



Doctoral Thesis

## Precise predictions for four-fermion production in electron-positron annihilation

**Author(s):**

Roth, Markus

**Publication Date:**

1999

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-003886991> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 13363

# Precise Predictions for Four-Fermion Production in Electron-Positron Annihilation

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH  
(ETH Zürich)

for the degree of  
Doctor of Natural Sciences

presented by  
**Markus Roth**  
Dipl. Phys. Univ. Würzburg  
born March 8, 1969  
German citizen

accepted on the recommendation of  
Prof. Zoltan Kunszt, examiner  
PD Dr. Ansgar Denner, co-examiner  
Prof. Jürg Fröhlich, co-examiner

1999

# Abstract

At present, the W boson is investigated experimentally at LEP2 via its pair production. In order to achieve precise theoretical predictions for the measurement of the W-boson mass and the non-abelian triple-gauge-boson couplings, the inclusion of radiative corrections is required. Since the W bosons decay very rapidly into light fermion pairs, the actual processes under investigation are  $e^+e^- \rightarrow 4$  fermions.

The full  $\mathcal{O}(\alpha)$  corrections to these processes are not available at present. Since the main contributions originate from diagrams with two resonant W-boson propagators, an expansion of the amplitude around the poles of the two resonant W bosons is a reasonable approach, which is also gauge-invariant. In the double-pole approximation, the contributions are classified in factorizable and non-factorizable corrections. The amplitudes of the factorizable corrections are composed of those for the on-shell W-pair production and the on-shell W-decays multiplied by the two propagators of the resonant W bosons. All other corrections are called non-factorizable, because they do not factorize into a simple product of W-pair production and W decays.

As a first step of this work, the non-factorizable corrections of the processes  $e^+e^- \rightarrow 4$  fermions are calculated in double-pole approximation. The non-factorizable corrections are implemented into an existing Monte Carlo program and various distributions are studied. It turns out that the non-factorizable corrections are negligible with respect to the experimental accuracy of LEP2; however, they should become relevant for a future linear collider with higher luminosity.

A further building block of the radiative corrections to four-fermion production are the bremsstrahlung processes  $e^+e^- \rightarrow 4$  fermions +  $\gamma$ . These processes are of physics interest in their own right. For instance, the radiative processes can be used to obtain information on the quartic-gauge-boson couplings  $\gamma\gamma WW$ ,  $\gamma ZWW$ , and  $\gamma\gamma ZZ$ , which are part of the tree-level amplitude. The tree-level helicity amplitudes for the processes  $e^+e^- \rightarrow 4$  fermions and  $e^+e^- \rightarrow 4$  fermions +  $\gamma$  for all possible final-state fermions are calculated. A multi-channel Monte Carlo program for both classes of processes is constructed. This is a particularly difficult task owing to the very complex peaking structure of the differential cross section.

In order to include radiative corrections into the Monte Carlo program, the infrared and collinear singularities must be extracted from the bremsstrahlung process. This is done by applying the dipole-subtraction method to four-fermion production. This subtraction method has already been worked out in massless QCD for dimensional regularization. In the Electroweak Standard Model it is more convenient to regularize the amplitude with an infinitesimal photon mass and small fermion masses. Hence, the subtraction method is reformulated for mass regularization.

Finally, the doubly-resonant virtual corrections are implemented into the Monte Carlo program for the processes  $e^+e^- \rightarrow 4 \text{ fermions}(+\gamma)$ . Therefore, the results of the non-factorizable corrections and the already existing results of the on-shell  $W$ -pair production and on-shell  $W$ -decay are used. For the real corrections the complete bremsstrahlung process  $e^+e^- \rightarrow 4 \text{ fermions} + \gamma$  is taken into account. All results are combined in a four-fermion generator, which is the first Monte Carlo generator including the complete  $\mathcal{O}(\alpha)$  corrections to the processes  $e^+e^- \rightarrow W^+W^- \rightarrow 4 \text{ fermions}$  in double-pole approximation. This generator is used to produce numerical results for the total cross section, angular, and invariant-mass distributions.

# Zusammenfassung

Am Beschleuniger LEP2 wird zur Zeit die W-Paar-Produktion experimentell untersucht. Um genaue theoretische Vorhersagen für die Bestimmung der W-Boson-Masse und die Untersuchung der Drei-Eichboson-Kopplungen zu erhalten, müssen Strahlungskorrekturen berücksichtigt werden. Weil die W-Bosonen sehr schnell in je zwei leichte Fermionen zerfallen, werden in Wirklichkeit die Prozesse  $e^+e^- \rightarrow 4$  Fermionen untersucht.

