Wie das Higgs unser Bild von Elementarteilchen ändert

Axel Maas

INSTITUT FÜR PHYSIK

NAWI Graz
Natural Sciences

UNI GRAZ

@axelmaas

Inhalt

- Das Standardmodell der Teilchenphysik
- Das Higgs

Inhalt

- Das Standardmodell der Teilchenphysik
- Das Higgs
- Was kann man überhaupt beobachten?
  - Symmetrien

Inhalt

- Das Standardmodell der Teilchenphysik
- Das Higgs
- Was kann man überhaupt beobachten?
  - Symmetrien
- Ein neuer Blick auf das Higgs (und den Rest)

Inhalt

- Das Standardmodell der Teilchenphysik
- Das Higgs
- Was kann man überhaupt beobachten?
  - Symmetrien
- Ein neuer Blick auf das Higgs (und den Rest)
- Theoretische und experimentelle Tests

Was ist ein Higgs?

Das Standardmodell der Teilchenphysik

Was ist ein Higgs?

Das Standardmodell der Teilchenphysik

-

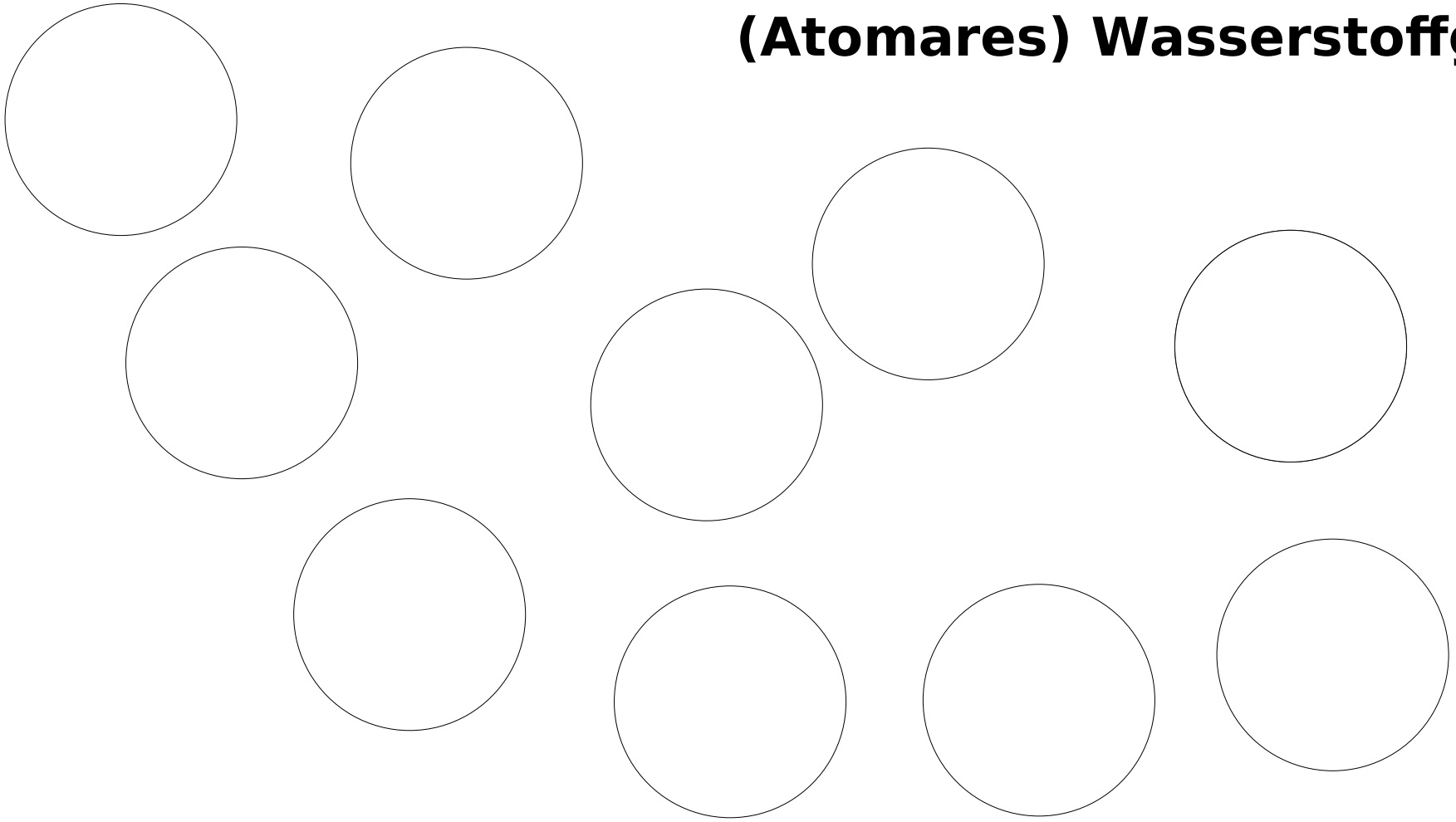
Das ursprüngliche Bild

Die Struktur der Materie

- Gewöhnliche Materie besteht aus Atomen
  - Die Moleküle, Kristalle, Zellen...bilden

Die Struktur der Materie

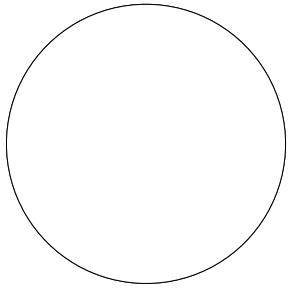
(Atomares) Wasserstoffgas



- Gewöhnliche Materie besteht aus Atomen
  - Die Moleküle, Kristalle, Zellen...bilden

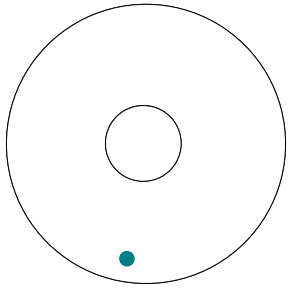
Die Struktur der Materie

Wasserstoffatom



Die Struktur der Materie

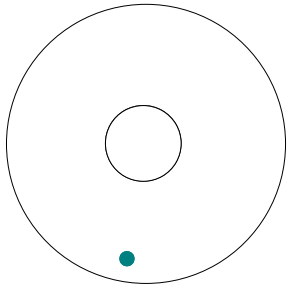
Wasserstoffatom



- Ein Atom ist ein Bindungszustand eines Elektrons und eines Kernes
  - Abgeleitet aus Streuexperimenten

Die Struktur der Materie

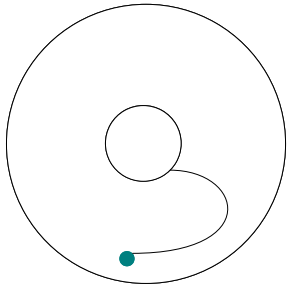
Wasserstoffatom



- Ein Atom ist ein Bindungszustand eines Elektrons und eines Kernes
  - Abgeleitet aus Streuexperimenten
  - Kern ist 100000-mal kleiner als das Atom

Die Struktur der Materie

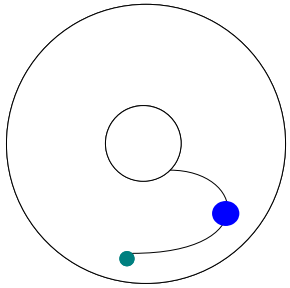
Wasserstoffatom



- Ein Atom ist ein Bindungszustand eines Elektrons und eines Kernes
  - Abgeleitet aus Streuexperimenten
  - Kern ist 100000-mal kleiner als das Atom
- Zusammenhalt durch elektromagnetische Kräfte

Die Struktur der Materie

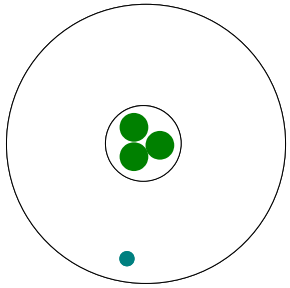
Wasserstoffatom



- Ein Atom ist ein Bindungszustand eines Elektrons und eines Kernes
  - Abgeleitet aus Streuexperimenten
  - Kern ist 100000-mal kleiner als das Atom
- Zusammenhalt durch elektromagnetische Kräfte
  - Wirken durch den Austausch von Photonen

Die Struktur der Materie

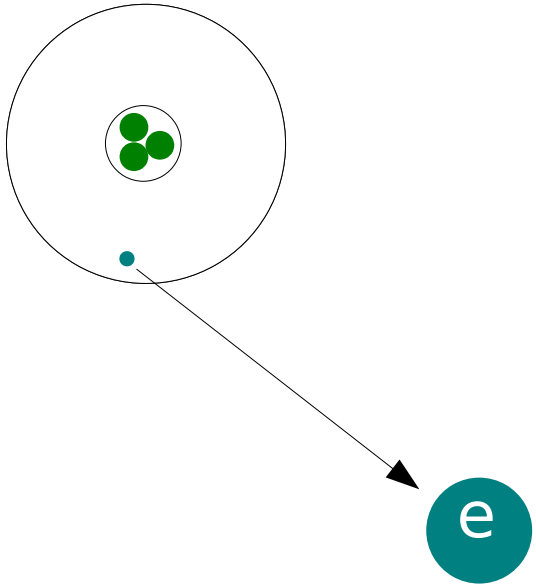
Wasserstoffatom



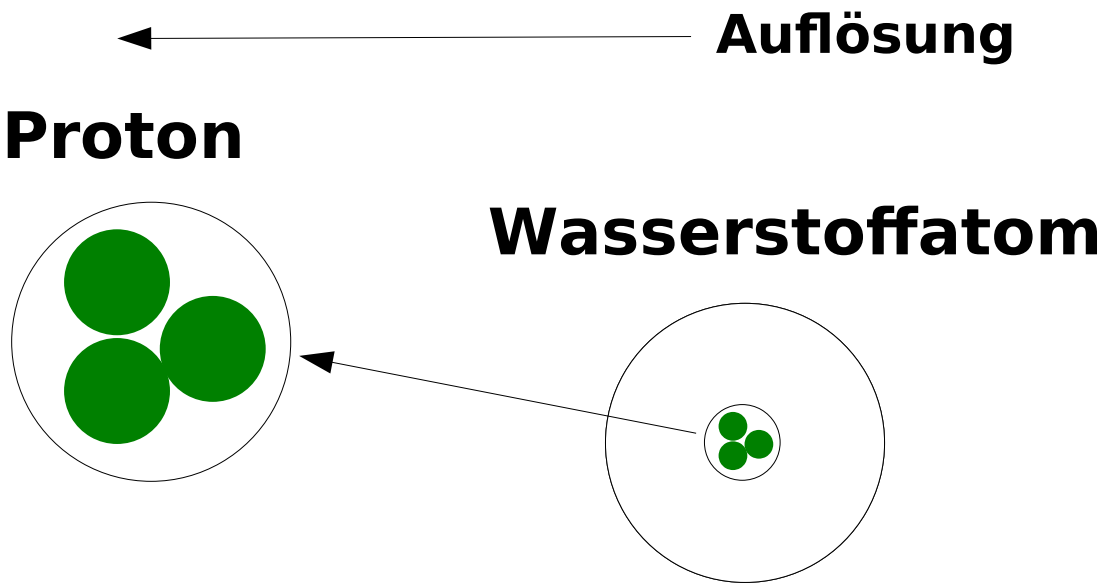
- Streuexperimente am Kern zeigen ein ähnliches Bild wie beim Atom selbst
  - Der Kern muss auch eine Struktur haben

Die Struktur der Materie

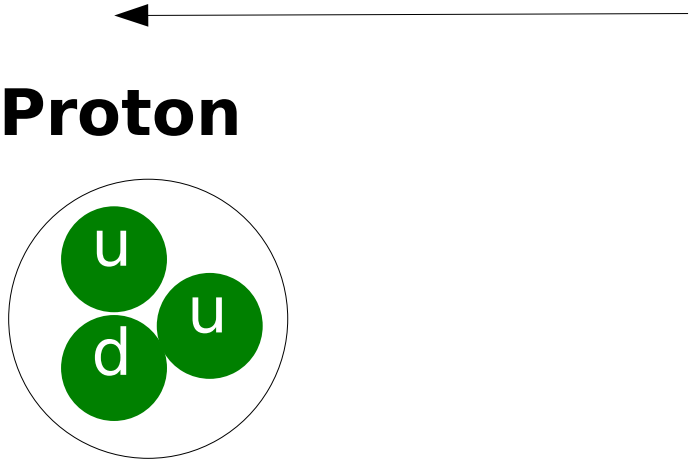
Wasserstoffatom



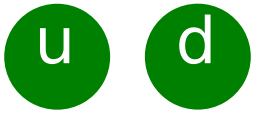
Die Struktur der Materie



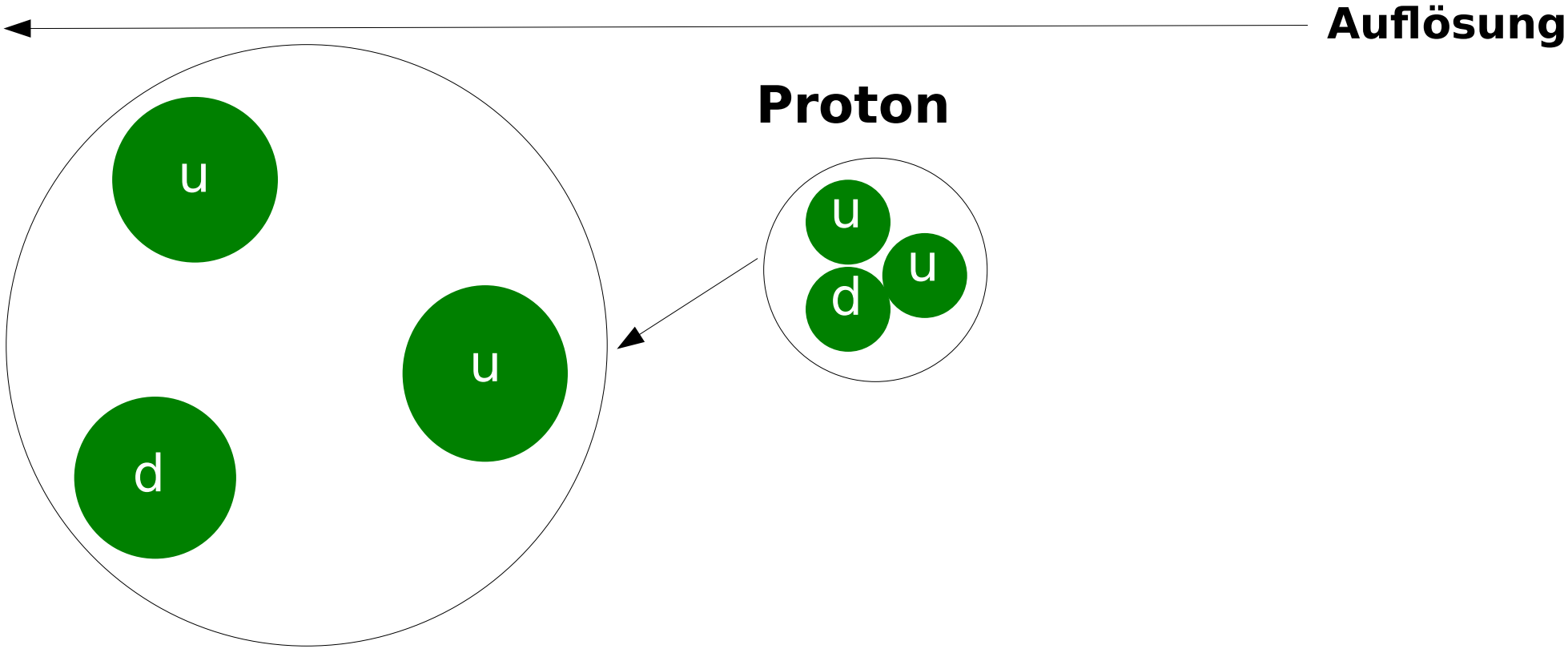
Die Struktur der Materie



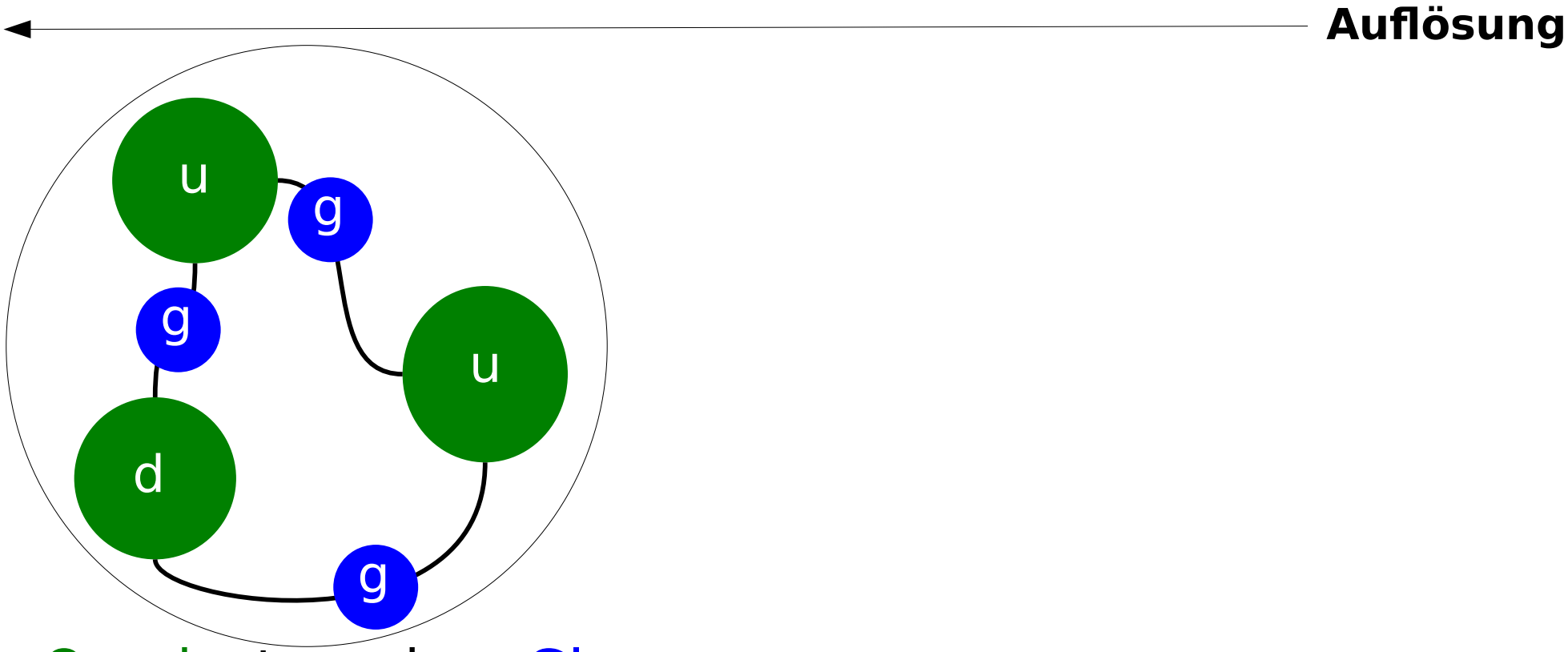
- Proton besteht aus drei Teilchen: Ein Hadron
  - Drei Quarks
  - Zwei Arten: up und down quarks



Die Struktur der Materie

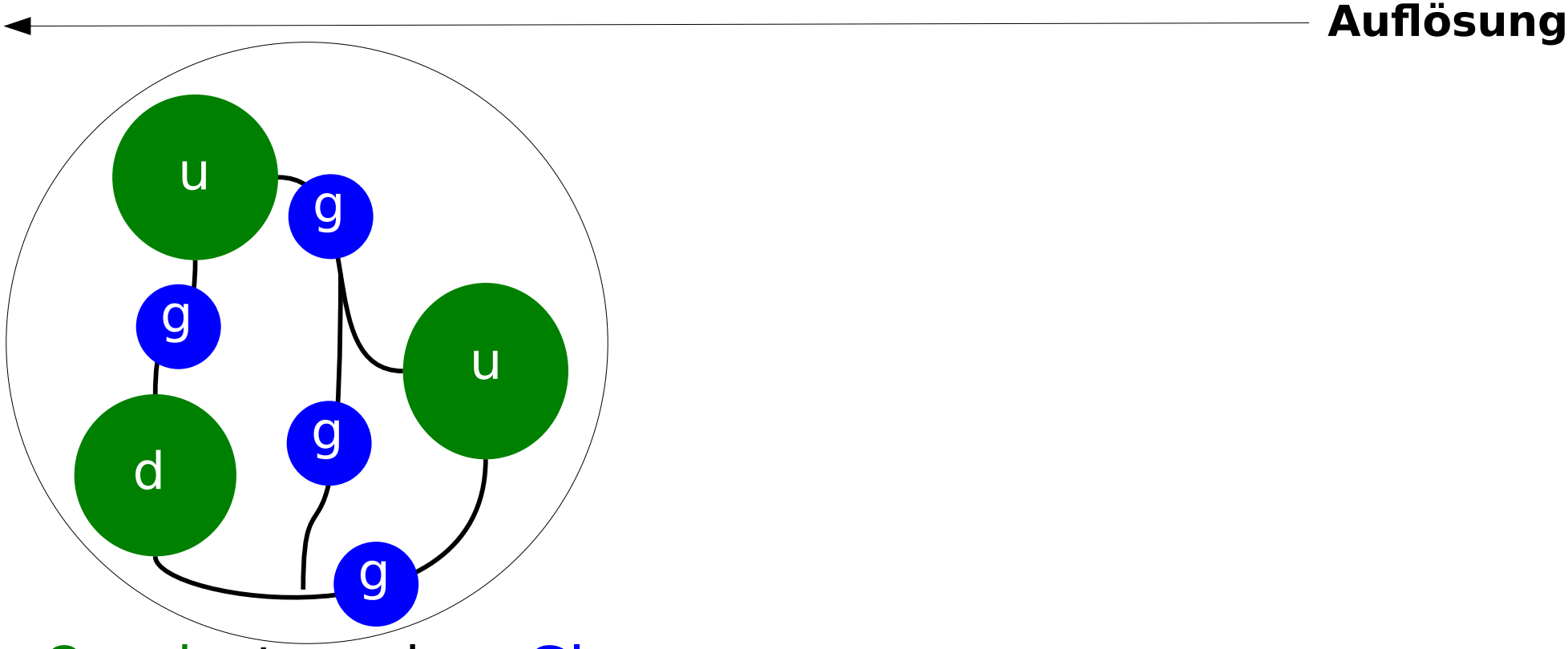


Die Struktur der Materie



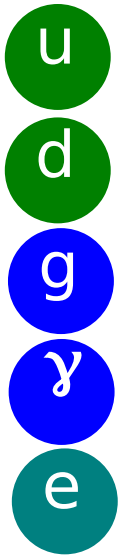
- Quarks tauschen Gluonen aus
  - Masselose Teilchen, wie Photonen
  - Übertragen eine neue Kraft, wie Photonen die elektromagnetische tragen
  - Kraft ist viel stärker: Starke (Kern)kraft

Die Struktur der Materie



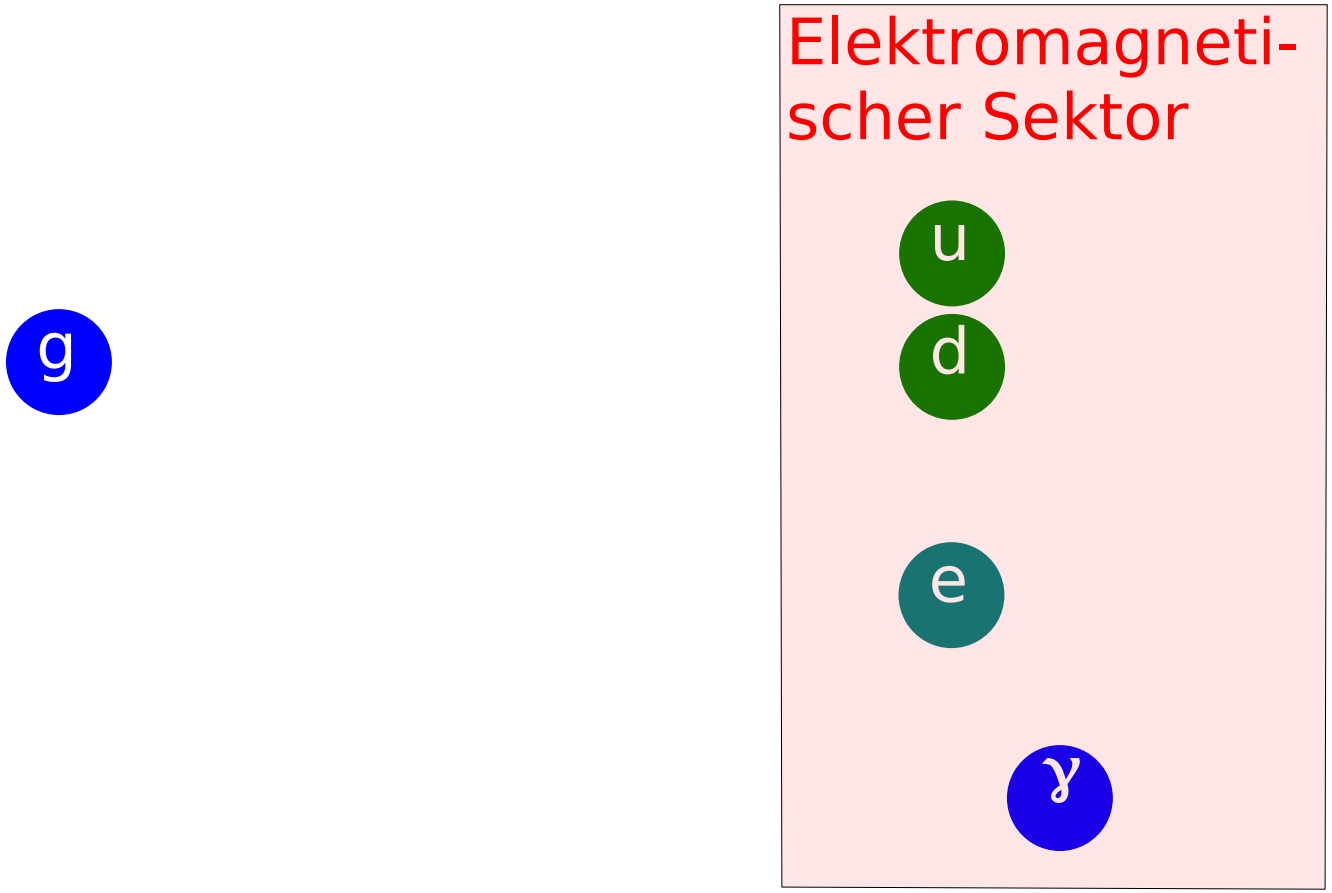
- Quarks tauschen Gluonen aus
  - Masselose Teilchen, wie Photonen
  - Übertragen eine neue Kraft, wie Photonen die elektromagnetische tragen
  - Kraft ist viel stärker: Starke (Kern)kraft
  - Gluonen wechselwirken miteinander – Photonen nicht

