



Doctoral Thesis

## Physics beyond the standard model inspired by extra space dimensions

**Author(s):**

Puchwein, Martin Walter

**Publication Date:**

2004

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004948142> →

**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. 15837

**Physics Beyond the Standard Model  
Inspired by  
Extra Space Dimensions**

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

for the degree of  
**Doctor of Natural Sciences**

presented by  
**Martin Walter Puchwein**

Dipl. Phys. ETH, ETH Zürich

born 26.02.1977

citizen of Austria

accepted on the recommendation of  
Prof. Zoltan Kunszt, examiner  
Prof. Jürg Fröhlich, co-examiner

2004

# Abstract

The aim of this thesis has been to actively participate in the ongoing developments in the area of quantum field theories formulated in space-times with more than four dimensions. The outline is as following: First the shortcomings of the Standard Model are discussed and it is argued why field theories with extra dimensions are believed to improve on these deficits. As most extra dimensional models are non-renormalizable the sensible discussion of loop-corrections is essential. To do so a formalism widely used in finite temperature field theory is applied to theories with compactified extra space dimensions. In this framework loop-corrections in 5D QED and 5D non-abelian gauge theory are considered. Contrary to the standard treatment loop integrals are evaluated in momentum space for the four infinite and in position space for the compactified dimension. We calculate mass corrections to the Kaluza-Klein tower of the gauge bosons and the electron. In the case of the orbifold compactification there exist extra operators that are localized on the fixed points under the action of the discrete symmetry group. The nature of the divergencies is discussed and it is pointed out where a proper regularization mechanism is required. All calculations are carried out analytically using a computer algebra system.

An appropriate regularization mechanism can be provided by deconstruction. Although deconstructed theories are renormalizable strongly interacting gauge theories in four dimensions, they can mimic a compact extra dimension in the low-energy limit. By properly identifying the parameters of both theories, deconstruction can serve as a gauge invariant (lattice-)regularization for the higher dimensional model. The low-energy limit of the deconstructed model is described by a non-linear sigma model. To perform calculations one can thus utilize the methods of chiral perturbation theory developed for low-energy QCD and theories with a heavy Higgs boson. The method is explained and applied to the case at hand. Introducing counterterms that cancel the divergencies it is possible to perform loop calculations that yield manifestly finite results in every order of perturbation theory. In general they will however depend on the unknown coefficients of the counterterms.

We calculate the quantities corresponding to the 5D calculation described above in the deconstructed setup. Doing so one has to deal with sums over modes propagating in the loop. Methods to evaluate these sums in a closed form are developed and the calculation is carried out analytically with the aid of a computer algebra system. We compare the results to the calculation performed in the case of a continuous extra dimension and discuss which quantities are sensitive to the unknown high energy physics. Concluding, the relation between the parameters of the deconstructed and the lattice regulated 5D theory is established at the one-loop order.

The last part of this thesis deals with the recent developments in the area of little Higgs models. These models revive an old idea that the Higgs boson may be a light because it is a pseudo-Goldstone boson from the breaking of a global symmetry. It is pointed out which are the necessary and sufficient conditions for the little Higgs mechanism to work. Several different setups are discussed which are based on different breaking schemes of the global symmetry. One has to carefully check for each model whether constraints from electroweak precision data and flavor changing neutral currents are fulfilled. We analyze these issues for the models described and point out where tension arises. Several modifications aiming to overcome these deficits are investigated. Notably the possibility of matter transforming in non-linear representations under the global symmetry group and additional discrete symmetries are discussed.

# Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, aktiv an den derzeit stattfindenden Entwicklung auf dem Gebiet von Quantenfeldtheorien mit mehr als vier Raumzeitdimensionen teilzunehmen. Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt: Zuerst werden die Schwachstellen des Standard Modells aufgezeigt. Dann wird dargelegt, wie und zu welchem Grad, Feldtheorien mit zusätzlichen Raumdimensionen diese Probleme überwinden können. Da die meisten solchen Modelle nicht renormierbar sind, ist es wichtig Schleifenkorrekturen eingehend zu diskutieren. In dieser Arbeit tun wir dies in einem, aus der Temperaturfeldtheorie stammenden, Formalismus. Dabei werden die Schleifenintegrale der vier unendlich ausgedehnten Dimensionen wie üblich im Impulsraum, die der kompakten Dimensionen jedoch im Ortsraum berechnet. Mit diesem Ansatz betrachten wir 1-Schleifen Korrekturen zu den Massen der Kaluza-Klein Türme von Eichboson und Elektron in fünfdimensionaler QED und nichtabelscher Eichtheorie. Im Fall von Kompaktifizierung auf einem Orbifold erhält man zusätzliche Operatoren, die auf den Fixpunkten unter der diskreten Symmetriegruppe lokalisiert sind. Wir diskutieren die auftretenden Divergenzen und erläutern wann ein wohldefinierter Regularisierungsmechanismus vonnöten ist. Alle Rechnungen wurden analytisch mithilfe eines Computeralgebraprogrammes durchgeführt.

Eine solche Regularisierung erhält man durch einen, Deconstruction genannten, Mechanismus. Bei Deconstruction handelt es sich um renormierbare, stark wechselwirkende Theorien in vier Raumzeit Dimensionen. Erstaunlicherweise verhalten sich diese Modelle im Niederenergie-Limes wie eine höherdimensionale Theorie mit kompakten Raum-Dimensionen. Durch Identifikation der jeweiligen Parameter werden die beiden Theorien in Relation zueinander gesetzt und die Deconstruction Theorie liefert eine (Gitter-) Regularisierung der Kontinuumstheorie. Der Niederenergie-Limes des Deconstruction Modells wird durch ein nichtlineares Sigma-Modell beschrieben. Dies erlaubt die Verwendung von Rechenmethoden aus der chiralen Störungstheorie die für Niederenergie-QCD und Modelle mit einem schweren Higgs-Boson entwickelt wurden. Wir wenden diese Methoden auf den vorliegenden

Fall an. Nach Einführung von Countertermen, die die auftretenden Divergenzen kürzen, erhält man endliche Resultate in jeder Ordnung Störungstheorie. Im allgemeinen hängen diese Grössen jedoch von den unbekanntem Koeffizienten der Counterterme ab. Wir führen die zuvor in fünf Dimensionen durchgeführten Rechnungen in der dazugehörigen Deconstruction Theorie aus. Die dabei auftretenden Summen über Moden im Schleifenintegral, können in geschlossener Form berechnet werden. Wir beschreiben die rechen-technischen Hilfsmittel und führen die Rechnung mithilfe eines Computeralgebrasystems aus. Anschliessend vergleichen wir die Resultate mit denen der fünfdimensionalen Rechnung und diskutieren welche Grössen von der unbekanntem Hochenergietheorie abhängig sind. Zuletzt diskutieren wir die Beziehung zwischen der höherdimensionalen und der Deconstruction Theorie in 1-Schleifen Ordnung.

Der letzte Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit den kürzlich entdeckten sogenannten "Little Higgs" Modellen. Diese greifen eine alte Idee auf wonach das Higgs-Boson ein Pseudo-Goldstone-Boson der Brechung einer globalen Symmetrie ist und deswegen relativ leicht ist. Zuerst führen wir aus, welches die notwendigen und hinreichenden Bedingungen für die Konstruktion eines "Little Higgs" Modells sind. Dann werden verschiedene Modelle diskutiert, die auf unterschiedlichen gebrochenen Symmetriegruppen basieren. Für jedes dieser Modelle muss überprüft werden, dass es im Einklang mit experimentellen Beobachtungen steht. Die wichtigsten solchen Messungen kommen von Präzisionsmessungen der elektroschwachen Theorie und von der Unterdrückung von flavorändernden neutralen Strömen. Wir analysieren inwieweit diese Einschränkungen erfüllt sind und wo die beschriebenen Modelle mit ihnen in Konflikt stehen. Ausserdem diskutieren wir mögliche Erweiterungen die diese Defizite beheben können. Im speziellen sind hier die Möglichkeit von Materie in nichtlinearen Darstellungen der globalen Symmetriegruppe und zusätzliche diskrete Symmetrien zu erwähnen.