Die vollständigen Strahlungskorrekturen in  $\mathcal{O}(\alpha)$  sind zu diesen Prozessen noch nicht bekannt. Der Hauptbeitrag stammt von Diagrammen mit zwei resonanten W-Boson-Propagatoren. Deshalb besteht ein naheliegender und auch eichinvarianter Ansatz darin, die Amplitude um die Pole der beiden W-Bosonen zu entwickeln. In dieser Doppelpolnäherung können die Strahlungskorrekturen in faktorisierte und nicht-faktorisierte Korrekturen klassifiziert werden. Die Amplitude der faktorisierten Korrekturen setzt sich aus den Amplituden der W-Paar-Produktion, den beiden Amplituden der W-Boson-Zerfälle und den zwei Propagatoren der resonanten W-Bosonen zusammen. Alle übrigen Korrekturen werden mit nicht-faktorisiert bezeichnet, weil sie nicht aus einem einfachen Produkt von Beiträgen zur Produktion und zu den Zerfällen geschrieben werden können.

In einem ersten Schritt wurden in der vorliegenden Arbeit die nicht-faktorisierten Korrekturen zu den Prozessen  $e^+e^- \rightarrow 4$  Fermionen in Doppelpolnäherung berechnet. Sie wurden in ein existierendes Monte-Carlo-Programm eingebaut, und verschiedene Verteilungen wurden studiert. Dabei zeigte sich, dass diese Korrekturen vernachlässigbar gegenüber dem experimentellen Fehler von LEP2 sind. Jedoch werden sie für einen zukünftigen Linearbeschleuniger mit höherer Luminosität voraussichtlich wichtig.

Ein weiterer notwendiger Bestandteil der Strahlungskorrekturen zur Vier-Fermion-Produktion sind die Bremsstrahlungsprozesse  $e^+e^- \rightarrow 4$  Fermionen +  $\gamma$ . Mit diesen Prozessen können auch die Vier-Eichboson-Kopplungen  $\gamma\gamma WW$ ,  $\gamma ZWW$  und  $\gamma\gamma ZZ$  studiert werden, die auf Born-Niveau enthalten sind. Die Helizitäts-Amplituden zu den Prozessen  $e^+e^- \rightarrow 4$  Fermionen und  $e^+e^- \rightarrow 4$  Fermionen +  $\gamma$  für alle Endzustände wurden berechnet, und ein Monte-Carlo-Programm für beide Klassen von Prozessen geschrieben. Die Schwierigkeit lag dabei in dem sehr komplexen und stark variierenden Verhalten des differentiellen Wirkungsquerschnittes.

Um Strahlungskorrekturen mit Hilfe eines Monte-Carlo-Programms zu berechnen, müssen die infraroten und kollinearen Singularitäten vom Bremsstrahlungsprozess abgespalten werden. Dazu wurde die Dipol-Subtraktionsmethode auf die Vier-Fermion-Produktion angewandt. Diese Subtraktionsmethode existierte in der Literatur für masselose QCD und dimensionale Regularisierung. Für das Elektroschwache Standardmodell werden normalerweise die Singularitäten mit einer infinitesimalen Photonmasse und kleinen Fermion-

massen regularisiert. Daher wurde die Subtraktionsmethode für die Massenregularisierung umgeschrieben.

Alle doppeltresonanten virtuellen Korrekturen wurden in das vorher erwähnte Monte-Carlo-Programm für die Prozesse  $e^+e^- \rightarrow 4 \text{ Fermionen} (+\gamma)$  eingebaut. Dazu wurden die nicht-faktorisierten Korrekturen und die schon existierenden Ergebnisse für die W-Paar-Produktion und W-Zerfälle verwendet. Für die reellen Korrekturen wurde der komplette Bremsstrahlungsprozess  $e^+e^- \rightarrow 4 \text{ Fermionen} + \gamma$  berücksichtigt. Dieses Programm ist der erste Monte-Carlo-Generator, der alle Strahlungskorrekturen in  $\mathcal{O}(\alpha)$  zur Vier-Fermion-Produktion in Doppelpolnäherung beinhaltet. Mit ihm wurden numerische Ergebnisse für den totalen Wirkungsquerschnitt, Winkelverteilungen und invariante-Massen-Verteilungen erzeugt.