Sektoren



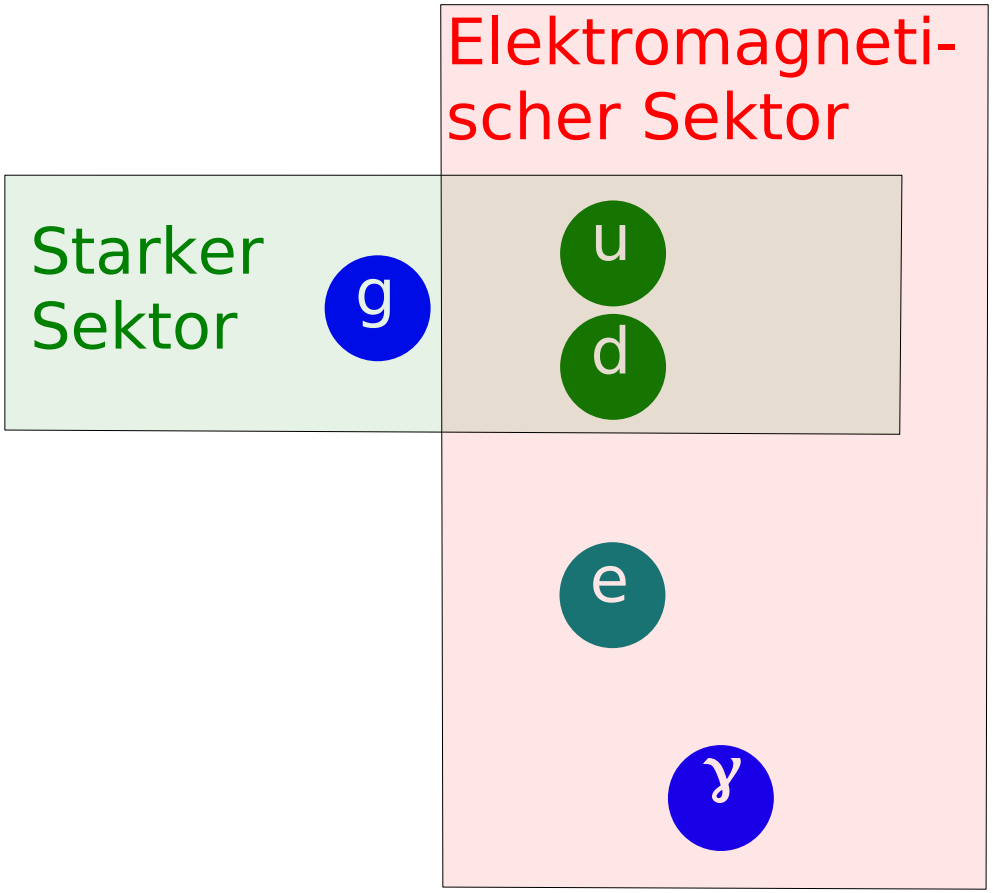
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften

Sektoren



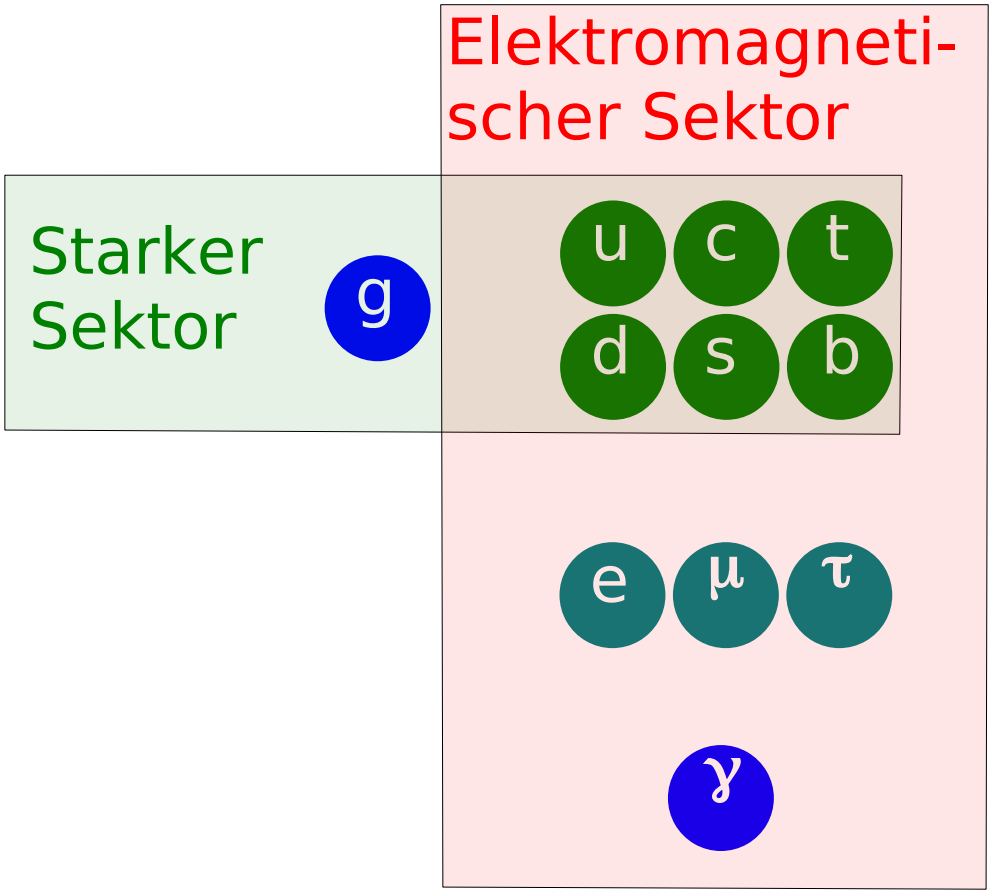
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
  - Elektromagnetische Kräfte (QED)

Sektoren



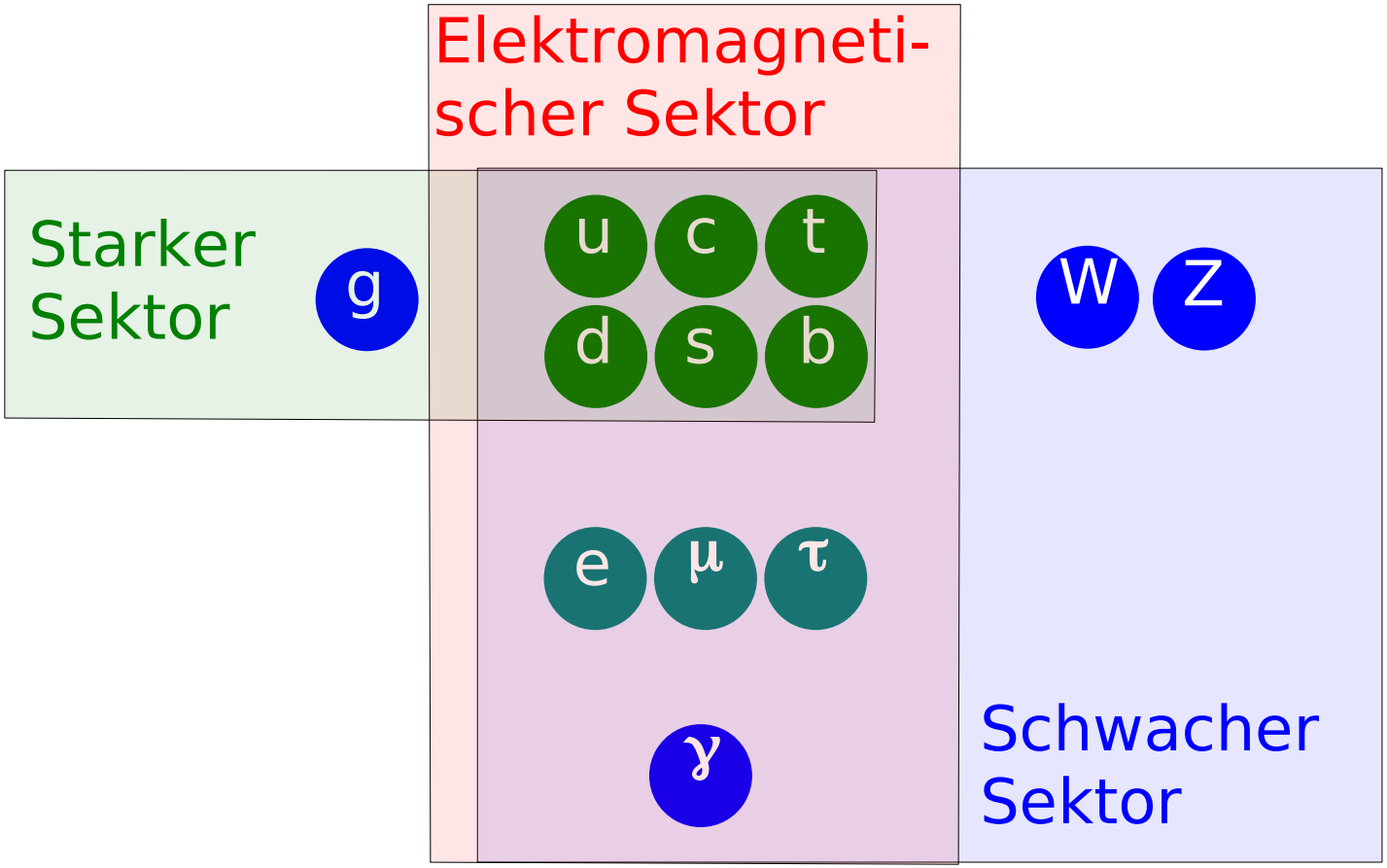
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
  - Elektromagnetische Kräfte (QED)
  - Starke (Kern)kräfte (QCD)

Sektoren



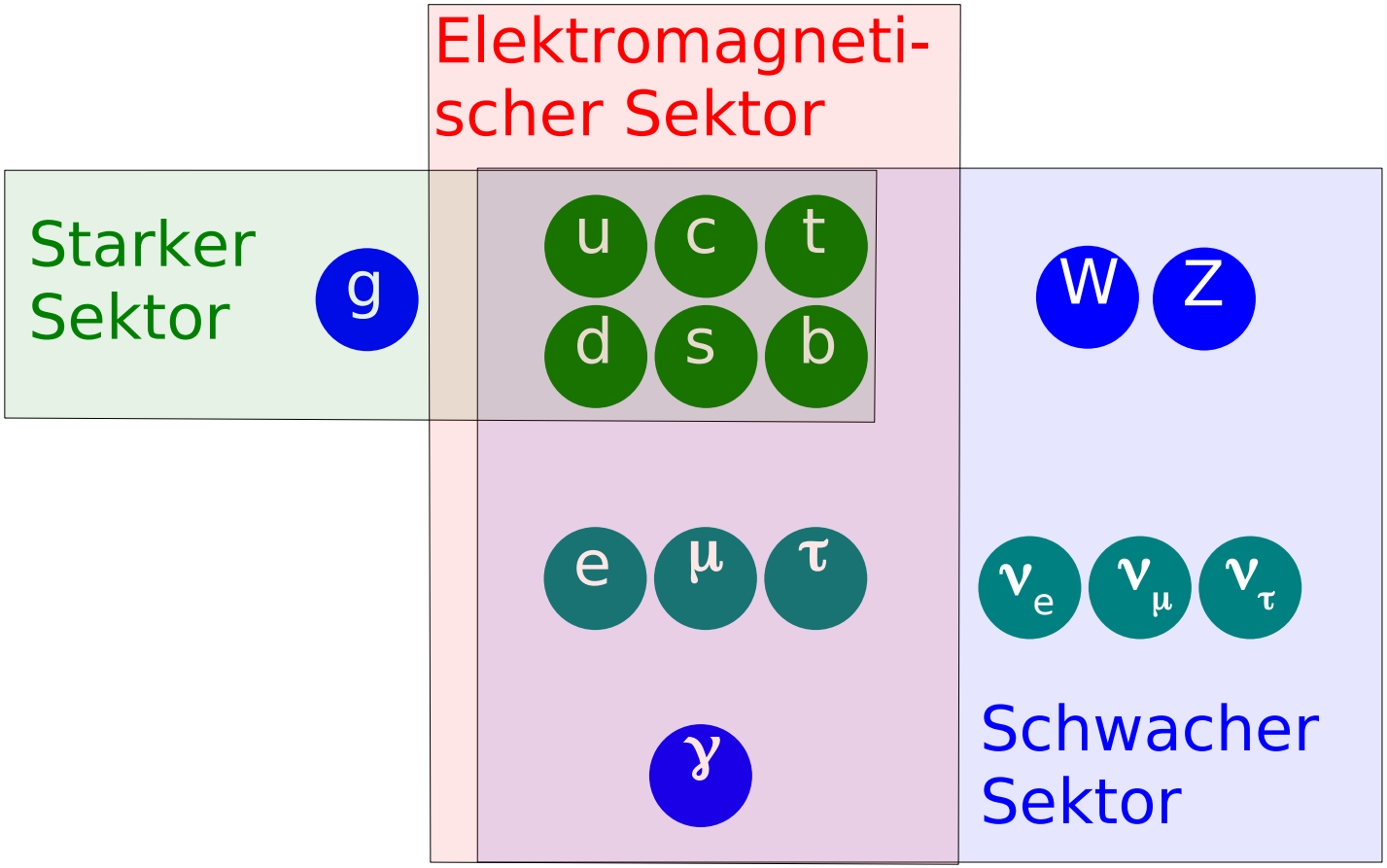
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
  - Elektromagnetische Kräfte (QED)
  - Starke (Kern)kräfte (QCD)

Sektoren



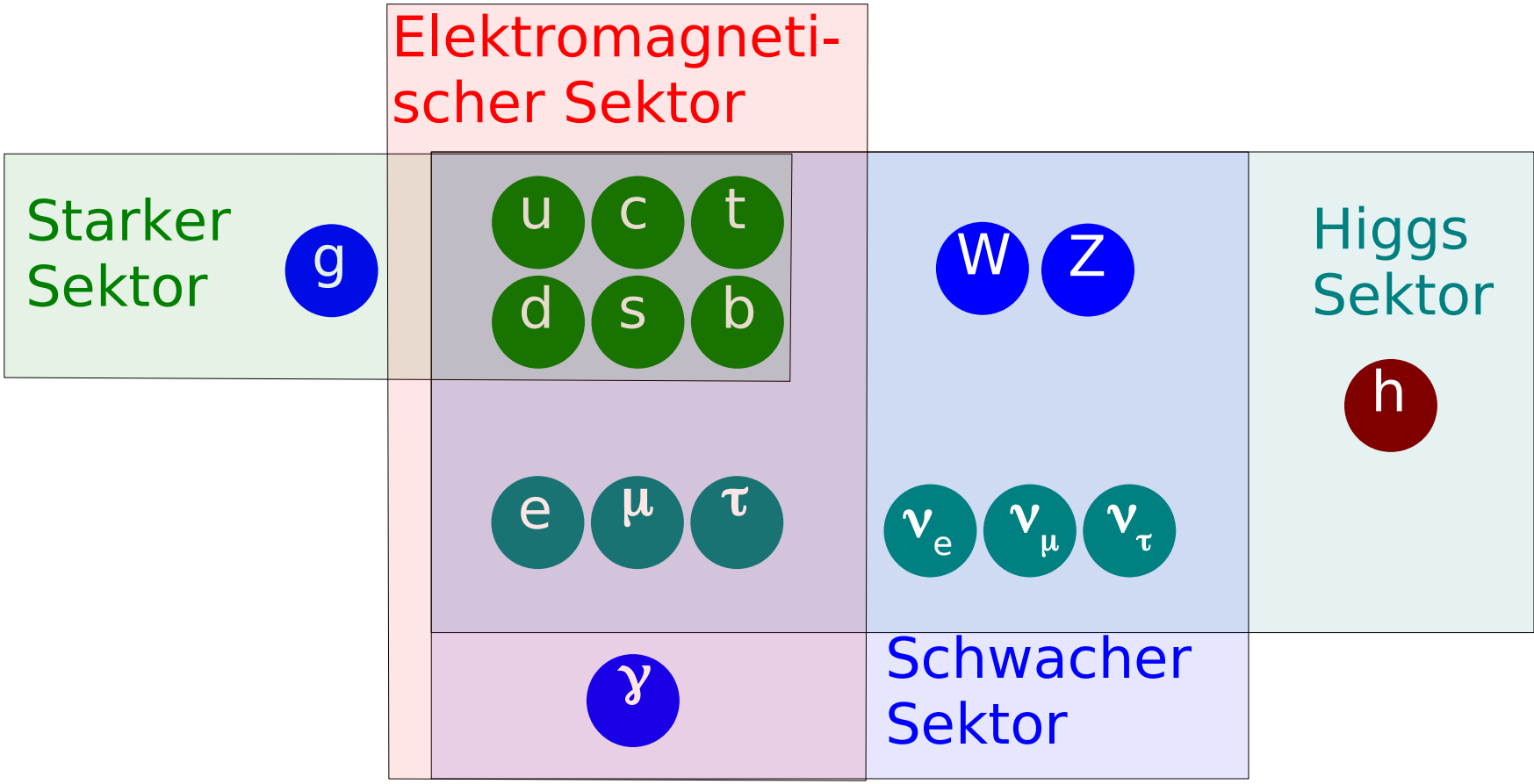
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
  - Elektromagnetische Kräfte (QED)
  - Starke (Kern)kräfte (QCD)
  - Schwache (Kern)kräfte

Sektoren



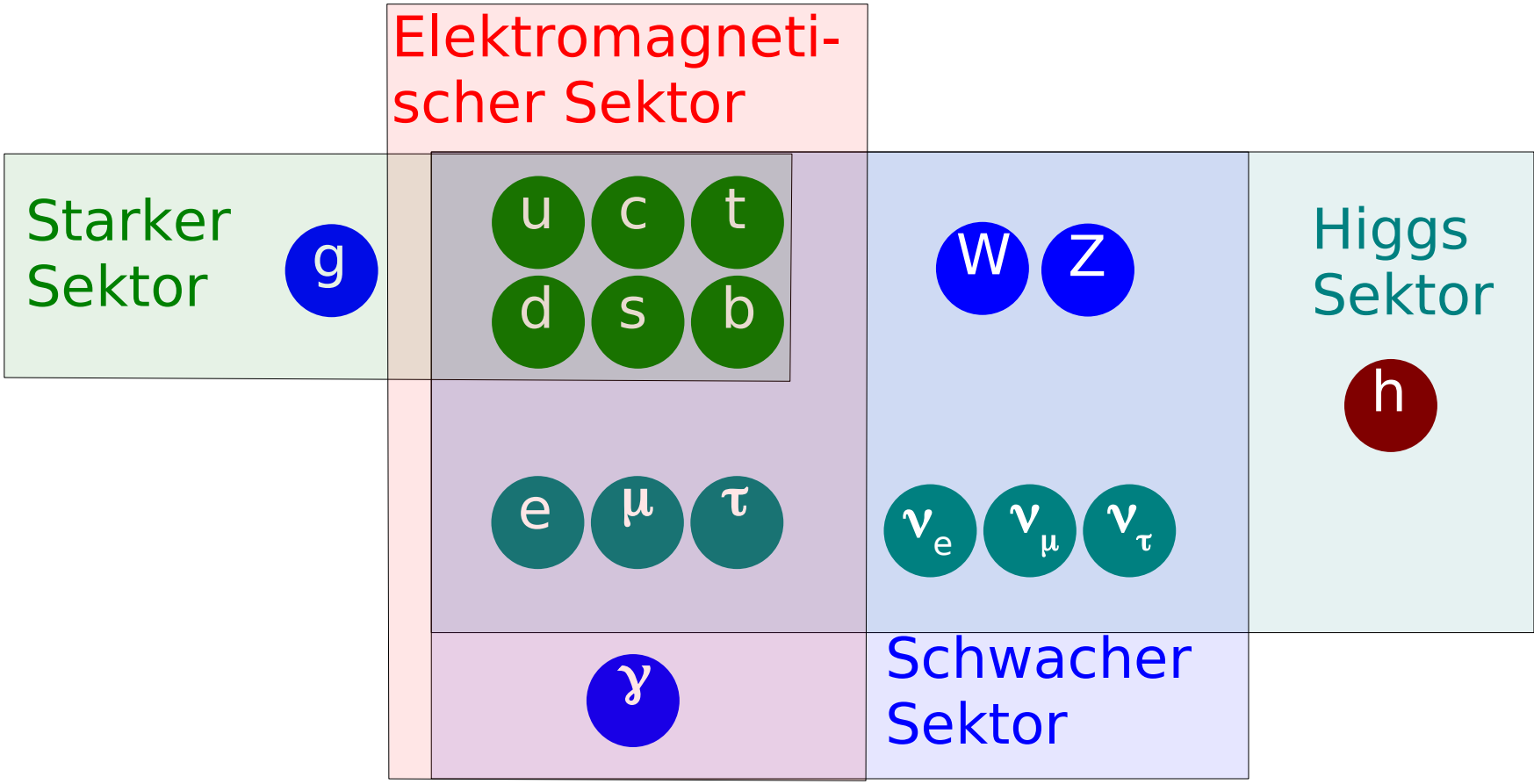
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
  - Elektromagnetische Kräfte (QED)
  - Starke (Kern)kräfte (QCD)
  - Schwache (Kern)kräfte

Sektoren



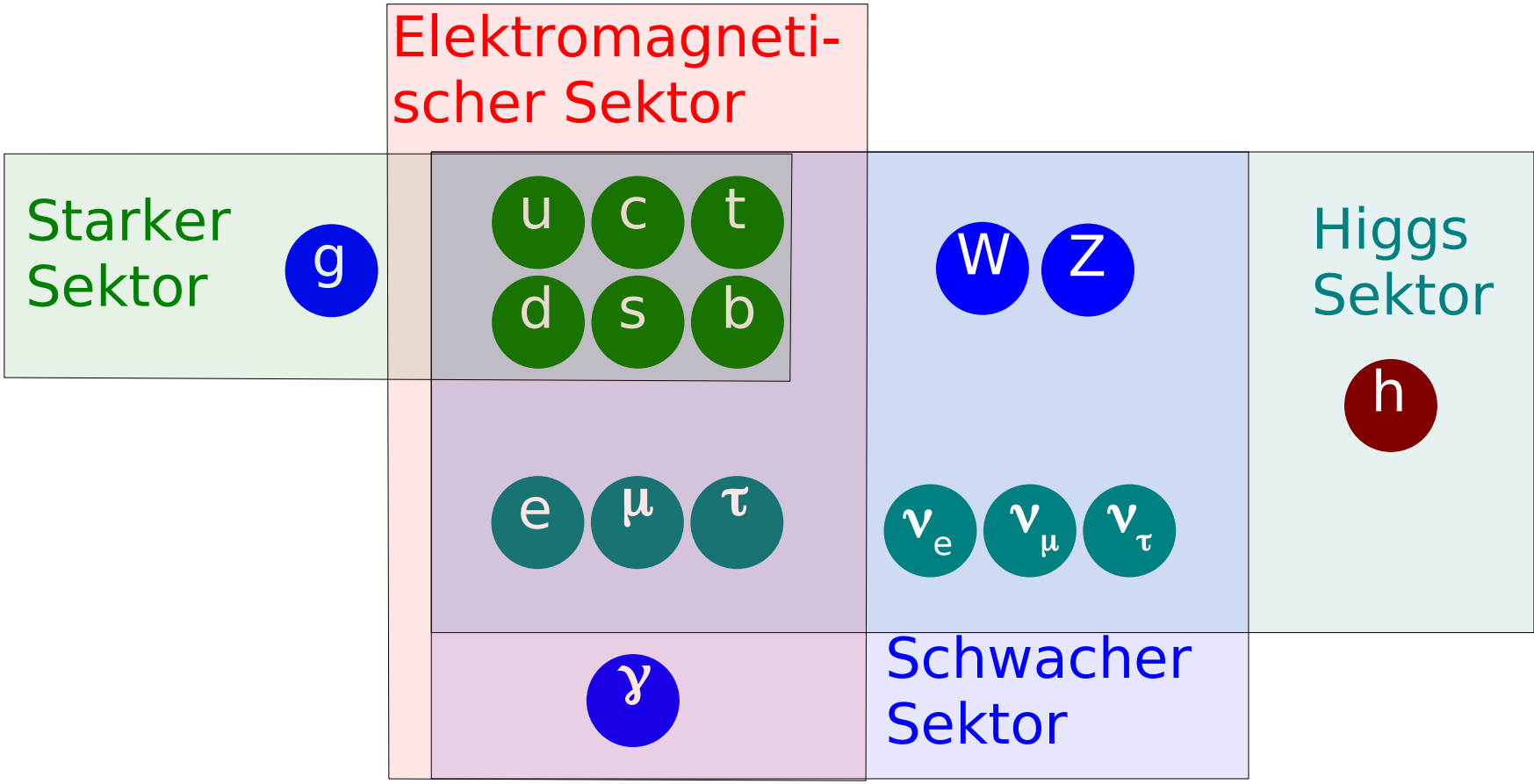
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
  - Elektromagnetische Kräfte (QED)
  - Starke (Kern)kräfte (QCD)
  - Schwache (Kern)kräfte
  - Higgs

