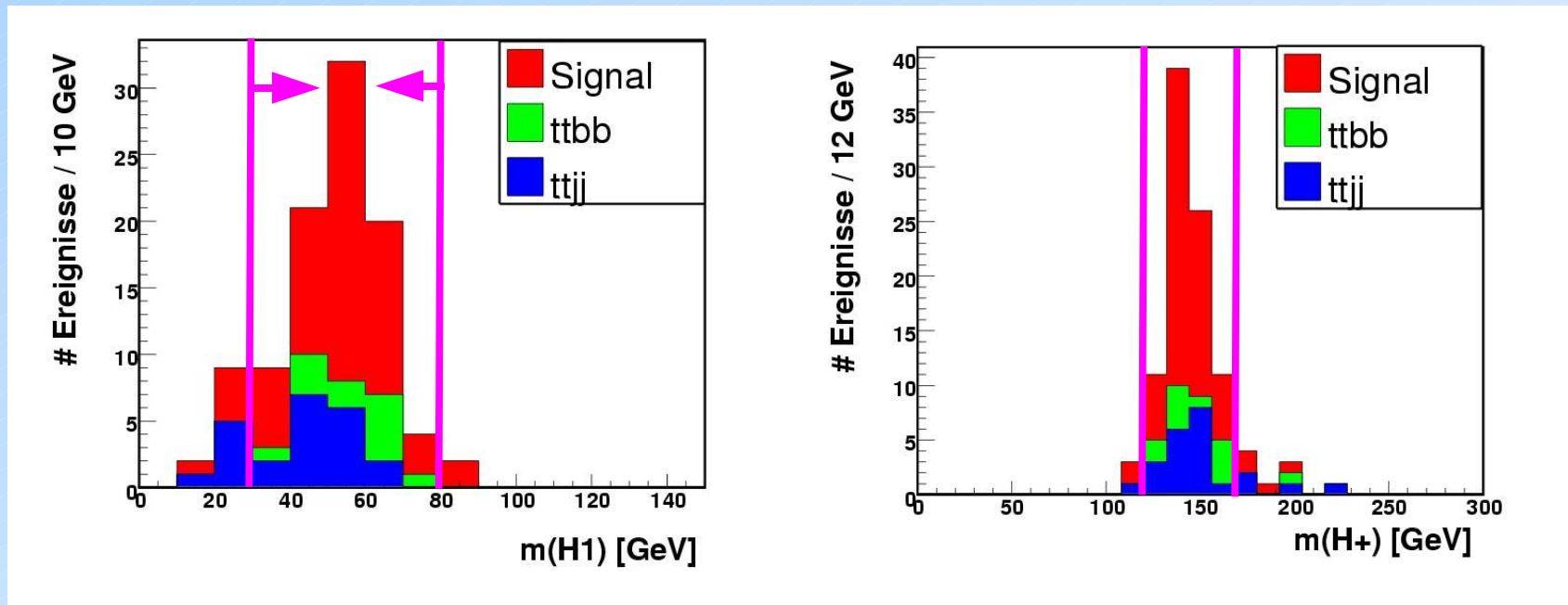
Kein Schnitt auf L_{MAX} ! 300fb^{-1} 

$$\text{---} \frac{S}{\sqrt{B}} > 5$$

Mit Schnitt auf $L_{\text{MAX}} > L_{\text{CUT}} = 0,6 \rightarrow$ Keine Verbesserung

Ausblick

- Studie für verschiedene Effizienzen der Identifikation von b-Jets
- Schnitt auf Higgs-Massen:



Erste Ergebnisse: Keine Verbesserung der Signifikanz

- Abschätzung des Untergrundes aus Daten möglich?
- Genauer Vergleich mit Loch

Zusammenfassung

- CPV MSSM: Neue Quellen von CP-Verletzung für Baryogenese
- LEP: Keine untere Grenze für $m(H_1)$
- LHC: Bisher keine Studien für $m(H_1) < 70$ GeV, Standardkanäle insensitive
- Untersucher Prozess:
$$pp \rightarrow ttX \rightarrow (bW)(bH^\pm)X \rightarrow (b\nu)(bH_1 W)X \rightarrow (b\nu)(bbb)(jj)X$$
- Selektion:
 - b-tagging gegen ttjj
 - Rekonstruktion der Top-Massen gegen ttbb
 - $H_1 \rightarrow bb$ Ambiguität $\rightarrow$ Likelihood-Selektion
- Studie schließt „Loch“ im LHC-Entdeckungspotential