Sektoren



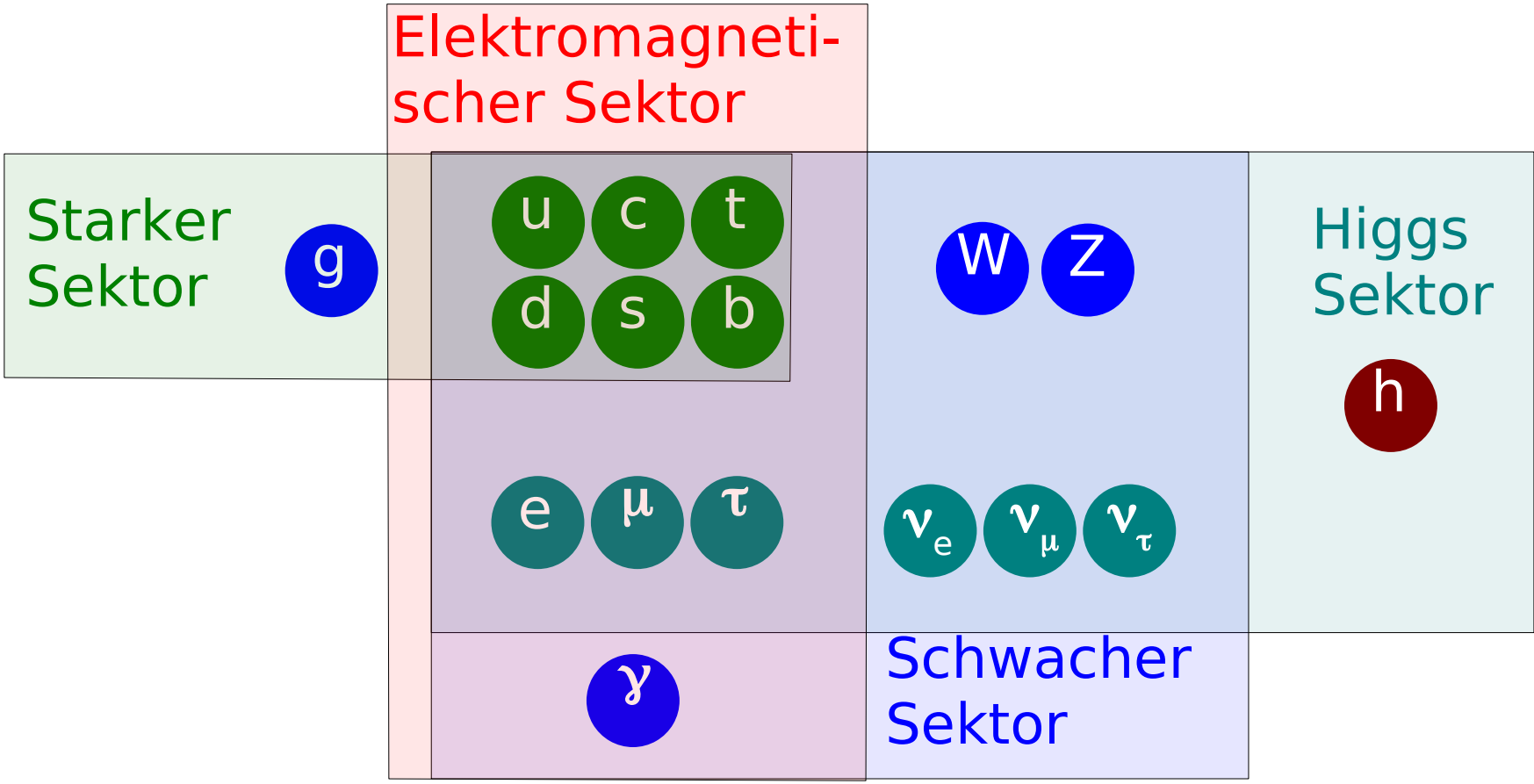
- Gruppierung der Teilchen nach Kräften
  - Elektromagnetische Kräfte (QED)
  - Starke (Kern)kräfte (QCD)
  - Schwache (Kern)kräfte
  - Higgs – tatsächlich eine Gruppe von Kräften

Sektoren



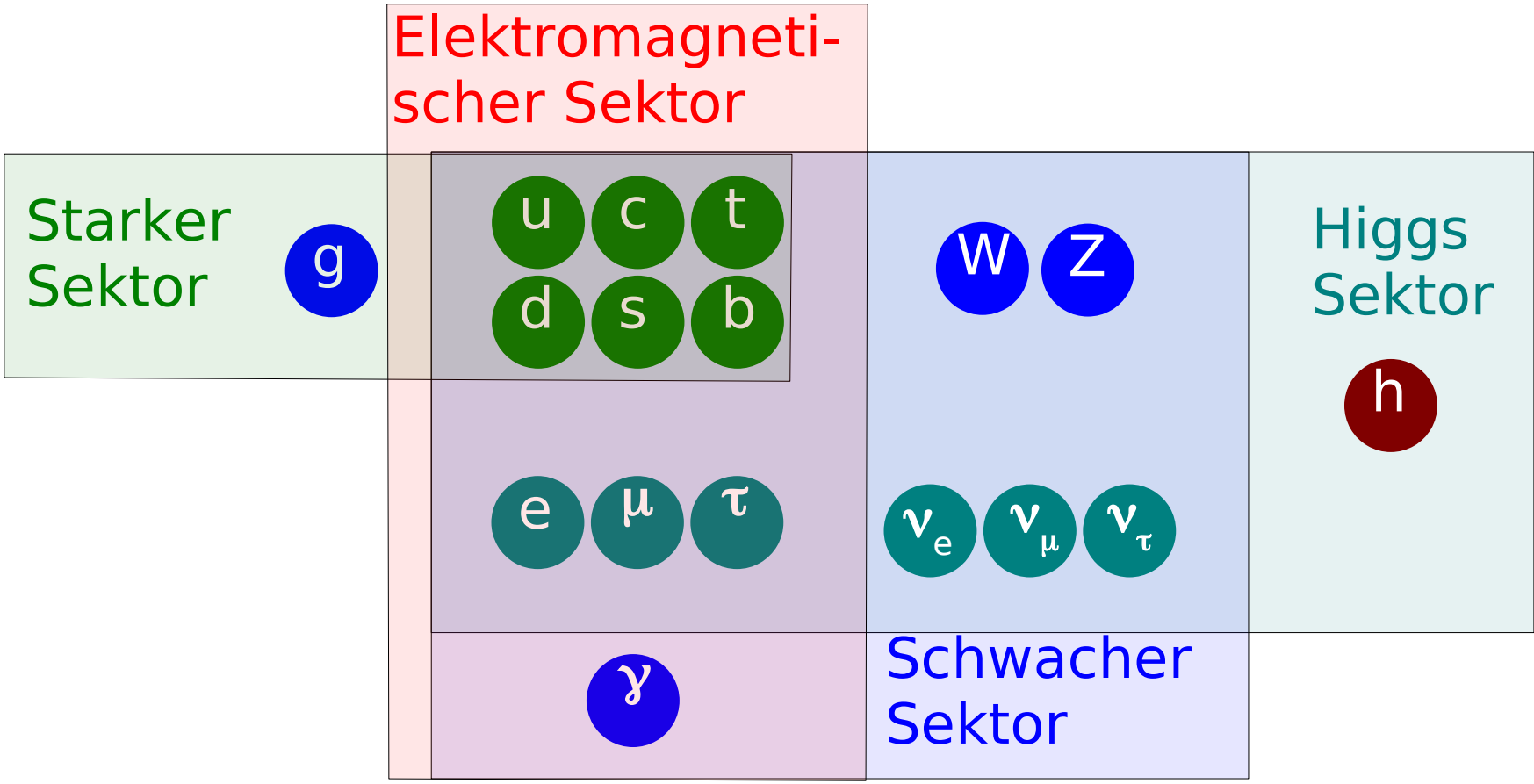
- Standardmodell der Teilchenphysik

Sektoren



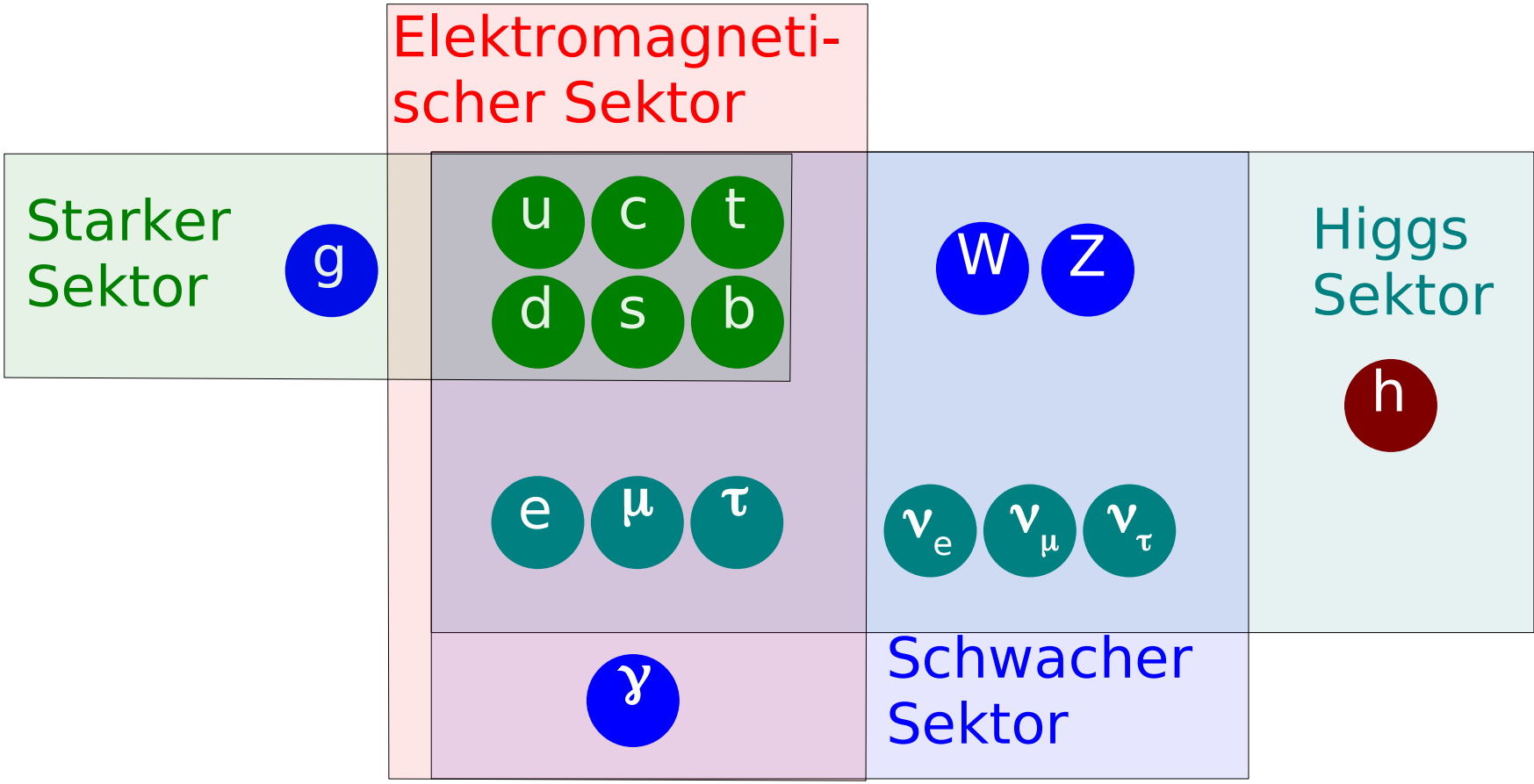
- Standardmodell der Teilchenphysik
- Gravitation/allgemeine Relativitätstheorie davon getrennt

Sektoren



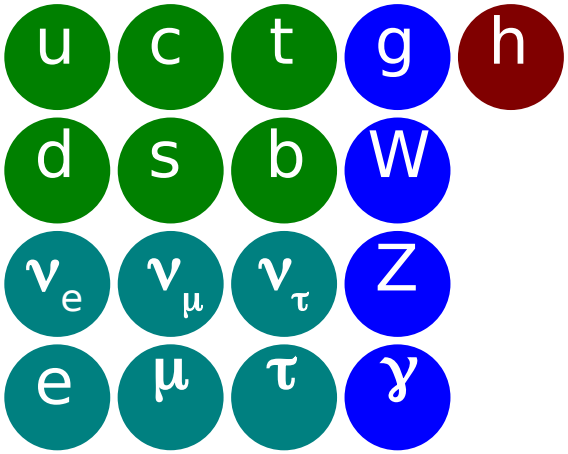
- Standardmodell der Teilchenphysik
- Gravitation/allgemeine Relativitätstheorie davon getrennt
    - Wahrscheinlich nur ein technisches Problem...

Sektoren



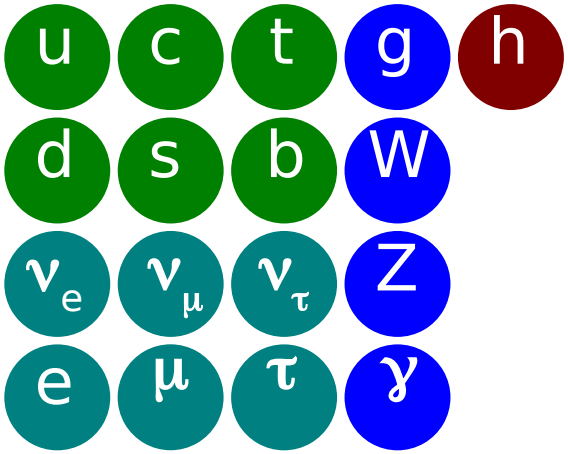
- Standardmodell der Teilchenphysik
- Gravitation/allgemeine Relativitätstheorie davon getrennt
  - Wahrscheinlich nur ein technisches Problem...
  - ...könnte aber auch fundamental anders sein

Standardmodell der Teilchenphysik



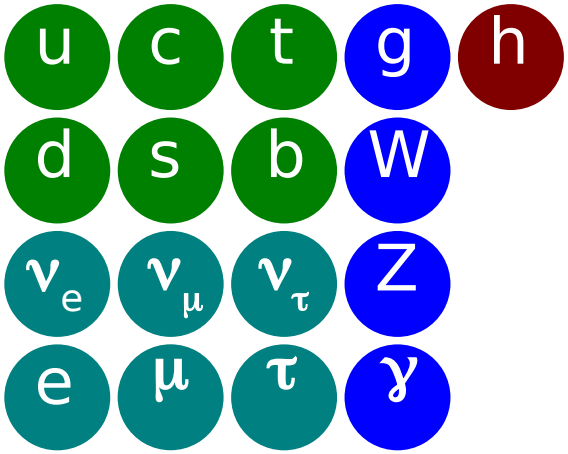
Standardmodell der Teilchenphysik

- Enthält zwei Sorten Teilchen

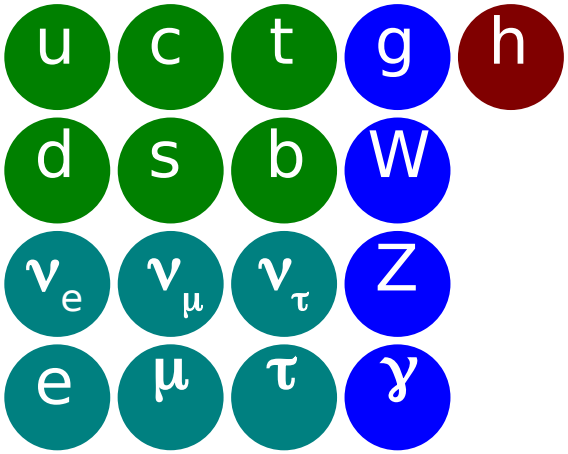


Standardmodell der Teilchenphysik

- Enthält zwei Sorten Teilchen
- Materie
    - 6 Sorten (Flavors) Quarks
    - 6 Sorten (Flavors) Leptonen

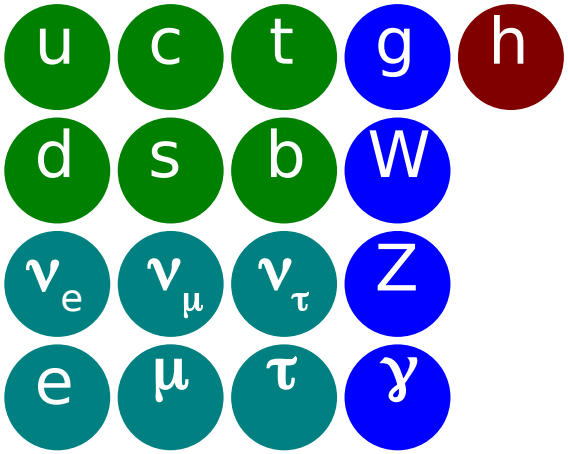


Standardmodell der Teilchenphysik



- Enthält zwei Sorten Teilchen
- Materie
    - 6 Sorten (Flavors) Quarks
    - 6 Sorten (Flavors) Leptonen
- Kraftteilchen
    - Photon, gluon, W- und Z-Bosonen

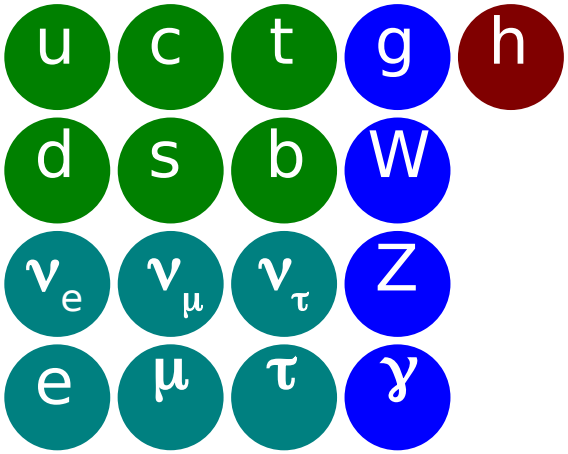
Standardmodell der Teilchenphysik



- Enthält zwei Sorten Teilchen
- Materie
  - 6 Sorten (Flavors) Quarks
  - 6 Sorten (Flavors) Leptonen
- Kraftteilchen
  - Photon, gluon, W- und Z-Bosonen
- Higgs ist ein bißchen von beidem

Standardmodell der Teilchenphysik

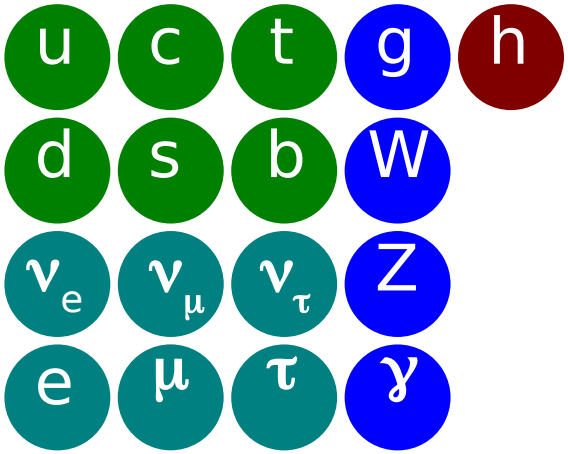
- Beschreibt alle etablierten Resultate an erdgebundenden Experimenten hervorragend



- Enthält zwei Sorten Teilchen
- Materie
  - 6 Sorten (Flavors) Quarks
  - 6 Sorten (Flavors) Leptonen
- Kraftteilchen
  - Photon, gluon, W- und Z-Bosonen
- Higgs ist ein bißchen von beidem

Die Eigenschaften der Teilchen

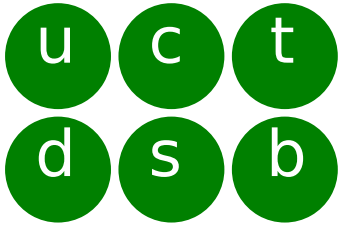
- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

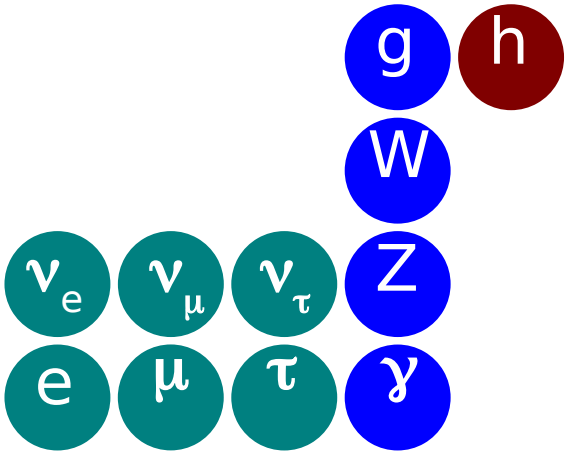


Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen





Massen relativ zu H:
Up: 0.3%
Down: 0.5%
Strange: 10%
Charm: 130%
Bottom: 420%
Top: 17500%

Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen

u c t
d s b

Massen relativ zu H:
Up: 0.3%
Down: 0.5%
Strange: 10%
Charm: 130%
Bottom: 420%
Top: 17500%

Leptonen: Fermionen

ν_e ν_μ ν_τ
e μ τ

Massen relativ zu H:
Elektron: 0.05%
Muon: 10%
Tauon: 180%
Neutrinos:
Massen < 0.0000002%
Reihenfolge unbekannt,
Massen unterschiedlich

g h
W
Z
γ

Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen

u c t
d s b

Massen relativ zu H:
Up: 0.3%
Down: 0.5%
Strange: 10%
Charm: 130%
Bottom: 420%
Top: 17500%

Leptonen: Fermionen

ν_e ν_μ ν_τ
e μ τ

Massen relativ zu H:
Elektron: 0.05%
Muon: 10%
Tauon: 180%
Neutrinos:
Massen < 0.0000002%
Reihenfolge unbekannt,
Massen unterschiedlich

g h
W
Z

γ Photon: Masseloses Boson

Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen

u c t
d s b

Massen relativ zu H:
Up: 0.3%
Down: 0.5%
Strange: 10%
Charm: 130%
Bottom: 420%
Top: 17500%

Leptonen: Fermionen

ν_e ν_μ ν_τ
e μ τ

Massen relativ zu H:
Elektron: 0.05%
Muon: 10%
Tauon: 180%
Neutrinos:
Massen < 0.0000002%
Reihenfolge unbekannt,
Massen unterschiedlich

h
W
Z

γ Photon: Masseloses Boson

g Gluon: Massloses Boson

Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen

u c t
d s b

Leptonen: Fermionen

ν_e ν_μ ν_τ
e μ τ

h

Schwache Bosonen

W Z

Massen relativ zu H:
Up: 0.3%
Down: 0.5%
Strange: 10%
Charm: 130%
Bottom: 420%
Top: 17500%

Massen relativ zu H:
Elektron: 0.05%
Muon: 10%
Tauon: 180%
Neutrinos:
Massen < 0.0000002%
Reihenfolge unbekannt,
Massen unterschiedlich

W: 8000%
Z: 9100%

γ Photon: Masseloses Boson

g Gluon: Massloses Boson

Die Eigenschaften der Teilchen

- Sehr unterschiedliche Eigenschaften

Quarks: Fermionen

u c t
d s b

Massen relativ zu H:
Up: 0.3%
Down: 0.5%
Strange: 10%
Charm: 130%
Bottom: 420%
Top: 17500%

Leptonen: Fermionen

ν_e ν_μ ν_τ
e μ τ

Massen relativ zu H:
Elektron: 0.05%
Muon: 10%
Tauon: 180%
Neutrinos:
Massen < 0.0000002%
Reihenfolge unbekannt,
Massen unterschiedlich

Higgs: Boson

h

12500%

Schwache Bosonen

W Z

W: 8000%
Z: 9100%

γ Photon: Masseloses Boson

g Gluon: Massloses Boson

An den Grenzen des Bekannten

An den Grenzen des Bekannten

- Kosmologische Grenze
  - Wie entstand und entwickelte sich das Universum?

An den Grenzen des Bekannten

- Kosmologische Grenze
  - Wie entstand und entwickelte sich das Universum?
- Dunkle Materie/Dunkle Energie
  - Was sind die unbekannten Teile des Universums?

An den Grenzen des Bekannten

- Kosmologische Grenze
  - Wie entstand und entwickelte sich das Universum?
- Dunkle Materie/Dunkle Energie
  - Was sind die unbekannten Teile des Universums?
- Materie unter extremen Bedingungen
  - Was passiert in Neutronensternen?

An den Grenzen des Bekannten

- Kosmologische Grenze
  - Wie entstand und entwickelte sich das Universum?
- Dunkle Materie/Dunkle Energie
  - Was sind die unbekannten Teile des Universums?
- Materie unter extremen Bedingungen
  - Was passiert in Neutronensternen?
- Kürzeste Distanzen
  - Was ist das Higgs?
  - Was kommt jenseits des Standardmodells?

An den Grenzen des Bekannten

- Kosmologische Grenze
  - Wie entstand und entwickelte sich das Universum?
- Dunkle Materie/Dunkle Energie
  - Was sind die unbekannten Teile des Universums?
- Materie unter extremen Bedingungen
  - Was passiert in Neutronensternen?
- Kürzeste Distanzen
  - Was ist das Higgs?
  - Was kommt jenseits des Standardmodells?
- Höchste Präzision
  - Erzählen uns kleinste Abweichungen über neues?

An den Grenzen des Bekannten

- Kosmologische Grenze
  - Wie entstand und entwickelte sich das Universum?
- Dunkle Materie/Dunkle Energie
  - Was sind die unbekannten Teile des Universums?
- Materie unter extremen Bedingungen
  - Was passiert in Neutronensternen?
- Kürzeste Distanzen
  - Was ist das Higgs?
  - Was kommt jenseits des Standardmodells?
- Höchste Präzision
  - Erzählen uns kleinste Abweichungen über neues?
- ...

An den Grenzen des Bekannten

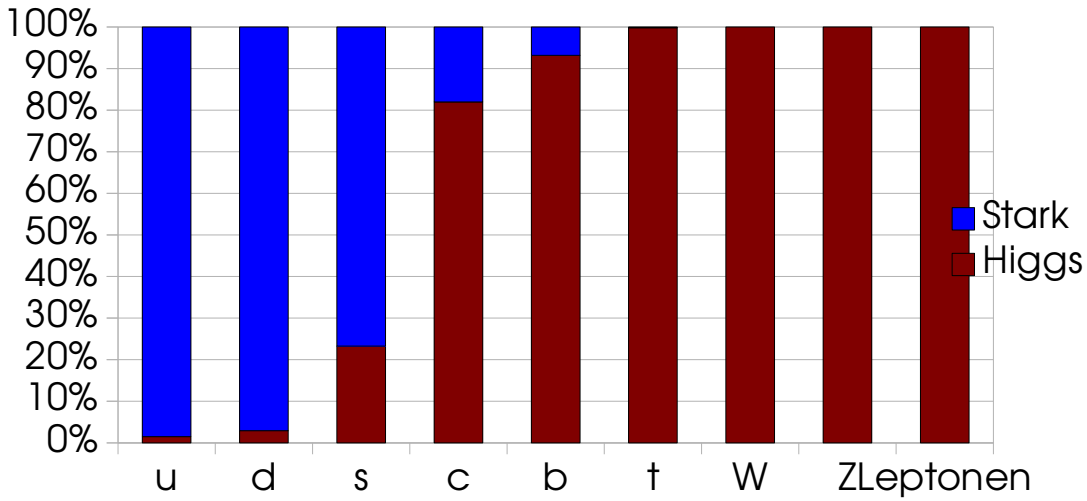
- Kosmologische Grenze
  - Wie entstand und entwickelte sich das Universum?
- Dunkle Materie/Dunkle Energie
  - Was sind die unbekannten Teile des Universums?
- Materie unter extremen Bedingungen
  - Was passiert in Neutronensternen?
- Kürzeste Distanzen
  - Was ist das Higgs?
  - Was kommt jenseits des Standardmodells?
- Höchste Präzision
  - Erzählen uns kleinste Abweichungen über neues?
- ...

Warum ist das Higgs interssant?

Masse

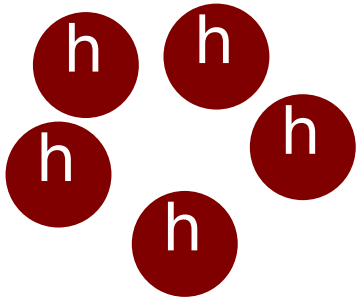
Der Brout-Englert-Higgs Effekt

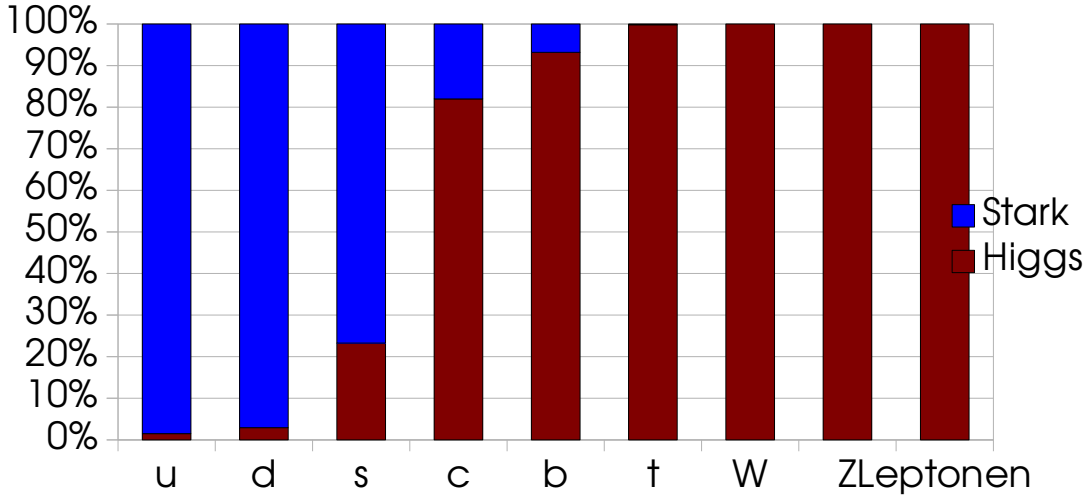
Der Brout-Englert-Higgs Effekt



- Das Higgs erzeugt einen Anteil der Masse
  - Für Quarks Masse auch durch die starke Kraft
    - Überwiegend für ‘gewöhnliche’ Materie
    - Elektron aber wichtiger Sonderfall

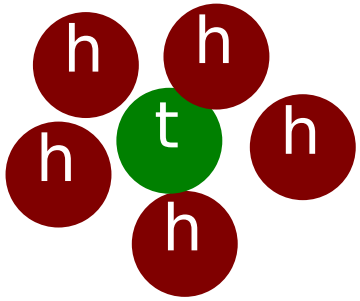
Der Brout-Englert-Higgs Effekt

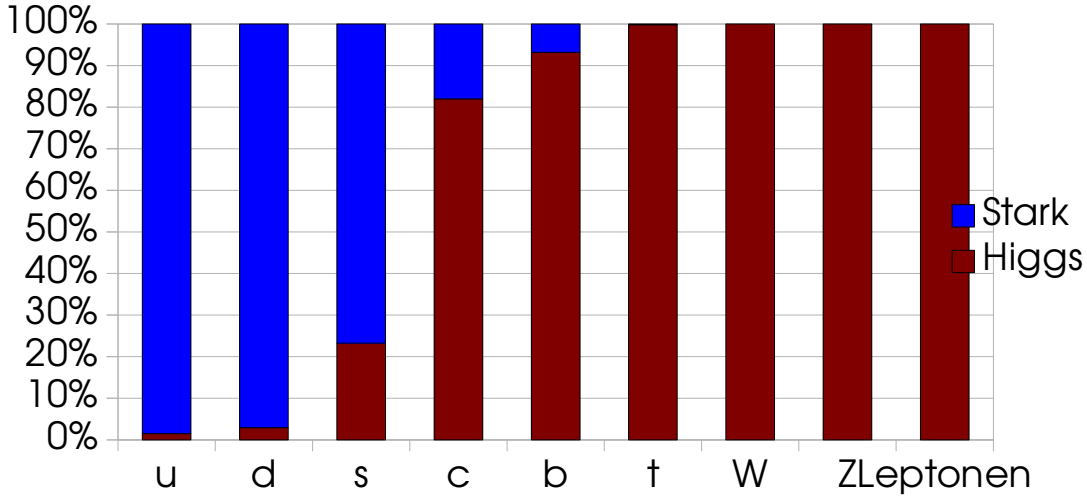




- Das Higgs erzeugt einen Anteil der Masse
  - Für Quarks Masse auch durch die starke Kraft
    - Überwiegend für ‘gewöhnliche’ Materie
    - Elektron aber wichtiger Sonderfall
- Mechanismus: “Higgs kondensiert”

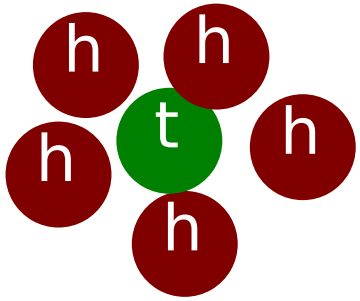
Der Brout-Englert-Higgs Effekt

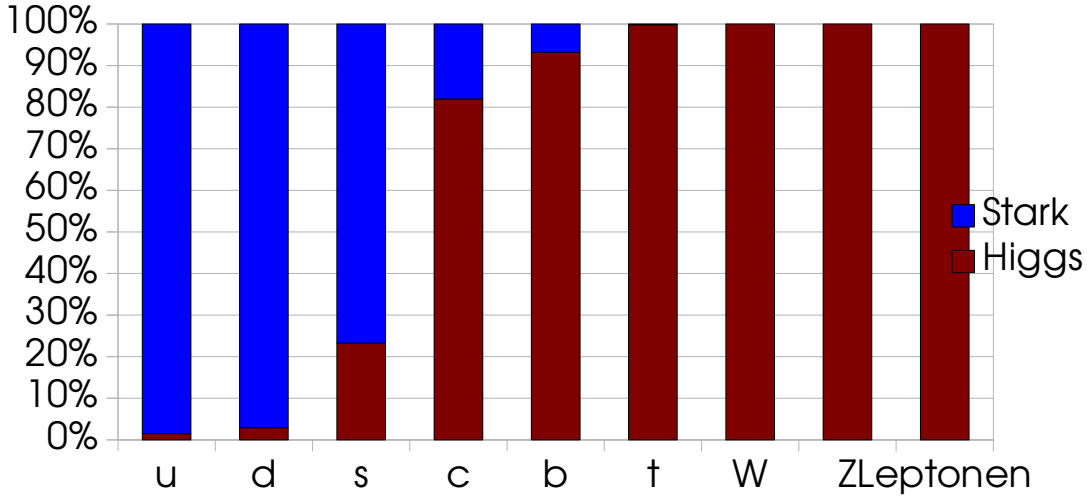




- Das Higgs erzeugt einen Anteil der Masse
  - Für Quarks Masse auch durch die starke Kraft
    - Überwiegend für ‘gewöhnliche’ Materie
    - Elektron aber wichtiger Sonderfall
- Mechanismus: “Higgs kondensiert und das bewegen dadurch verlangsamt Teilchen: Effektiv schwerer”

Der Brout-Englert-Higgs Effekt





- Das Higgs erzeugt einen Anteil der Masse
  - Für Quarks Masse auch durch die starke Kraft
    - Überwiegend für ‘gewöhnliche’ Materie
    - Elektron aber wichtiger Sonderfall
- Mechanismus: “Higgs kondensiert und das bewegen dadurch verlangsamt Teilchen: Effektiv schwerer”
- Higgs das einzige Teilchen mit intrinsischer Masse

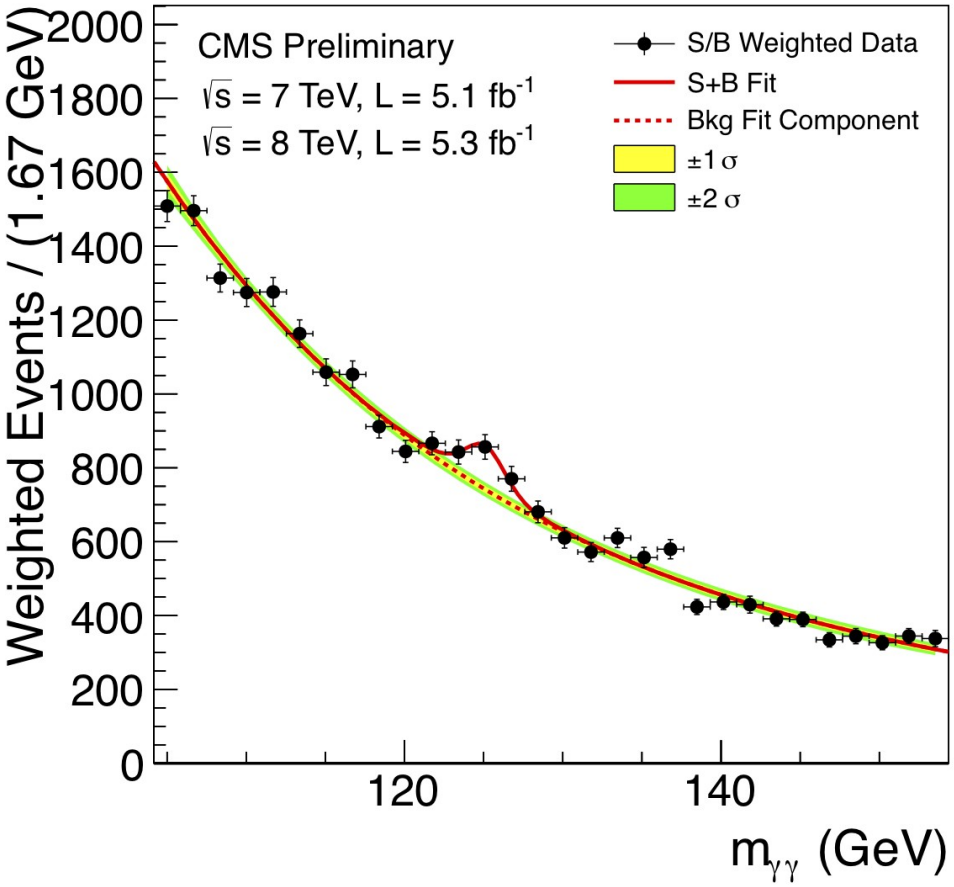
Das Higgs war schwer zu finden

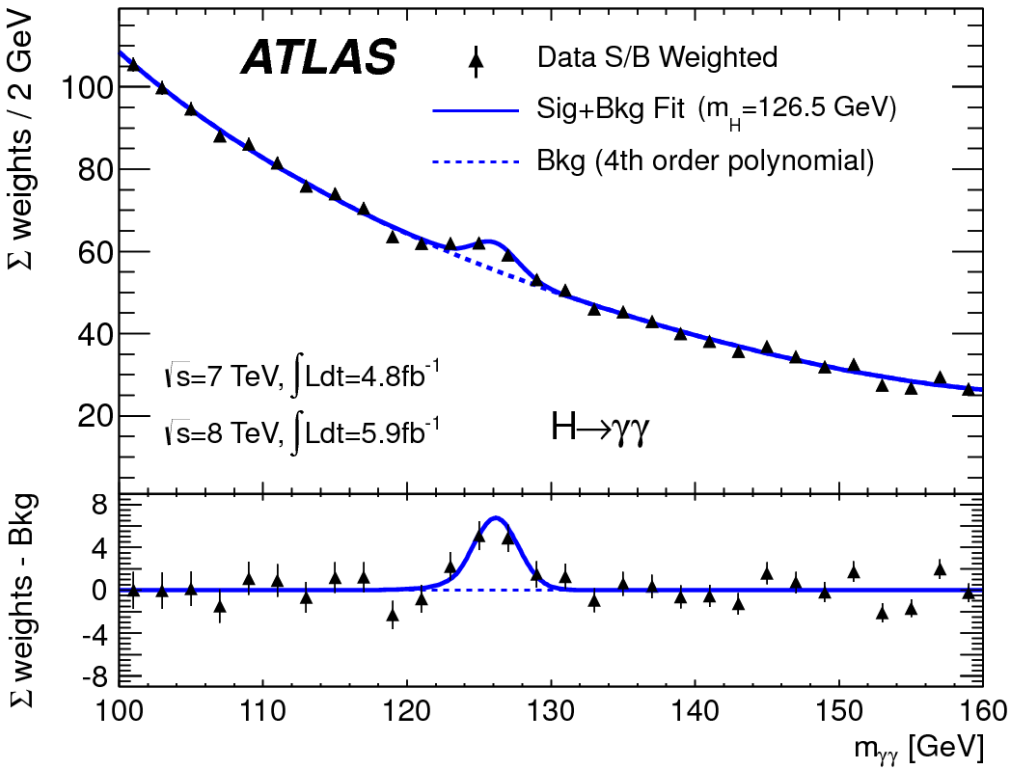
Das Higgs war schwer zu finden

- Higgs reagiert schwach mit leichten (verfügbaren) Teilchen

Das Higgs war schwer zu finden

[ATLAS & CMS, '11+'12 data]

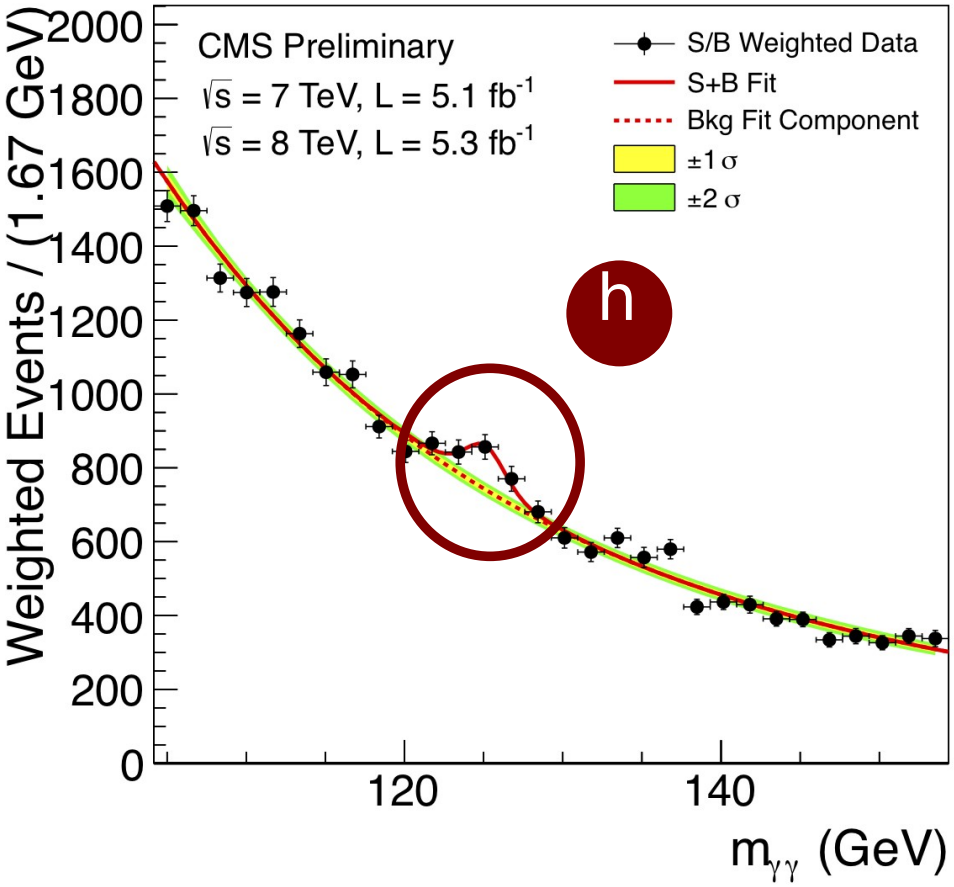


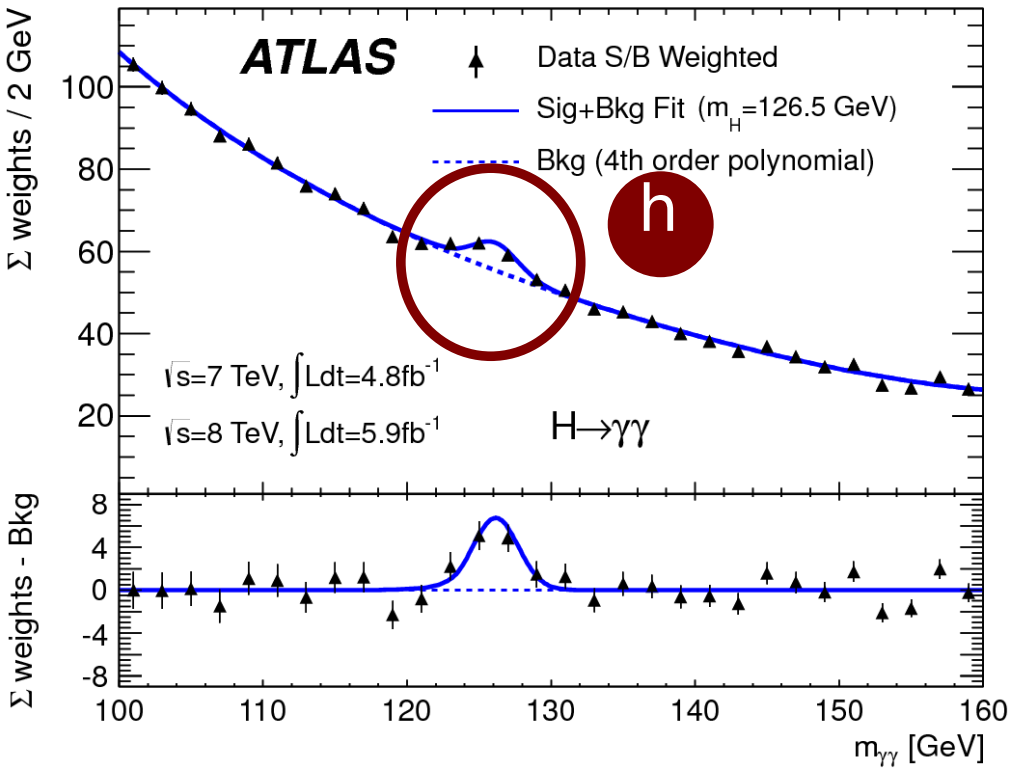


- Higgs reagiert schwach mit leichten (verfügbaren) Teilchen

Das Higgs war schwer zu finden

[ATLAS & CMS, '11+'12 data]

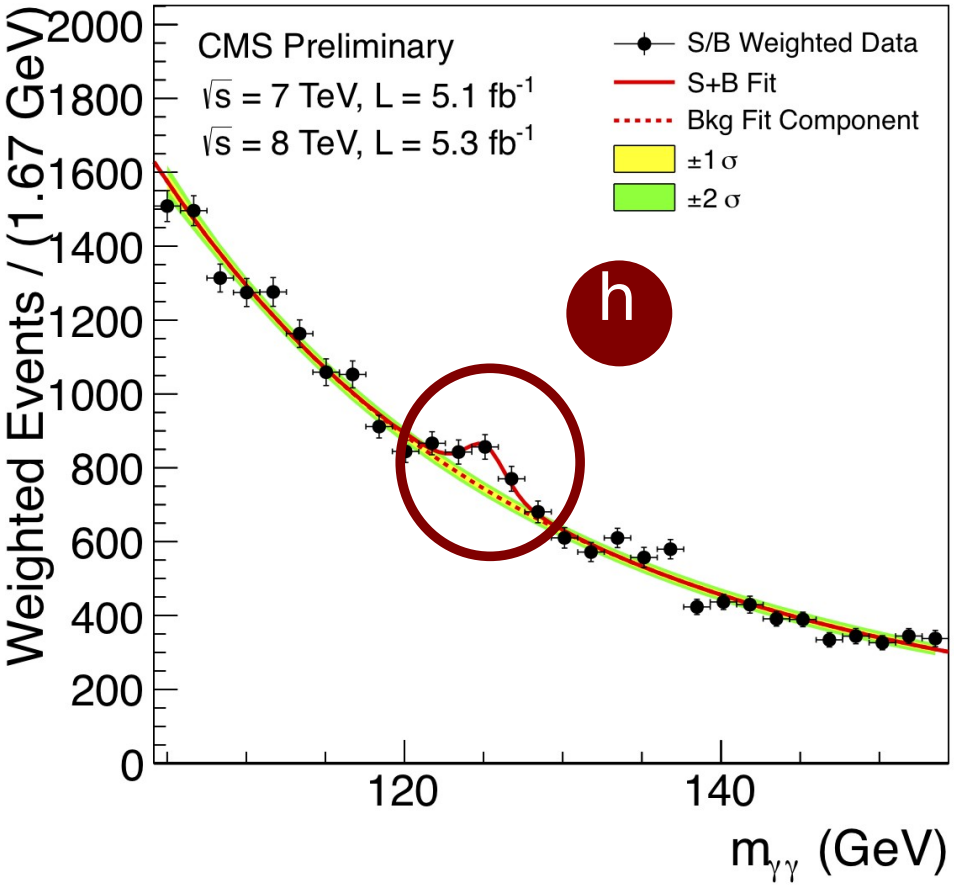


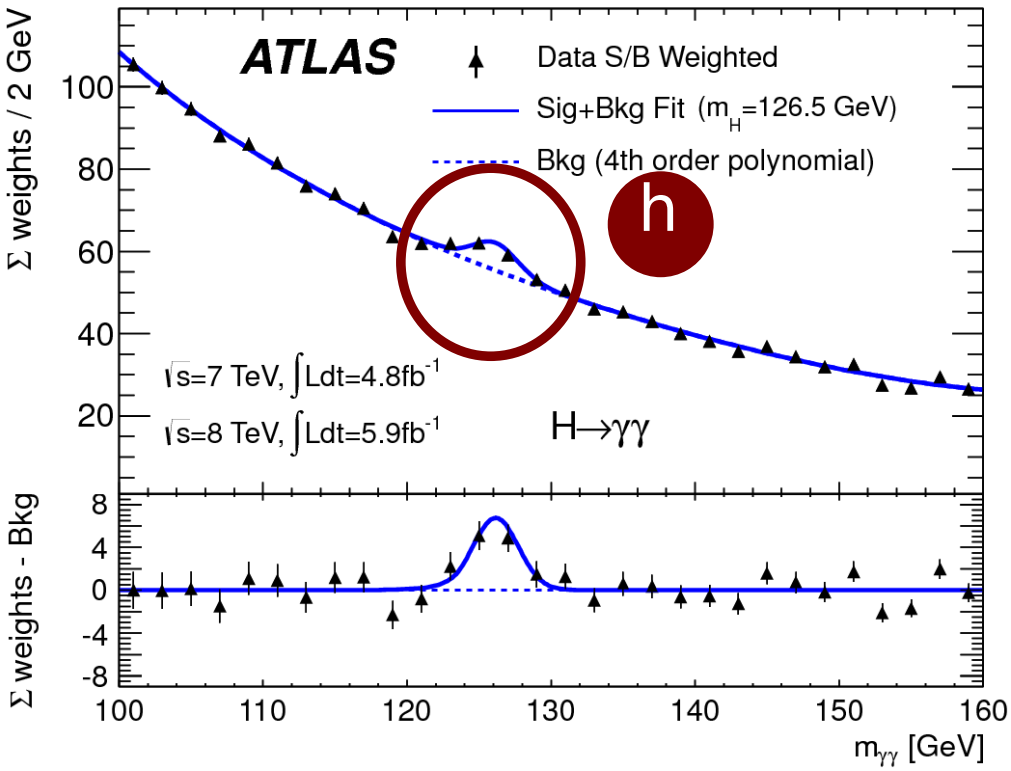


- Higgs reagiert schwach mit leichten (verfügbaren) Teilchen
- LHC und 2 Jahre Datennahme waren notwendig

Das Higgs war schwer zu finden

[ATLAS & CMS, '11+'12 data]





- Higgs reagiert schwach mit leichten (verfügbaren) Teilchen
- LHC und 2 Jahre Datennahme waren notwendig
  - Aber 30 mal mehr Daten bis jetzt
  - Noch 100 mal mehr bis Ende 2030

Fragen an das Standardmodell

- Wieso ist das Higgs genau so schwer?
  - Könnte jede Masse haben

Fragen an das Standardmodell

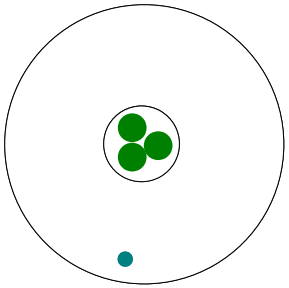
- Wieso ist das Higgs genau so schwer?
  - Könnte jede Masse haben
- Warum wechselwirkt es so?
  - Bestimmt andere Massen: Wieso sind diese so verschieden?

Fragen an das Standardmodell

- Wieso ist das Higgs genau so schwer?
  - Könnte jede Masse haben
- Warum wechselwirkt es so?
  - Bestimmt andere Massen: Wieso sind diese so verschieden?
- Warum der Brout-Englert-Higgs Effekt?
  - Nicht zwingend

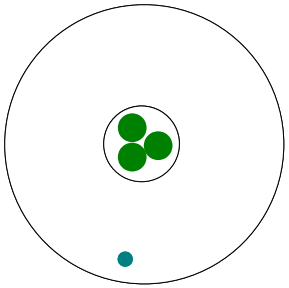
Fragen an das Standardmodell

- Wieso ist das Higgs genau so schwer?
  - Könnte jede Masse haben
- Warum wechselwirkt es so?
  - Bestimmt andere Massen: Wieso sind diese so verschieden?
- Warum der Brout-Englert-Higgs Effekt?
  - Nicht zwingend
- Warum ist das Wasserstoffatom elektrisch neutral?
  - Nur durch mathematische Konsistenz nötig



Fragen an das Standardmodell

- Wieso ist das Higgs genau so schwer?
  - Könnte jede Masse haben
- Warum wechselwirkt es so?
  - Bestimmt andere Massen: Wieso sind diese so verschieden?
- Warum der Brout-Englert-Higgs Effekt?
  - Nicht zwingend
- Warum ist das Wasserstoffatom elektrisch neutral?
  - Nur durch mathematische Konsistenz nötig
- ...



Sind das überhaupt sinnvolle Fragen?

Das ist nicht offensichtlich

Das Higgs – ein Prüfstein

Das Higgs – ein Prüfstein

- Warum beobachten wir überhaupt ein Higgs?

Das Higgs – ein Prüfstein

- Warum beobachten wir überhaupt ein Higgs?
  - Vom Standpunkt der Theorie ist das nicht offensichtlich

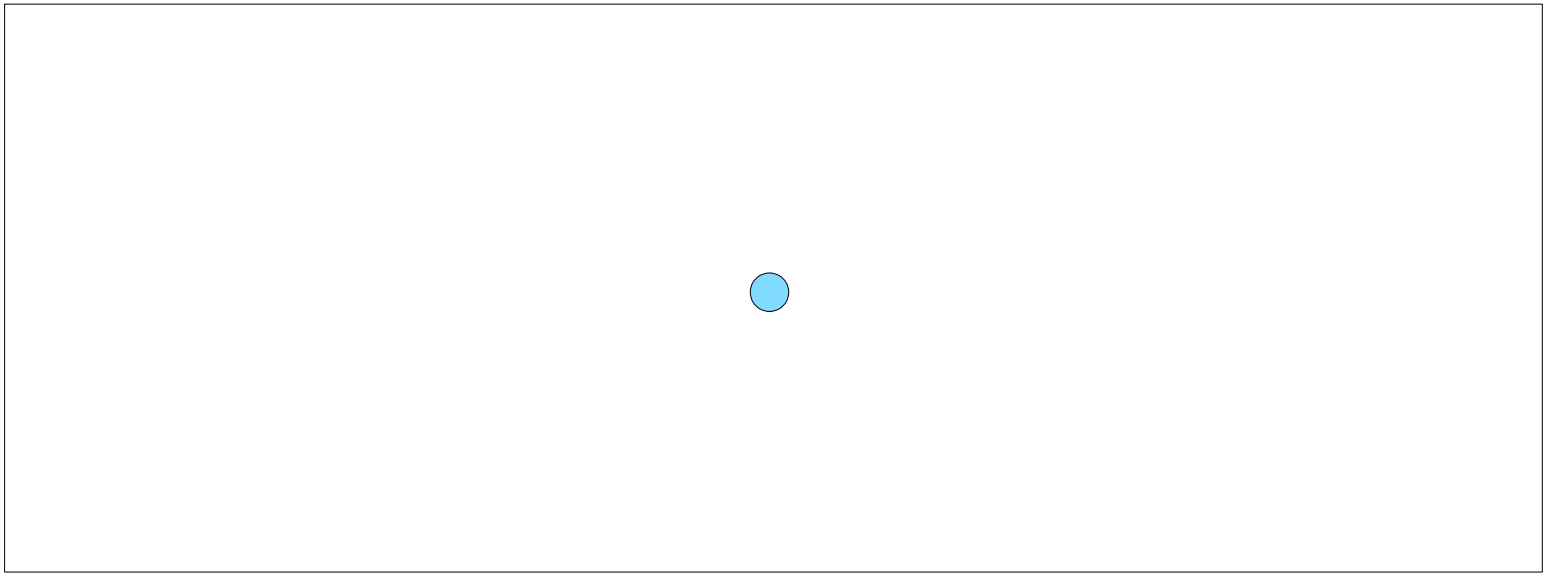
Das Higgs – ein Prüfstein

- Warum beobachten wir überhaupt ein Higgs?
  - Vom Standpunkt der Theorie ist das nicht offensichtlich
  - Das braucht ein wenig Hintergrund...

Koordinaten

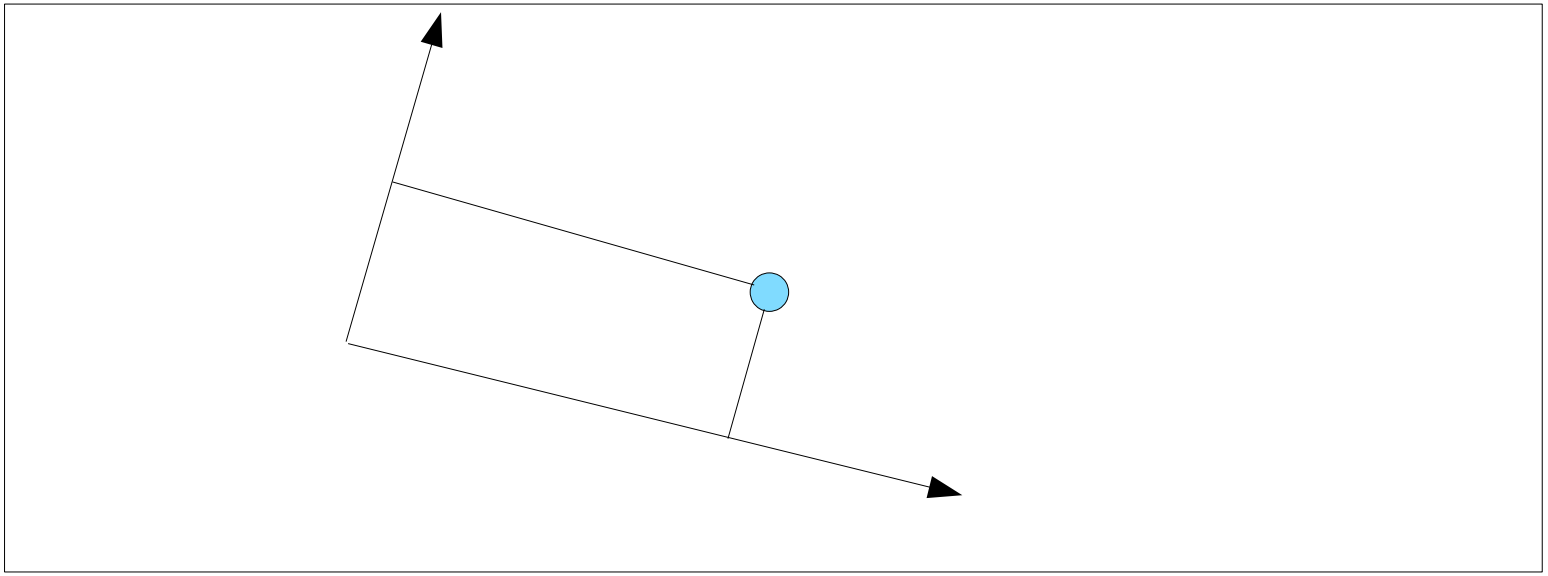
- Raum(zeit)

Koordinaten



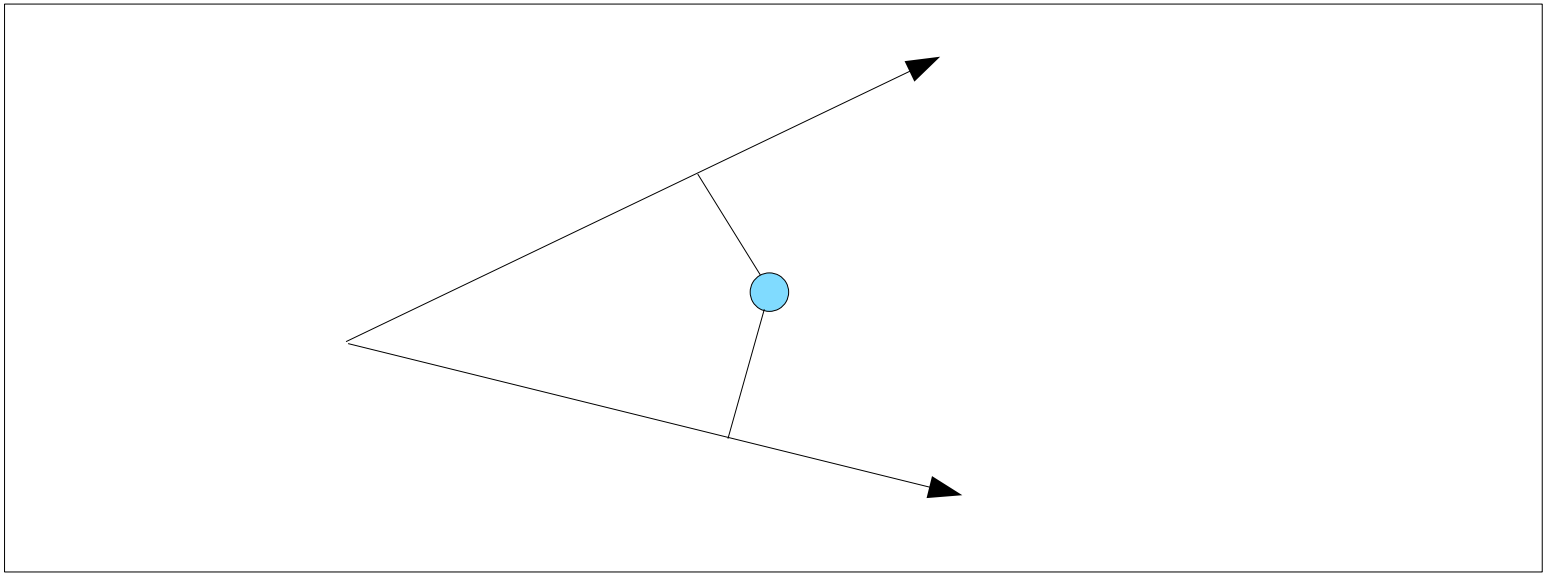
- Raum(zeit) ist eine Menge von Punkten

Koordinaten



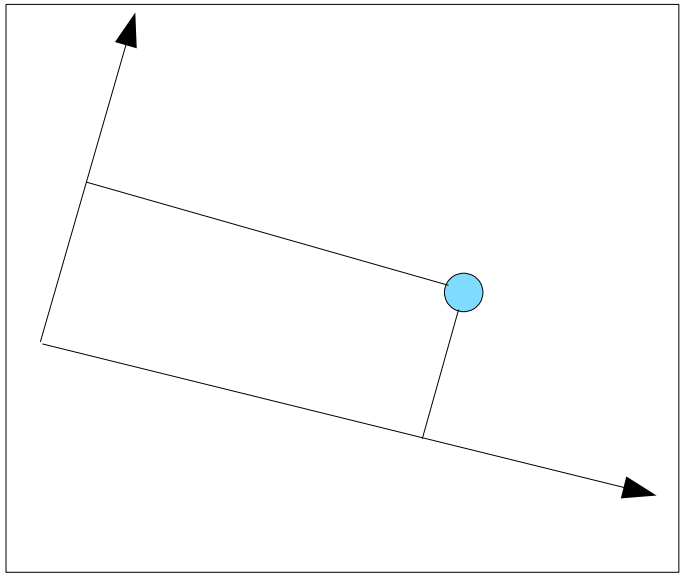
- Raum(zeit) ist eine Menge von Punkten
  - Koordinatensysteme werden verwendet, um sie zu identifizieren

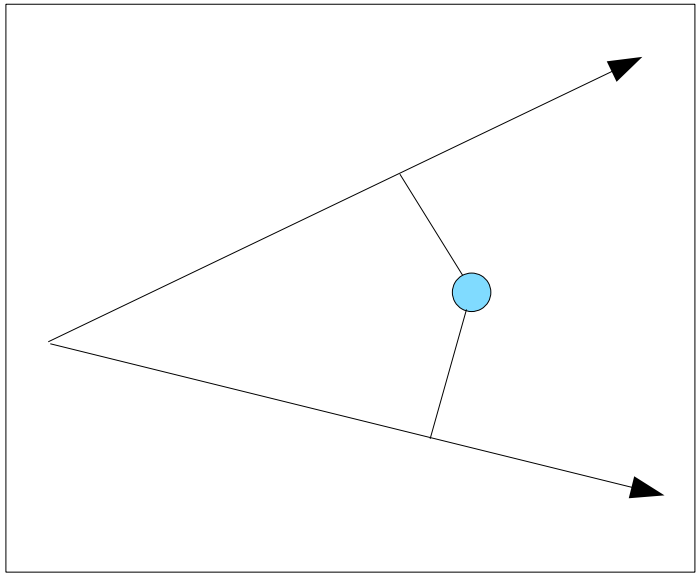
Koordinaten



- Raum(zeit) ist eine Menge von Punkten
  - Koordinatensysteme werden verwendet, um sie zu identifizieren
- Müssen nicht die üblichen Länge-Breite-Höhe sein
  - Es gibt unendlich viele Möglichkeiten

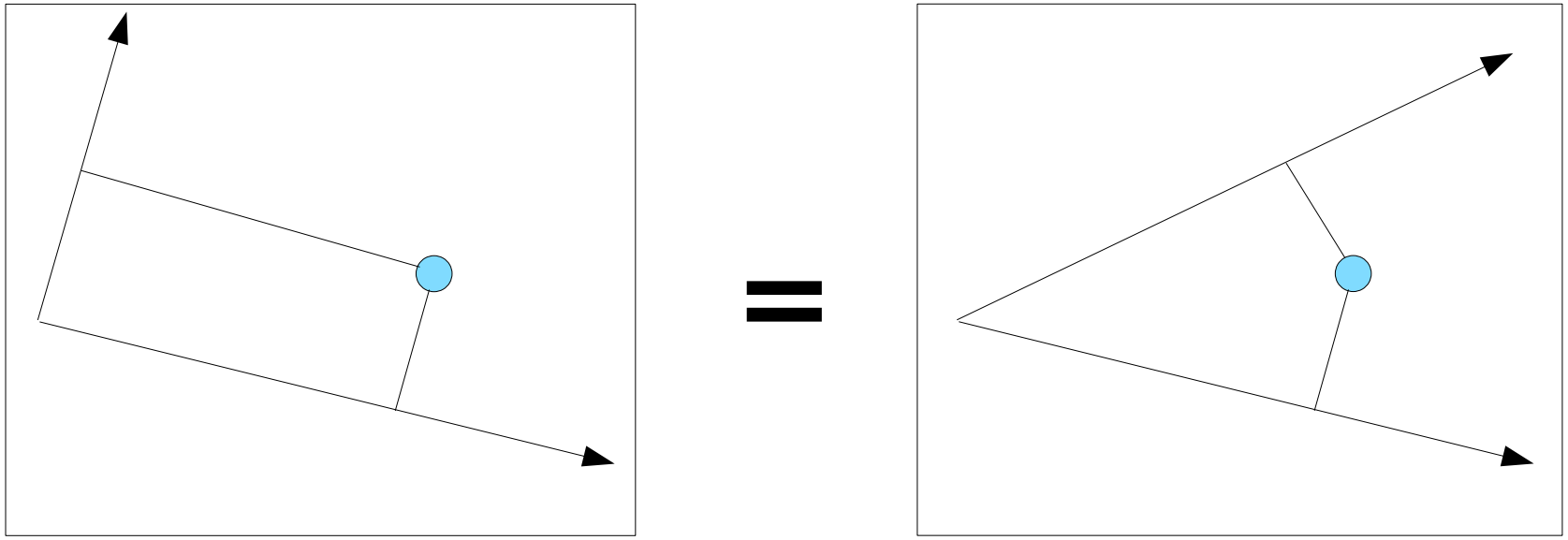
Koordinatentransformationen





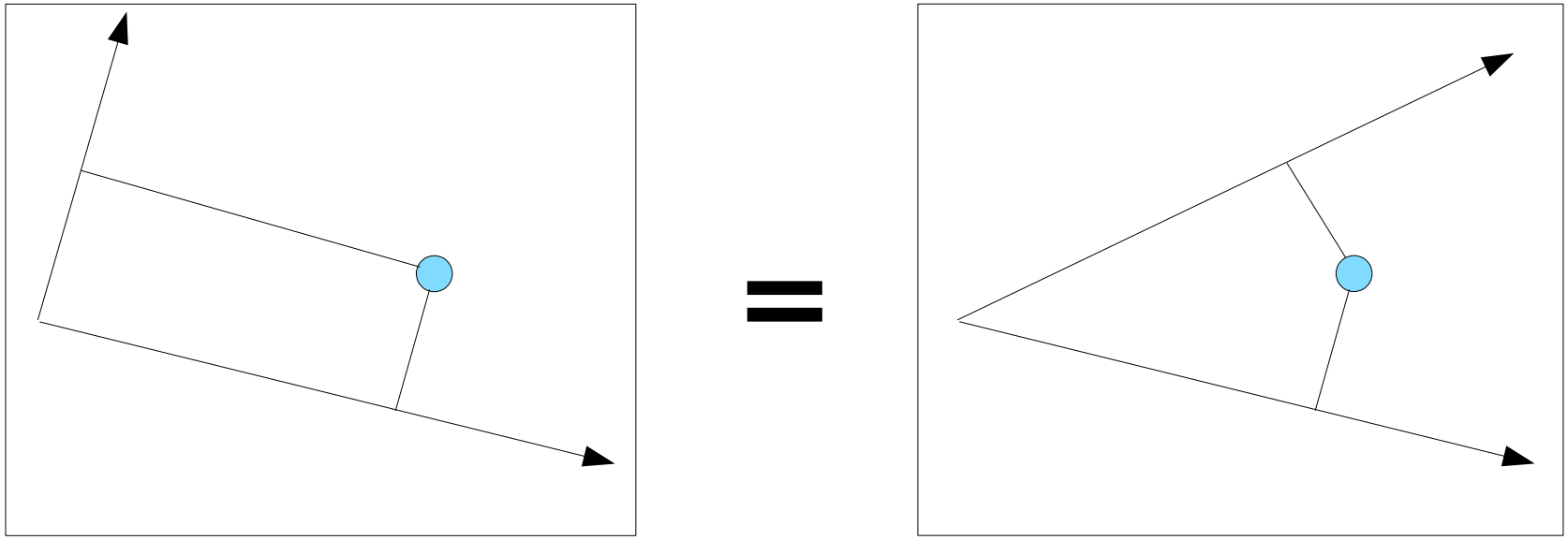
- Koordinatensysteme sind menschengemacht
  - Den Punkten sind sie egal

Koordinatentransformationen



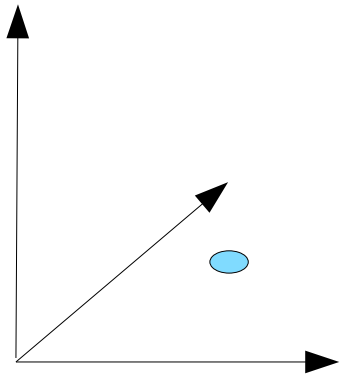
- Koordinatensysteme sind menschengemacht
  - Den Punkten sind sie egal
- Physik muss unabhängig von ihnen sein
- Oder: Physik ist in allen gleich

Koordinatentransformationen



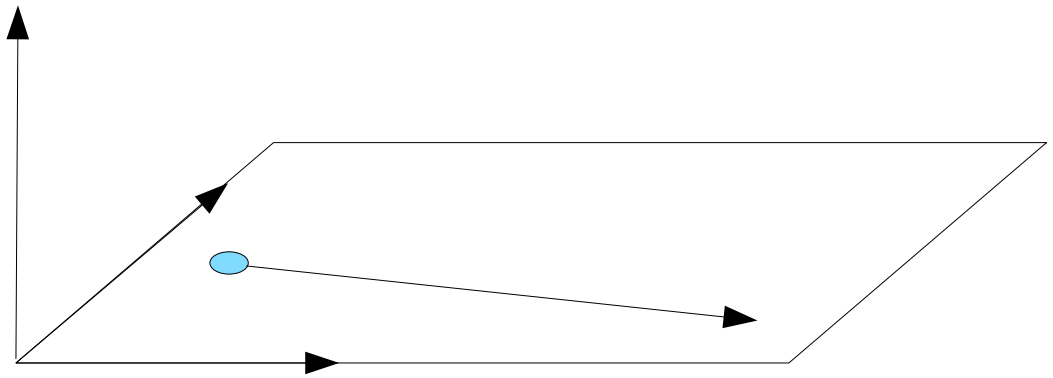
- Koordinatensysteme sind menschengemacht
  - Den Punkten sind sie egal
- Physik muss unabhängig von ihnen sein
- Oder: Physik ist in allen gleich
- Man muss sie also ineinander umwandeln können
  - Koordinatentransformationen

Überflüssige Koordinaten



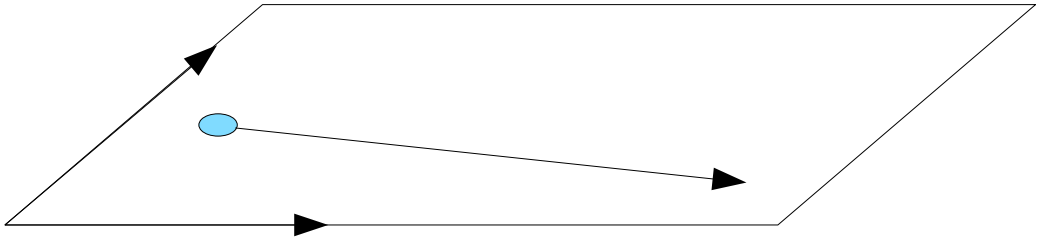
- Nicht immer sind alle Koordinaten unabhängig
  - Einige mögen überflüssig sein

Überflüssige Koordinaten



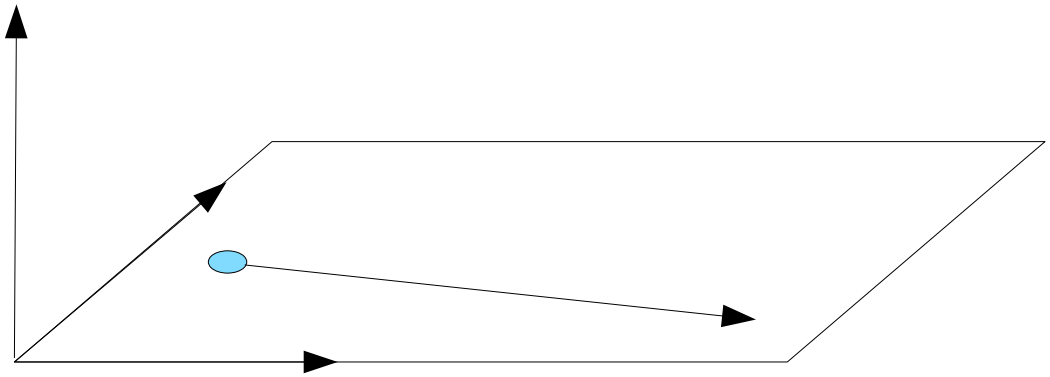
- Nicht immer sind alle Koordinaten unabhängig
  - Einige mögen überflüssig sein
- Z.B. etwas, was sich in der Ebene bewegt, aber für dass man auch die Höhe angibt

Überflüssige Koordinaten



- Nicht immer sind alle Koordinaten unabhängig
  - Einige mögen überflüssig sein
- Z.B. etwas, was sich in der Ebene bewegt, aber für dass man auch die Höhe angibt
- Man kann die überflüssigen Koordinaten eliminieren
  - Manchmal technisch hilfreich

Überflüssige Koordinaten

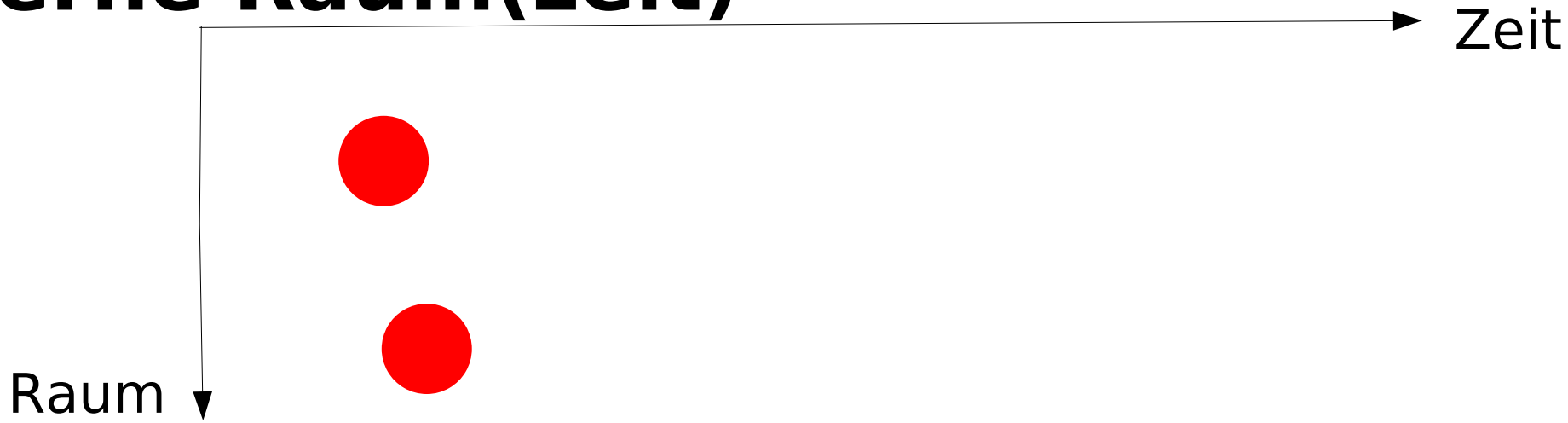


- Nicht immer sind alle Koordinaten unabhängig
  - Einige mögen überflüssig sein
- Z.B. etwas, was sich in der Ebene bewegt, aber für dass man auch die Höhe angibt
- Man kann die überflüssigen Koordinaten eliminieren
  - Manchmal technisch hilfreich
- Aber das ist nicht nötig

Externe Raum(zeit)

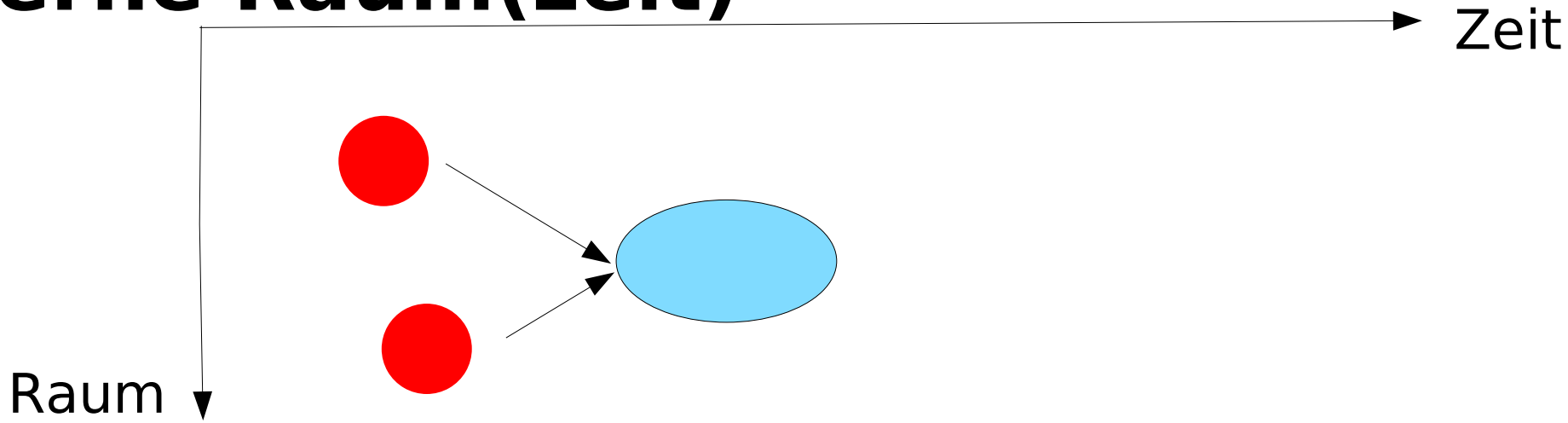
- Teilchenphysik findet in der Raum(zeit) statt

Externe Raum(zeit)



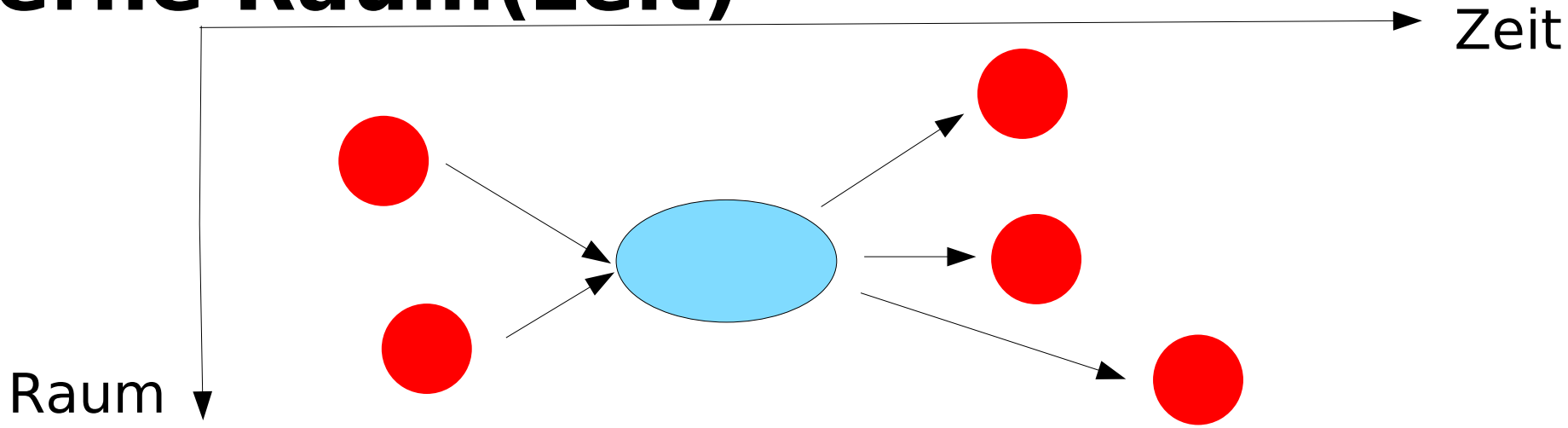
- Teilchenphysik findet in der Raum(zeit) statt
- Die Raum(zeit) ist dabei nur eine Bühne, in der Teilchenphysik geschieht, und nimmt nicht aktiv teil

Externe Raum(zeit)



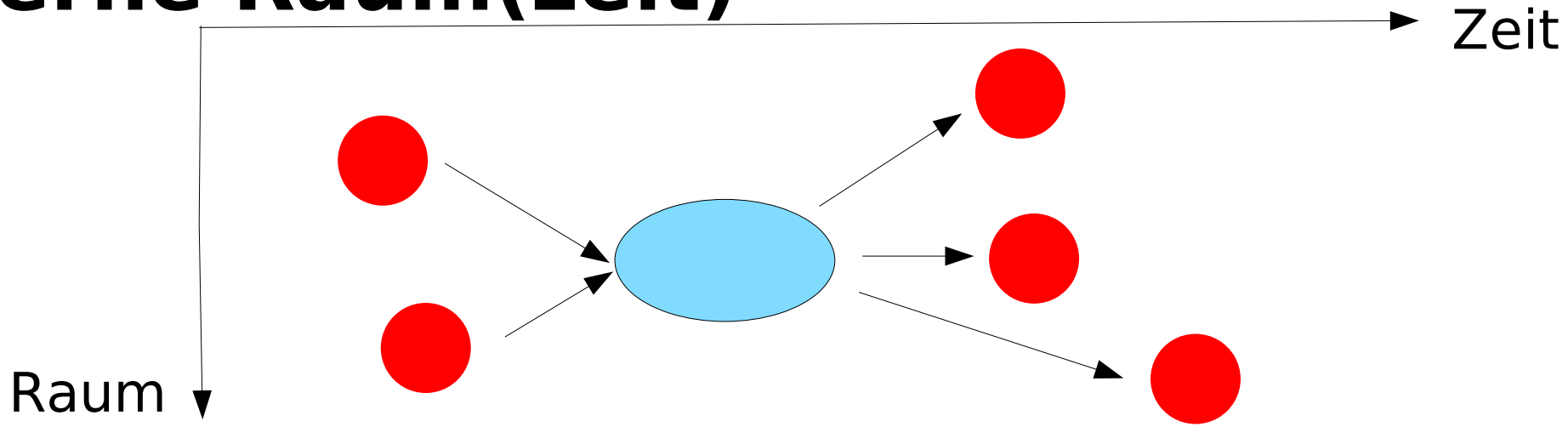
- Teilchenphysik findet in der Raum(zeit) statt
- Die Raum(zeit) ist dabei nur eine Bühne, in der Teilchenphysik geschieht, und nimmt nicht aktiv teil

Externe Raum(zeit)



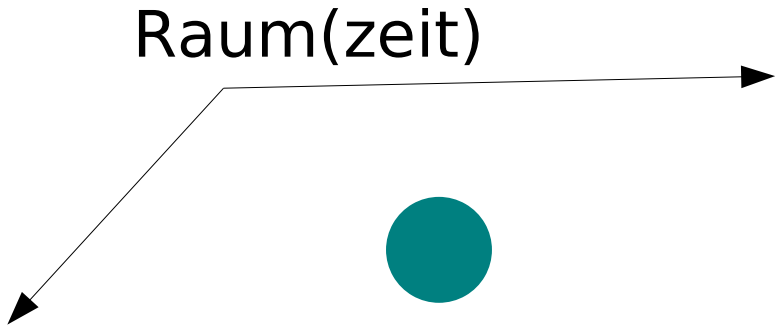
- Teilchenphysik findet in der Raum(zeit) statt
- Die Raum(zeit) ist dabei nur eine Bühne, in der Teilchenphysik geschieht, und nimmt nicht aktiv teil

Externe Raum(zeit)



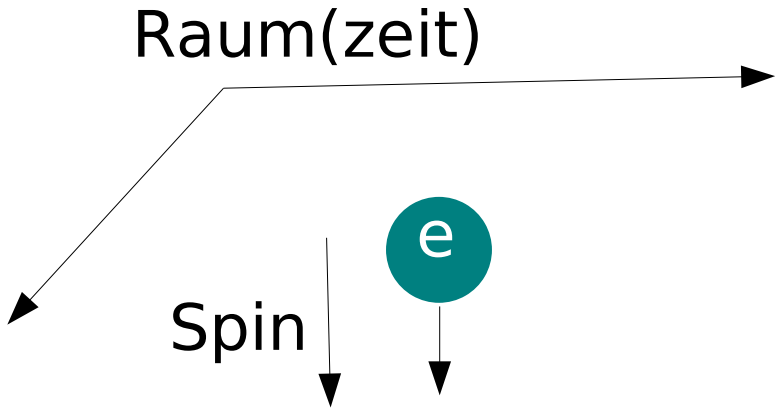
- Teilchenphysik findet in der Raum(zeit) statt
- Die Raum(zeit) ist dabei nur eine Bühne, in der Teilchenphysik geschieht, und nimmt nicht aktiv teil
- Daher wird Raum(zeit) als “externer” Raum(zeit) bezeichnet

Interner Raum



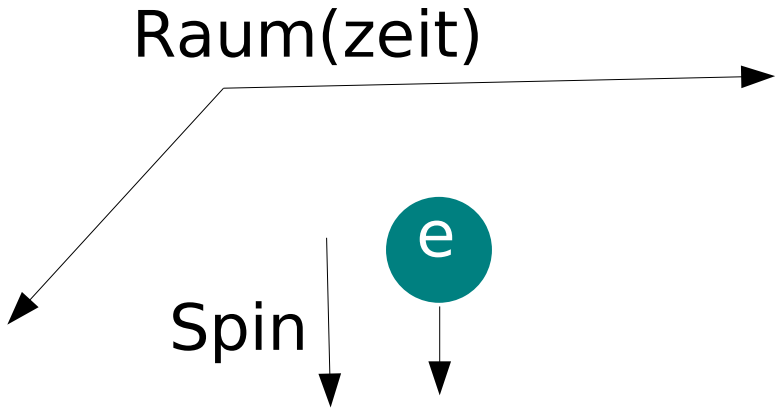
- Teilchen haben mehr Eigenschaften als Ort und Geschwindigkeit

Interner Raum



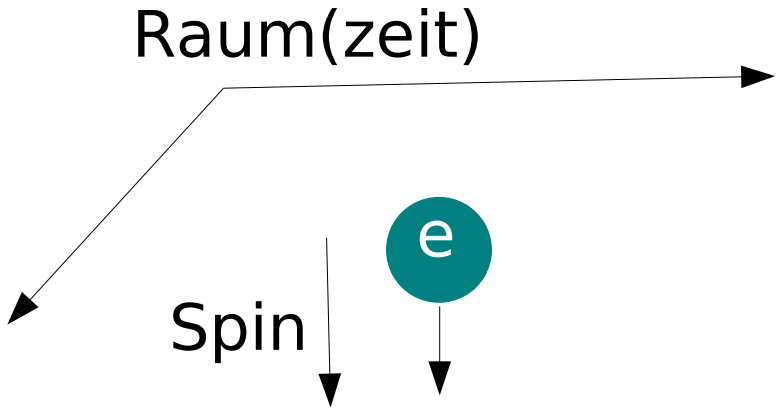
- Teilchen haben mehr Eigenschaften als Ort und Geschwindigkeit
- Beispiel: Spin
  - Bestimmt Eigenschaften unter Drehungen und Gültigkeit des Pauliprinzips
  - Elektronen haben Spin ½
  - Der Spin hat eine Richtung

Interner Raum



- Teilchen haben mehr Eigenschaften als Ort und Geschwindigkeit
- Beispiel: Spin
  - Bestimmt Eigenschaften unter Drehungen und Gültigkeit des Pauliprinzips
  - Elektronen haben Spin ½
  - Der Spin hat eine Richtung
  - Das ist eine zusätzliche Information
  - Benötigt eine zusätzliche Koordinate

Interner Raum



- Teilchen haben mehr Eigenschaften als Ort und Geschwindigkeit
- Beispiel: Spin
  - Bestimmt Eigenschaften unter Drehungen und Gültigkeit des Pauliprinzips
  - Elektronen haben Spin ½
  - Der Spin hat eine Richtung
  - Das ist eine zusätzliche Information
  - Benötigt eine zusätzliche Koordinate
- Intern: Gehört zum Elektron, nicht zur Raum(zeit)

Interner Raum

- Es gibt mehr Möglichkeiten

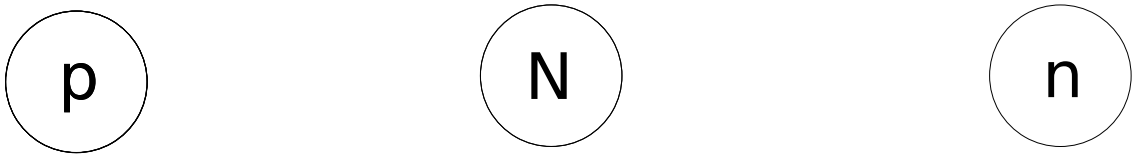
Interner Raum

- Es gibt mehr Möglichkeiten – teils sehr abstrakt

Interner Raum

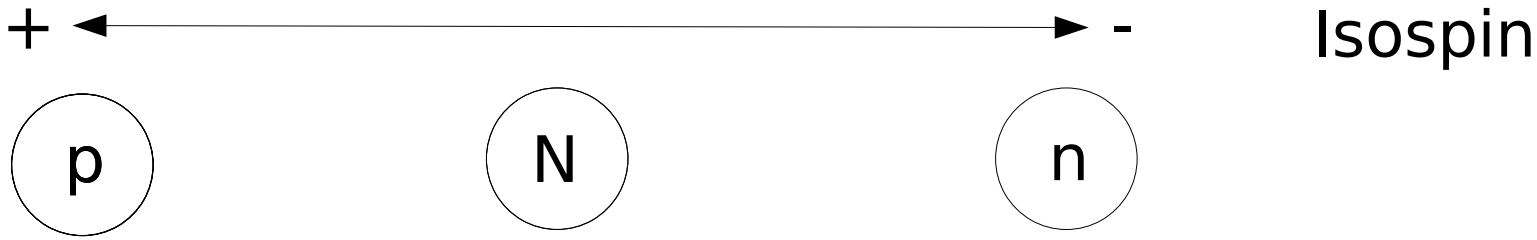
- Es gibt mehr Möglichkeiten – teils sehr abstrakt
  - Z.B.: Protonen und Neutronen

Interner Raum



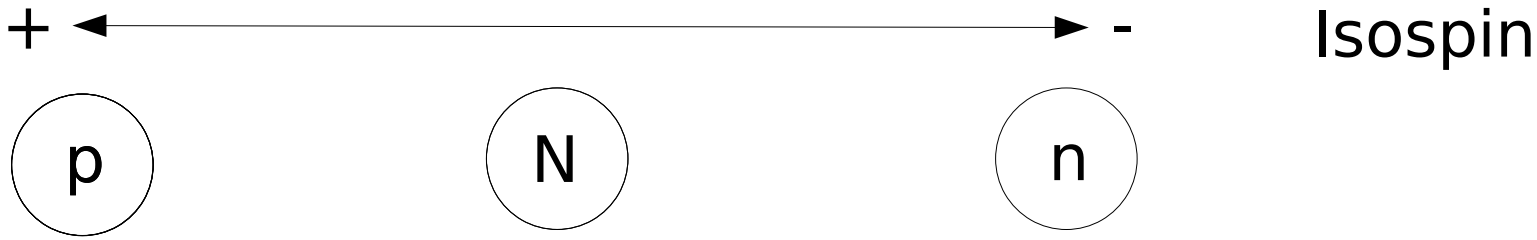
- Es gibt mehr Möglichkeiten – teils sehr abstrakt
  - Z.B.: Protonen und Neutronen
  - Die starke Wechselwirkung kann sie nicht unterscheiden
    - Massendifferenz ist vernachlässigt
  - Verhält sich wie eine Sorte Teilchen: Nukleonen

Interner Raum



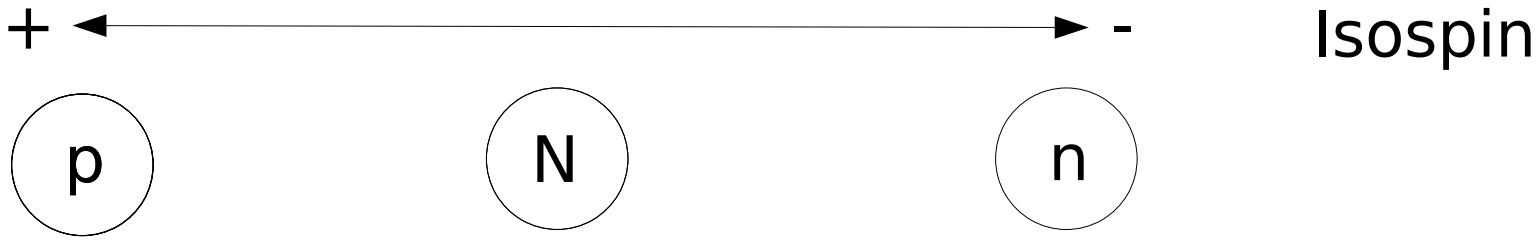
- Es gibt mehr Möglichkeiten – teils sehr abstrakt
  - Z.B.: Protonen und Neutronen
  - Die starke Wechselwirkung kann sie nicht unterscheiden
    - Massendifferenz ist vernachlässigt
  - Verhält sich wie eine Sorte Teilchen: Nukleonen
  - Unterschied kann in einem internen Raum beschrieben werden: Isospin
  - Isospin + ist ein Proton, Isospin – ist ein Neutron

Interner Raum



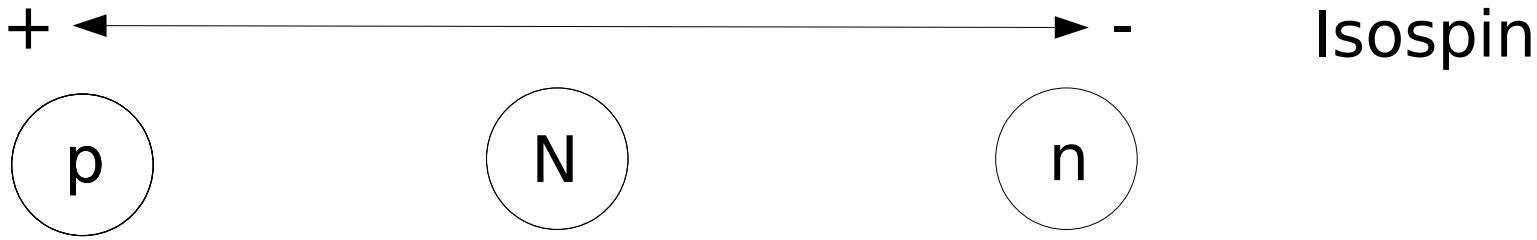
- Es gibt mehr Möglichkeiten – teils sehr abstrakt
  - Z.B.: Protonen und Neutronen
  - Die starke Wechselwirkung kann sie nicht unterscheiden
    - Massendifferenz ist vernachlässigt
  - Verhält sich wie eine Sorte Teilchen: Nukleonen
  - Unterschied kann in einem internen Raum beschrieben werden: Isospin
  - Isospin + ist ein Proton, Isospin – ist ein Neutron
  - Andere Kräfte können unterscheiden

Interner Raum



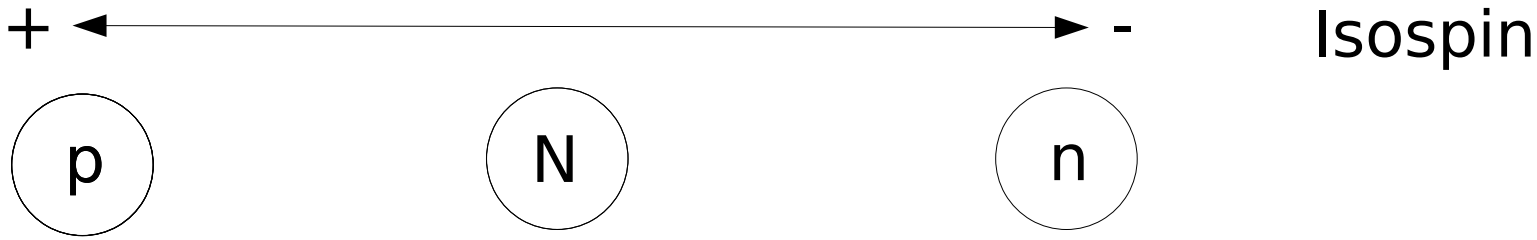
- Es gibt mehr Möglichkeiten – teils sehr abstrakt
  - Z.B.: Protonen und Neutronen
  - Die starke Wechselwirkung kann sie nicht unterscheiden
    - Massendifferenz ist vernachlässigt
  - Verhält sich wie eine Sorte Teilchen: Nukleonen
  - Unterschied kann in einem internen Raum beschrieben werden: Isospin
  - Isospin + ist ein Proton, Isospin – ist ein Neutron
  - Andere Kräfte können unterscheiden
- Proton oder Neutron zu sein ist eine interne (diskrete) Koordinate

Interner Raum



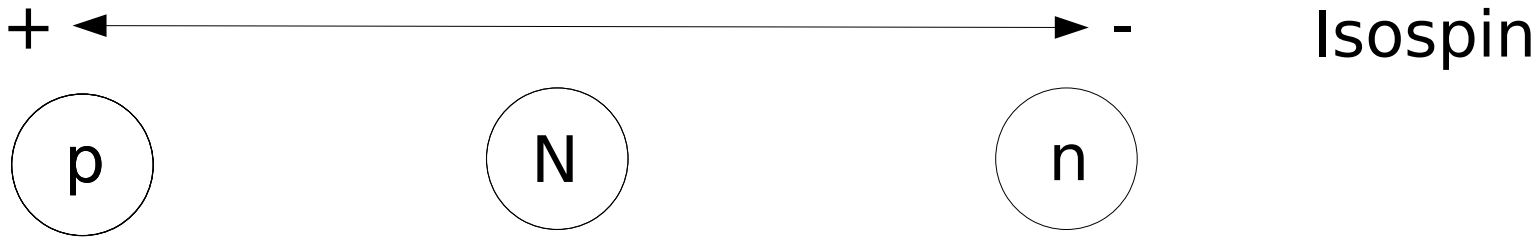
- Wo ist der Unterschied, wenn man alles außer der starken Kraft vernachlässigt?

Interner Raum



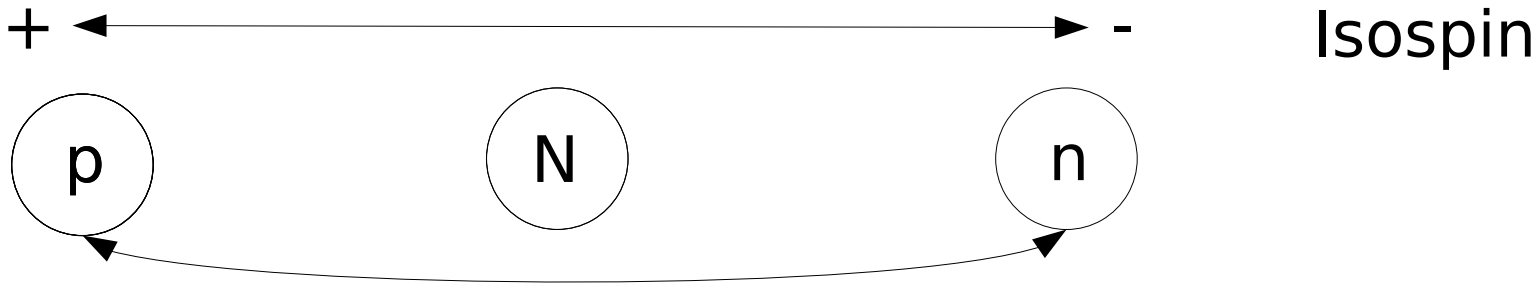
- Wo ist der Unterschied, wenn man alles außer der starken Kraft vernachlässigt?
- Keiner

Interner Raum



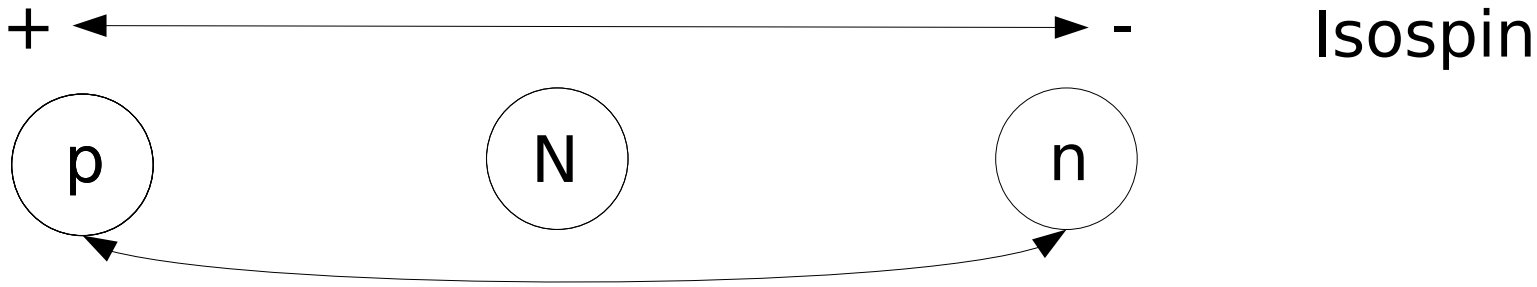
- Wo ist der Unterschied, wenn man alles außer der starken Kraft vernachlässigt?
- Keiner
- Das System unterscheidet dann nicht mehr zwischen Protonen und Neutronen

Interner Raum



- Wo ist der Unterschied, wenn man alles außer der starken Kraft vernachlässigt?
- Keiner
- Das System unterscheidet dann nicht mehr zwischen Protonen und Neutronen
- Können ausgetauscht werden, ohne dass sich etwas ändert
- Was Proton und Neutron genannt wird, ist egal
- Nur ein Koordinatensystem

Interner Raum



- Wo ist der Unterschied, wenn man alles außer der starken Kraft vernachlässigt?
- Keiner
- Das System unterscheidet dann nicht mehr zwischen Protonen und Neutronen
- Können ausgetauscht werden, ohne dass sich etwas ändert
- Was Proton und Neutron genannt wird, ist egal
- Nur ein Koordinatensystem
- Deswegen ist die starke Kraft unabhängig davon

Klassische Elektrodynamik

- Triumph der klassischen Physik im 19. Jahrhundert

Klassische Elektrodynamik

- Triumph der klassischen Physik im 19. Jahrhundert
- Formuliert in den Maxwellgleichungen
  - Ohne Materie werden die elektrischen und magnetischen Felder beschrieben, und wie sie zusammenhängen

Klassische Elektrodynamik

- Triumph der klassischen Physik im 19. Jahrhundert
- Formuliert in den Maxwellgleichungen
  - Ohne Materie werden die elektrischen und magnetischen Felder beschrieben, und wie sie zusammenhängen
- Können abgeleitet werden aus einem gemeinsamen Feld: Das sogenannte Vektorpotential

Klassische Elektrodynamik

- Triumph der klassischen Physik im 19. Jahrhundert
- Formuliert in den Maxwellgleichungen
  - Ohne Materie werden die elektrischen und magnetischen Felder beschrieben, und wie sie zusammenhängen
- Können abgeleitet werden aus einem gemeinsamen Feld: Das sogenannte Vektorpotential
- Das Vektorpotential ist nicht eindeutig, aber die elektrischen und magnetischen Felder sind es
  - Örtliche änderbar: Eichtransformation

Klassische Elektrodynamik

- Triumph der klassischen Physik im 19. Jahrhundert
- Formuliert in den Maxwellgleichungen
  - Ohne Materie werden die elektrischen und magnetischen Felder beschrieben, und wie sie zusammenhängen
- Können abgeleitet werden aus einem gemeinsamen Feld: Das sogenannte Vektorpotential
- Das Vektorpotential ist nicht eindeutig, aber die elektrischen und magnetischen Felder sind es
  - Örtliche änderbar: Eichtransformation
- Extremer Fall interner Koordinatentransformation
  - Ein Teil des Vektorpotentials ist überflüssig

Das Problem mit dem Higgs

- Schwache Wechselwirkung sind ein extremer Fall von Redundanz
  - Starke Wechselwirkung auch; gleiche Story, andere Details

Das Problem mit dem Higgs

- Schwache Wechselwirkung sind ein extremer Fall von Redundanz
  - Starke Wechselwirkung auch; gleiche Story, andere Details
- Elementarteilchen wie Vektorpotential: Redundant
  - Abhängig von internem Koordinatensystem
  - Eigenschaften können sich unter Koordinatentransformationen ändern

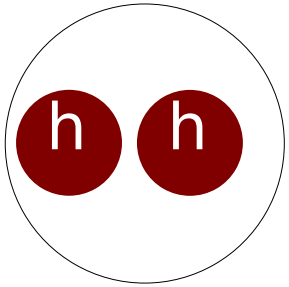
Das Problem mit dem Higgs

- Schwache Wechselwirkung sind ein extremer Fall von Redundanz
  - Starke Wechselwirkung auch; gleiche Story, andere Details
- Elementarteilchen wie Vektorpotential: Redundant
  - Abhängig von internem Koordinatensystem
  - Eigenschaften können sich unter Koordinatentransformationen ändern
- Ein Higgs alleine ist nicht unabhängig

h

Das Problem mit dem Higgs

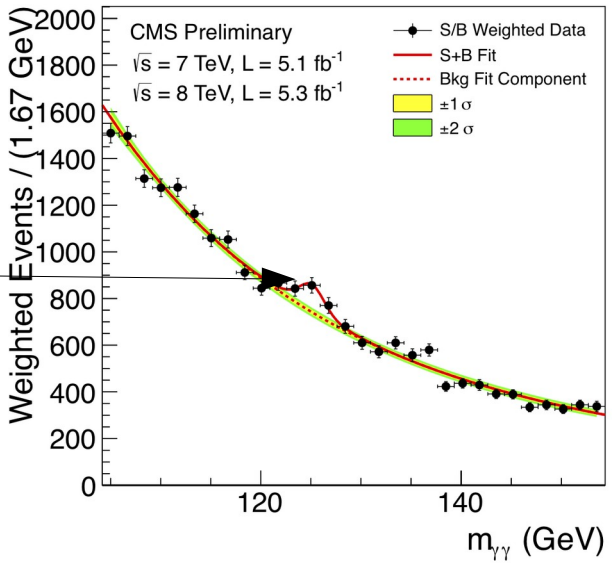
- Schwache Wechselwirkung sind ein extremer Fall von Redundanz
  - Starke Wechselwirkung auch; gleiche Story, andere Details
- Elementarteilchen wie Vektorpotential: Redundant
  - Abhängig von internem Koordinatensystem
  - Eigenschaften können sich unter Koordinatentransformationen ändern
- Ein Higgs alleine ist nicht unabhängig, es braucht mindestens zwei: Ein Bindungszustand zweier Higgs



Das Problem mit dem Higgs

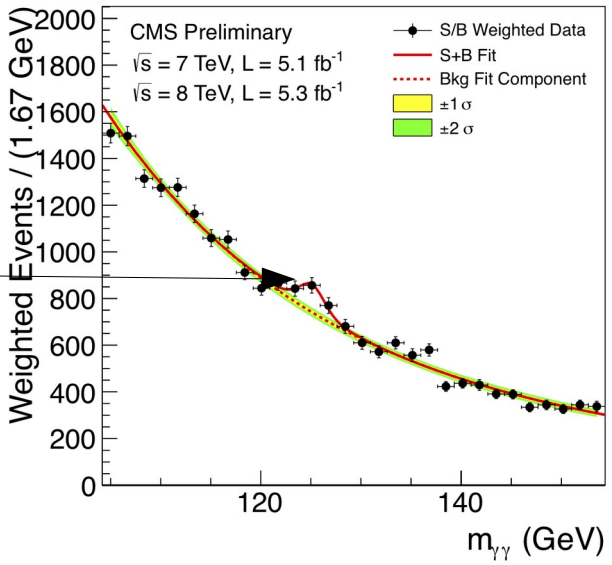
Das Problem mit dem Higgs

- Aber was ist dann das?



Das Problem mit dem Higgs

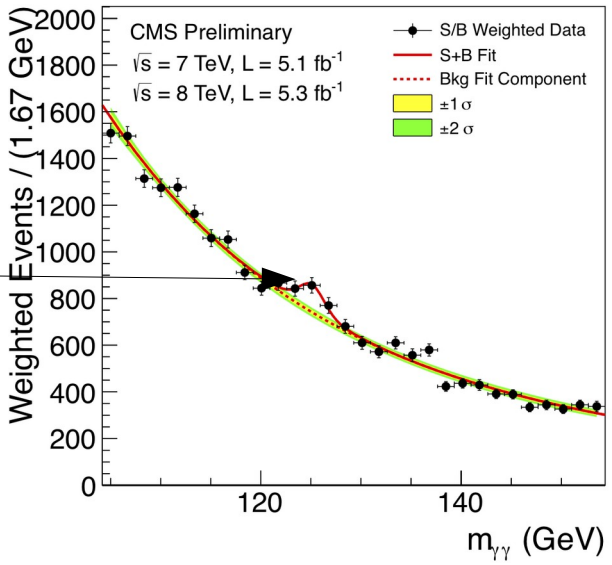
- Aber was ist dann das?
- Detaillierte Theorie

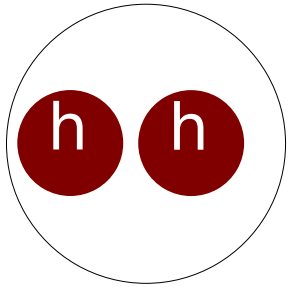


Das Problem mit dem Higgs

- Aber was ist dann das?
- Detaillierte Theorie (1980er):

[Fröhlich, Morcchio, Strocchi]

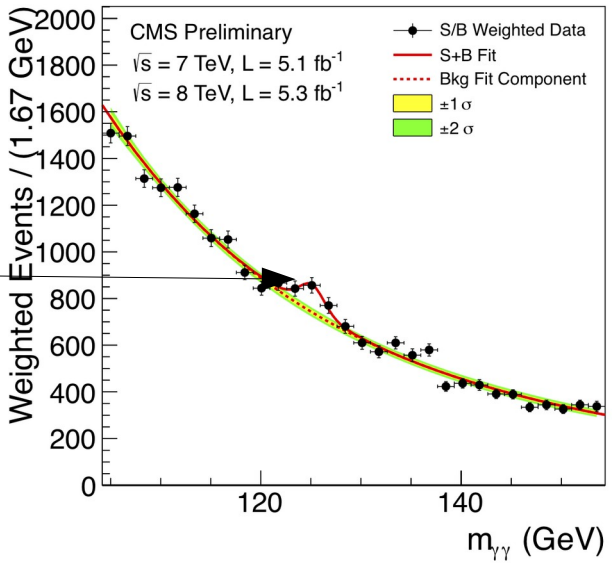


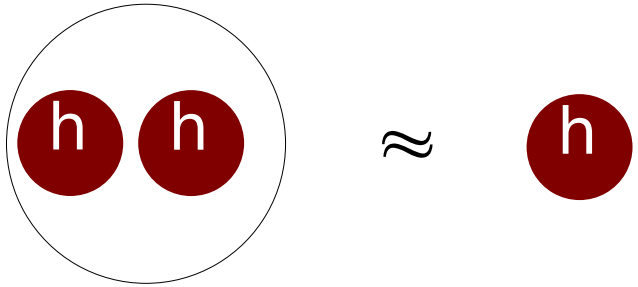


Das Problem mit dem Higgs

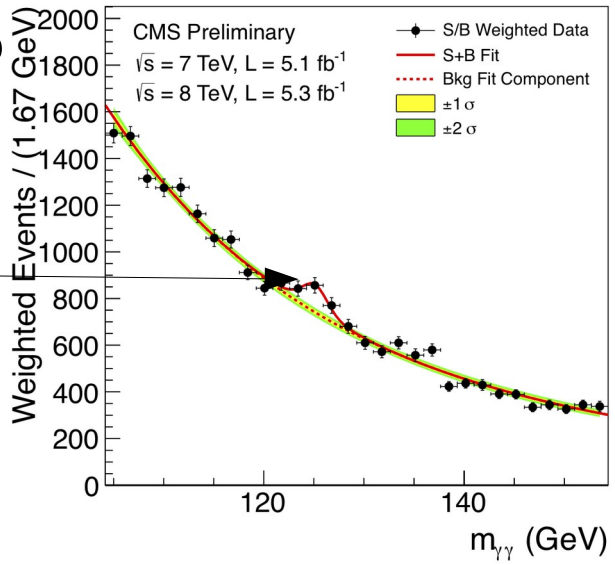
- Aber was ist dann das?
- Detaillierte Theorie (1980er):

[Fröhlich, Morcchio, Strocchi]



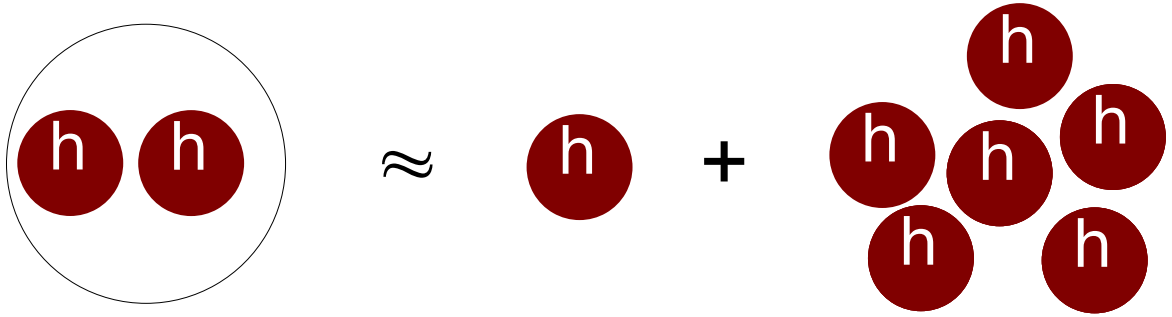


Das Problem mit dem Higgs

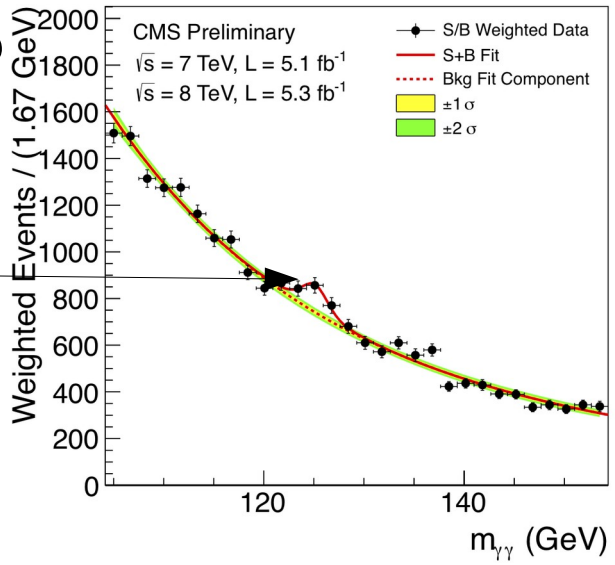


- Aber was ist dann das?
- Detaillierte Theorie (1980er):

[Fröhlich, Morcchio, Strocchi]

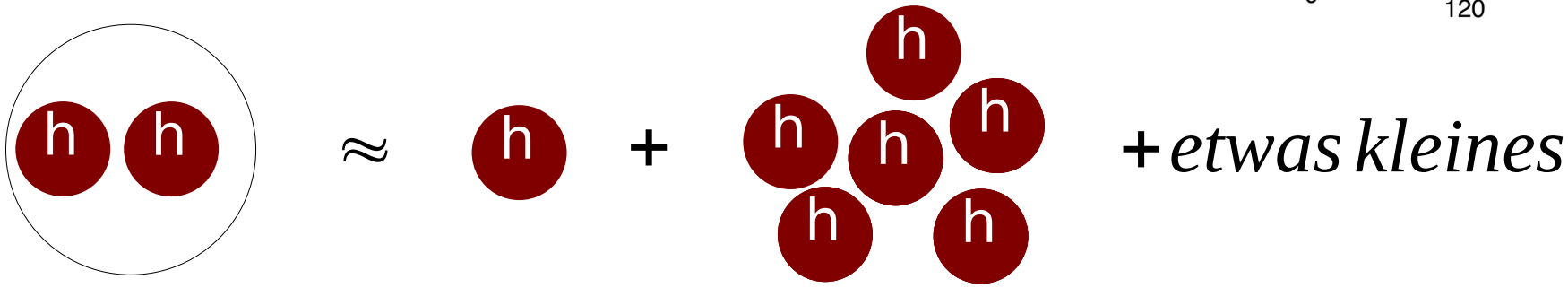


Das Problem mit dem Higgs

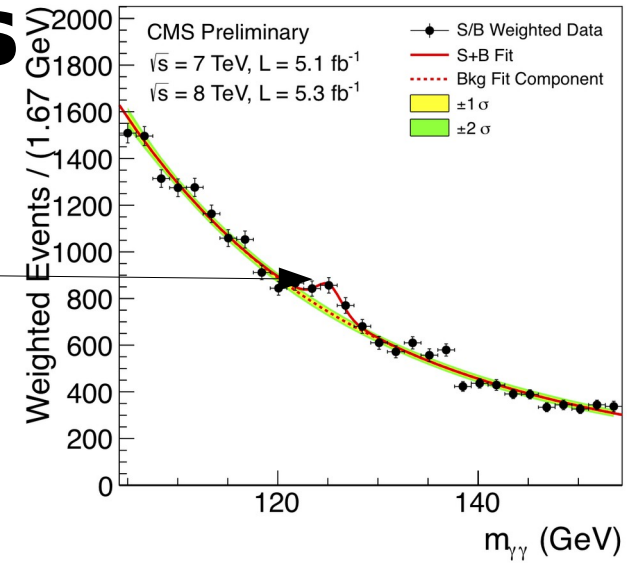


- Aber was ist dann das?
- Detaillierte Theorie (1980er):

[Fröhlich, Morcchio, Strocchi]

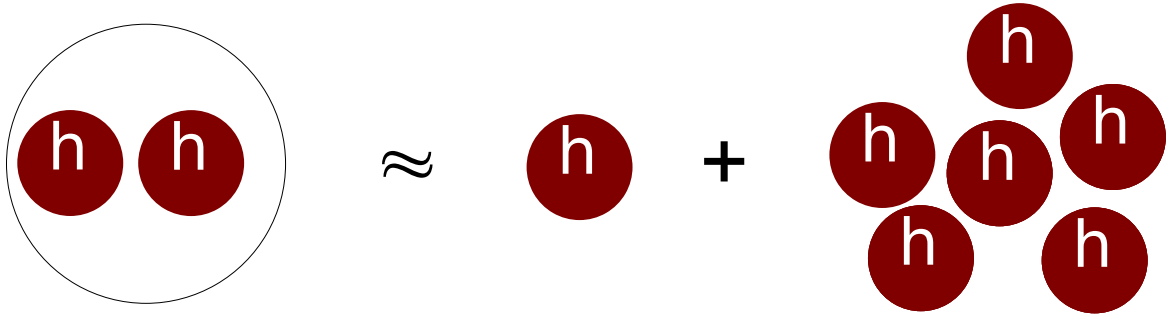


Das Problem mit dem Higgs



- Aber was ist dann das?
- Detaillierte Theorie (1980er):

[Fröhlich, Morcchio, Strocchi]

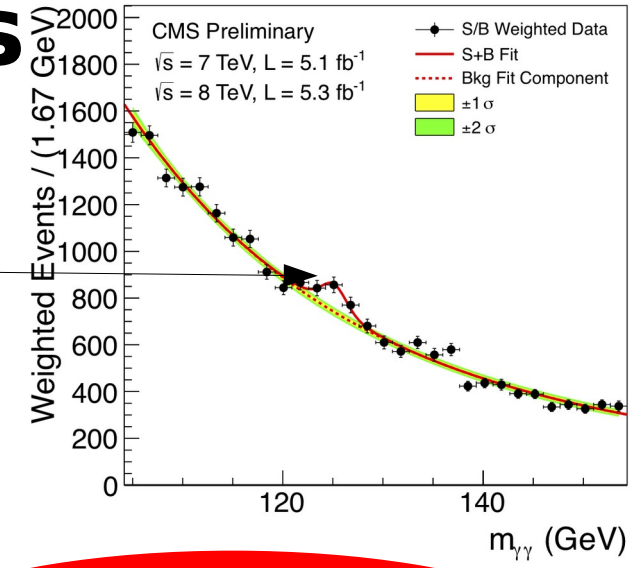


$+ \textit{etwas kleines}$

$$h = v + \eta$$

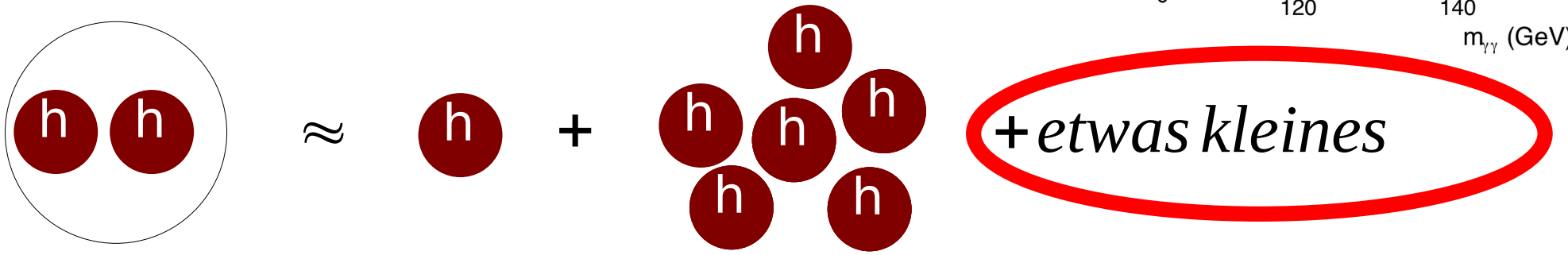
$$\langle (h^+ h)(x)(h^+ h)(y) \rangle \approx const. + \langle h^+(x) h(y) \rangle + O(\eta^3)$$

Das Problem mit dem Higgs



- Aber was ist dann das?
- Detaillierte Theorie (1980er):

[Fröhlich, Morcchio, Strocchi]

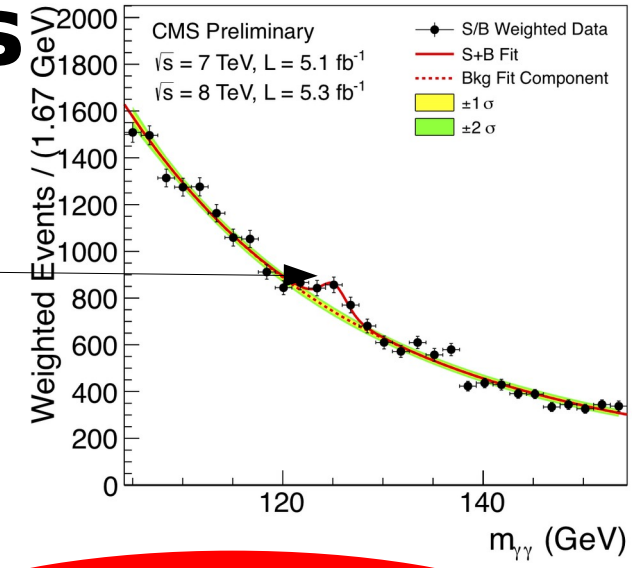


- Verständnis dieses Details testet die Theorie!

$$h = v + \eta$$

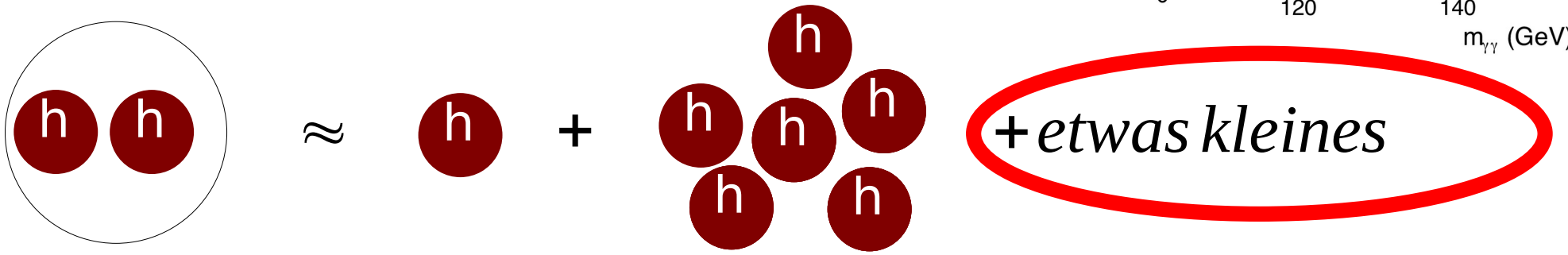
$$\langle (h^+ h)(x)(h^+ h)(y) \rangle \approx const. + \langle h^+(x) h(y) \rangle + O(\eta^3)$$

Das Problem mit dem Higgs



- Aber was ist dann das?
- Detaillierte Theorie (1980er):

[Fröhlich, Morcchio, Strocchi]

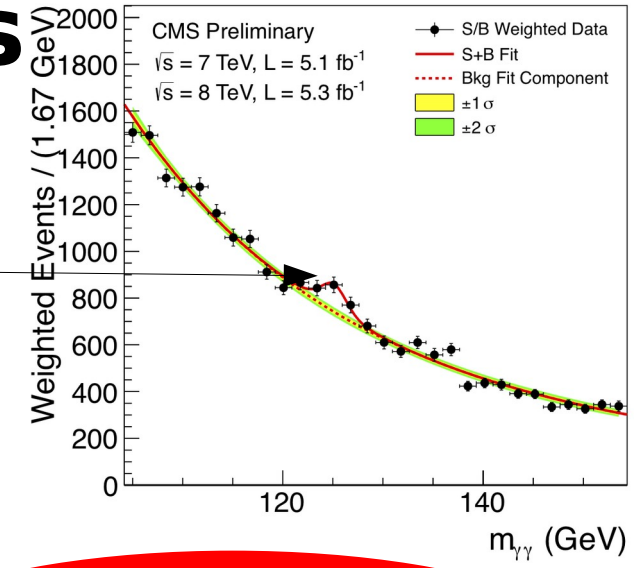


- Verständnis dieses Details testet die Theorie!
  - Vergleich Theorie und Experiment

$$h = v + \eta$$

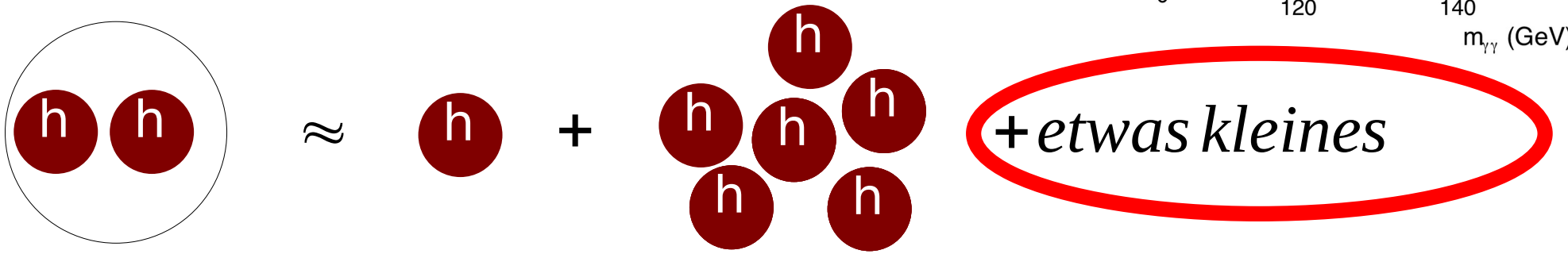
$$\langle (h^+ h)(x)(h^+ h)(y) \rangle \approx const. + \langle h^+(x) h(y) \rangle + O(\eta^3)$$

Das Problem mit dem Higgs



- Aber was ist dann das?
- Detaillierte Theorie (1980er):

[Fröhlich, Morcchio, Strocchi]

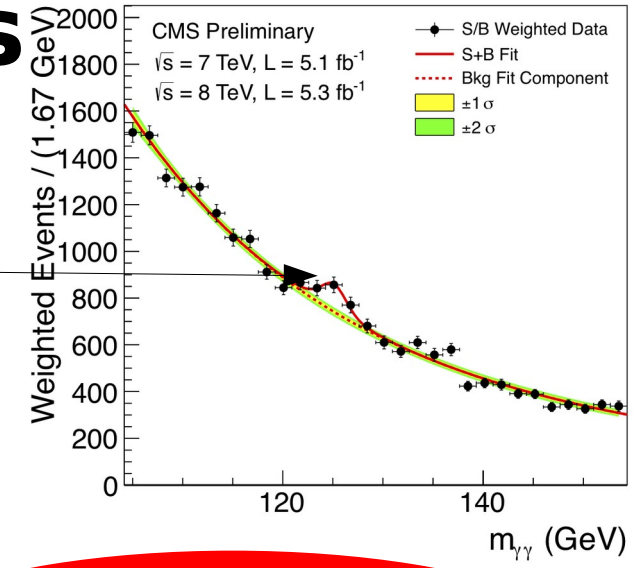


- Verständnis dieses Details testet die Theorie!
  - Vergleich Theorie und Experiment
  - Zu geringer Effekt um relevant zu sein

$$h = v + \eta$$

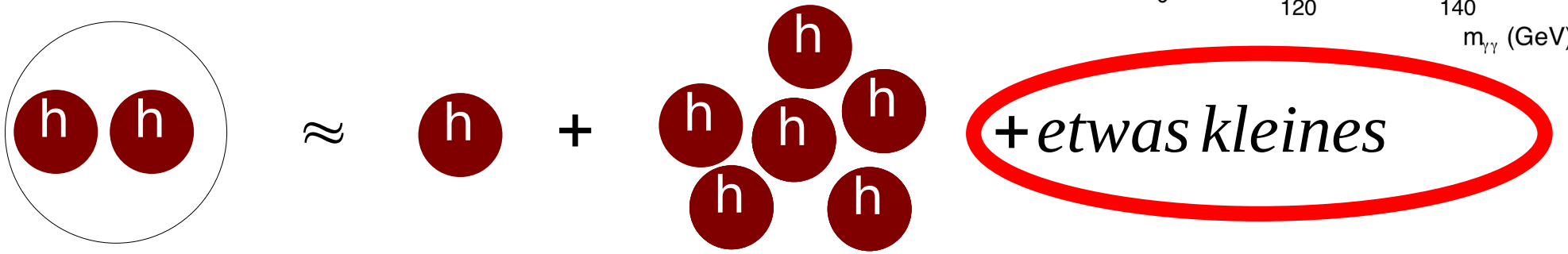
$$\langle (h^+ h)(x)(h^+ h)(y) \rangle \approx const. + \langle h^+(x) h(y) \rangle + O(\eta^3)$$

Das Problem mit dem Higgs



- Aber was ist dann das?
- Detaillierte Theorie (1980er):

[Fröhlich, Morcchio, Strocchi]



- Verständnis dieses Details testet die Theorie!
  - Vergleich Theorie und Experiment
  - Zu geringer Effekt um relevant zu sein – bis jetzt!

$$h = v + \eta$$

$$\langle (h^+ h)(x)(h^+ h)(y) \rangle \approx const. + \langle h^+(x) h(y) \rangle + O(\eta^3)$$

Weitreichende Konsequenzen

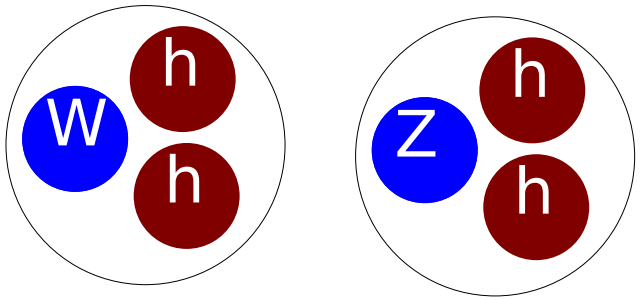
- Ähnliches gilt für fast alle Teilchen im Standardmodell

Weitreichende Konsequenzen

- Ähnliches gilt für fast alle Teilchen im Standardmodell
  - W, Z

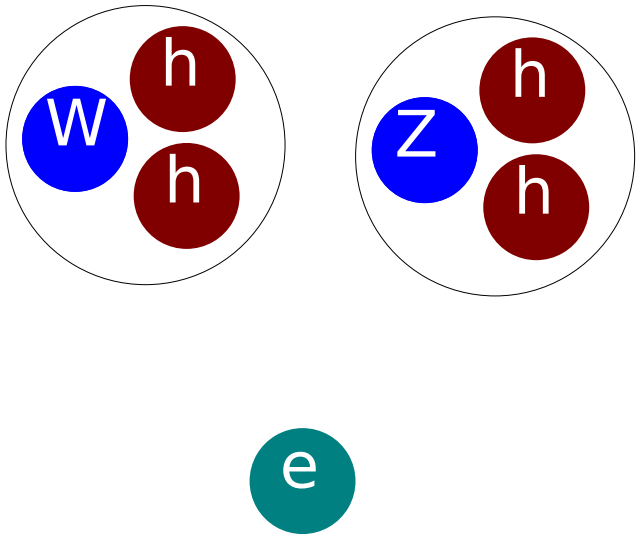
Weitreichende Konsequenzen

- Ähnliches gilt für fast alle Teilchen im Standardmodell
  - W, Z



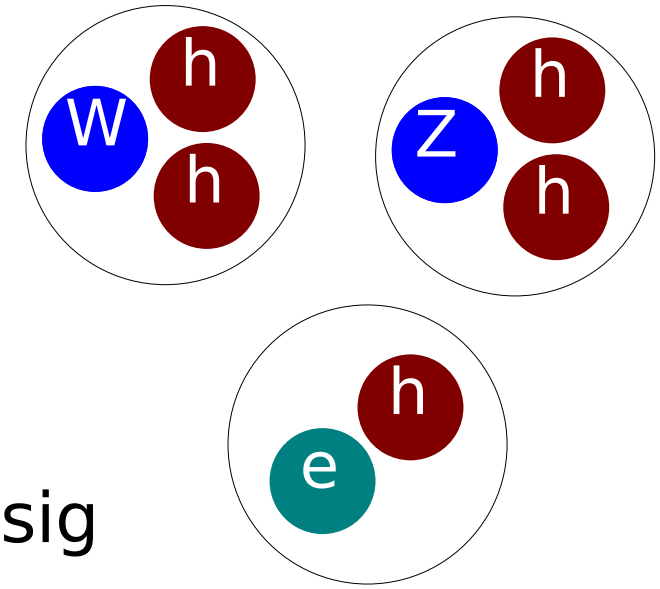
Weitreichende Konsequenzen

- Ähnliches gilt für fast alle Teilchen im Standardmodell
  - W, Z
  - Leptonen
    - Elektronen,...



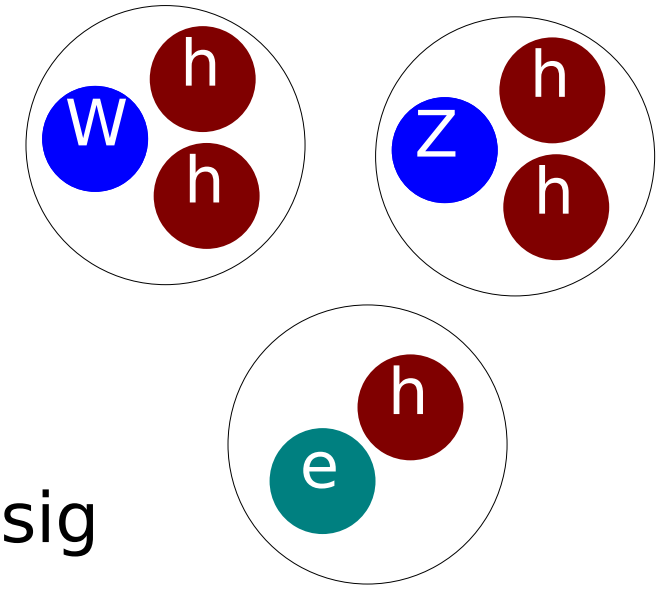
Weitreichende Konsequenzen

- Ähnliches gilt für fast alle Teilchen im Standardmodell
  - W, Z
  - Leptonen
    - Elektronen,...
    - Massendefekt riesig



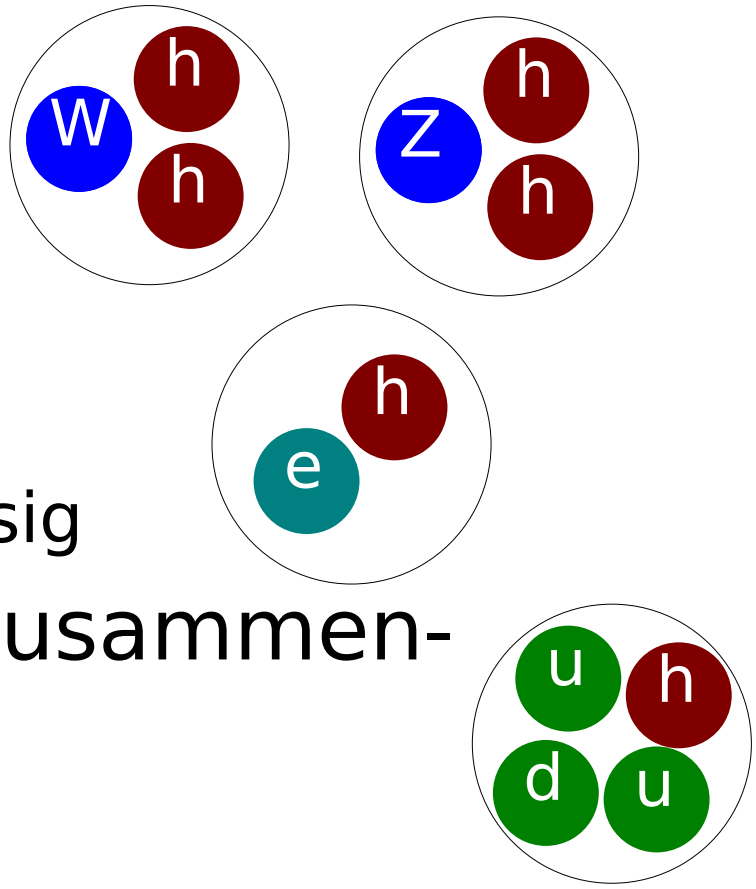
Weitreichende Konsequenzen

- Ähnliches gilt für fast alle Teilchen im Standardmodell
  - W, Z
  - Leptonen
    - Elektronen,...
    - Massendefekt riesig
- Viele aus Quarks zusammen-gesetzte Teilchen



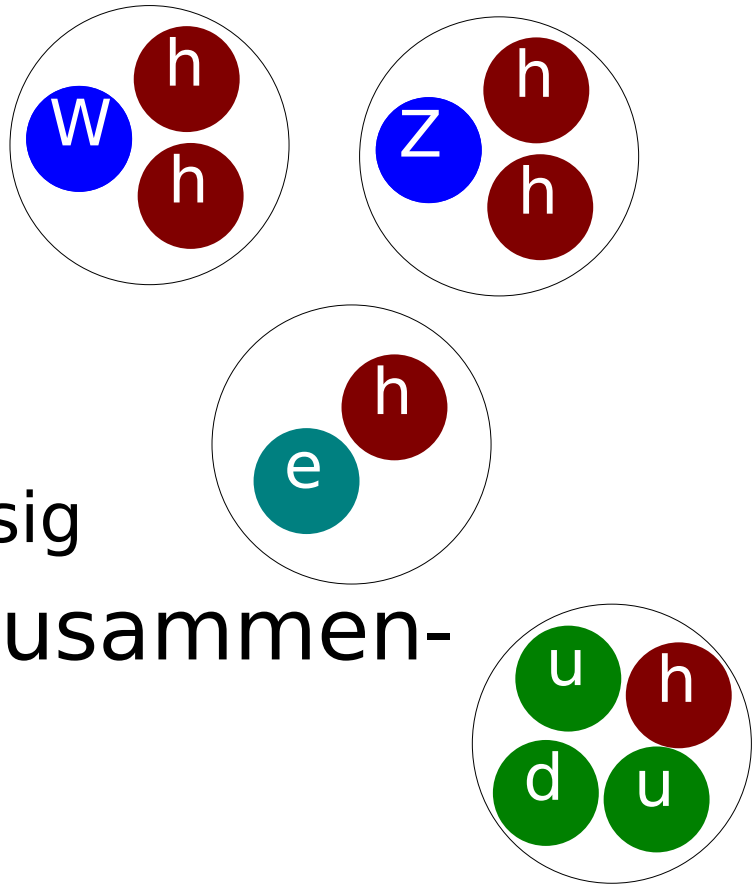
Weitreichende Konsequenzen

- Ähnliches gilt für fast alle Teilchen im Standardmodell
  - W, Z
  - Leptonen
    - Elektronen,...
    - Massendefekt riesig
- Viele aus Quarks zusammen-gesetzte Teilchen
  - Proton!



Weitreichende Konsequenzen

- Ähnliches gilt für fast alle Teilchen im Standardmodell
  - W, Z
  - Leptonen
    - Elektronen,...
    - Massendefekt riesig
- Viele aus Quarks zusammen-gesetzte Teilchen
  - Proton!
- Immer extrem kleine Unterschiede
  - Braucht überall leistungsfähigere Experimente



Zusammenfassung des Szenarios

Zusammenfassung des Szenarios

- ‘Elementarteilchen’ der Theorie ist nicht, was im Experiment gesehen wird

Zusammenfassung des Szenarios

- ‘Elementarteilchen’ der Theorie ist nicht, was im Experiment gesehen wird
  - Breit akzeptiert für die starke Wechselwirkung, aber radikal für die schwache Wechselwirkung/Higgs

Zusammenfassung des Szenarios

- ‘Elementarteilchen’ der Theorie ist nicht, was im Experiment gesehen wird
  - Breit akzeptiert für die starke Wechselwirkung, aber radikal für die schwache Wechselwirkung/Higgs
  - Das Problem ist zwar seit den 1970er bekannt, aber kaum beachtet [Osterwalder, Seiler, Elitzur,...]

Zusammenfassung des Szenarios

- ‘Elementarteilchen’ der Theorie ist nicht, was im Experiment gesehen wird
  - Breit akzeptiert für die starke Wechselwirkung, aber radikal für die schwache Wechselwirkung/Higgs
  - Das Problem ist zwar seit den 1970er bekannt, aber kaum beachtet [Osterwalder, Seiler, Elitzur,...]
- Winzige Effekte im Standardmodell

Zusammenfassung des Szenarios

- ‘Elementarteilchen’ der Theorie ist nicht, was im Experiment gesehen wird
  - Breit akzeptiert für die starke Wechselwirkung, aber radikal für die schwache Wechselwirkung/Higgs
  - Das Problem ist zwar seit den 1970er bekannt, aber kaum beachtet [Osterwalder, Seiler, Elitzur,...]
- Winzige Effekte im Standardmodell
- Aber sehr weitreichende Konsequenzen für die Suche nach neuer Physik (erste Anzeichen dafür ab 2015) [Maas, Törek, Sondenheimer,...]

Zusammenfassung des Szenarios

- ‘Elementarteilchen’ der Theorie ist nicht, was im Experiment gesehen wird
  - Breit akzeptiert für die starke Wechselwirkung, aber radikal für die schwache Wechselwirkung/Higgs
  - Das Problem ist zwar seit den 1970er bekannt, aber kaum beachtet [Osterwalder, Seiler, Elitzur,...]
- Winzige Effekte im Standardmodell
- Aber sehr weitreichende Konsequenzen für die Suche nach neuer Physik (erste Anzeichen dafür ab 2015) [Maas, Törek, Sondenheimer,...]
- Muss daher detailliert getestet werden
  - Experimentell und theoretisch

Test des Szenarios

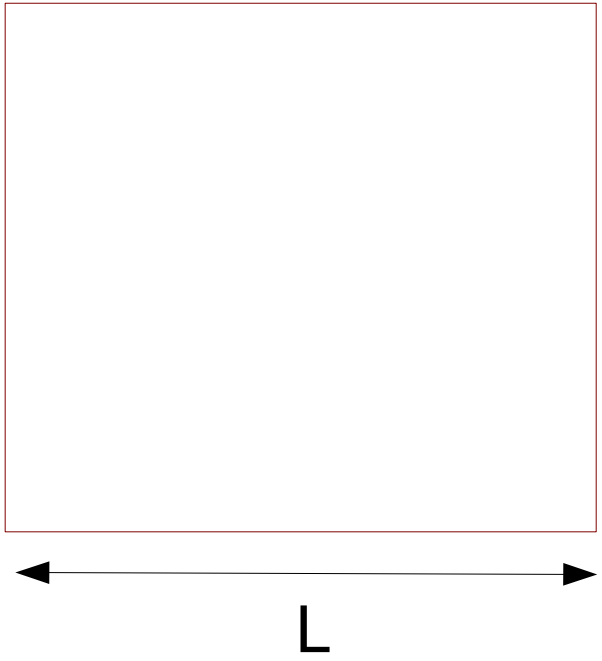
Theorie und Experiment

Theorie

Oder: Was wir in Graz tun

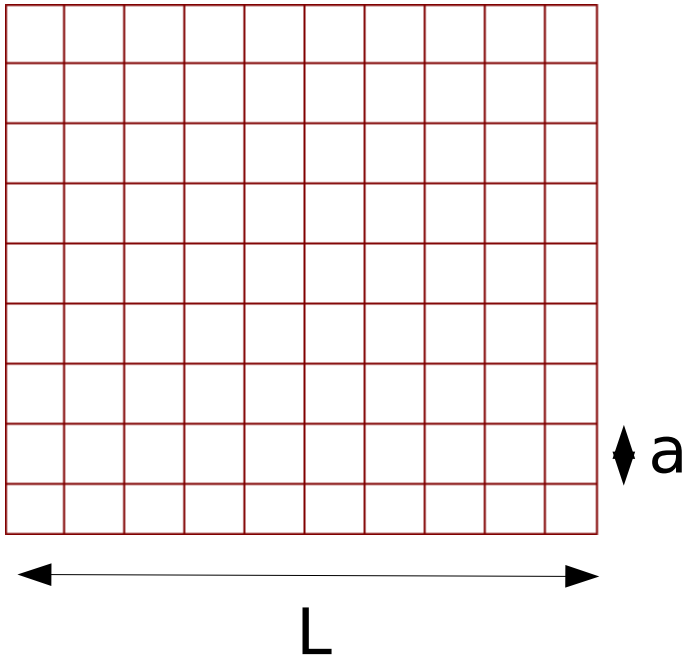
Computersimulationen

- Verwendung eines endlichen Volumens – normalerweise ein (Hyper)würfel



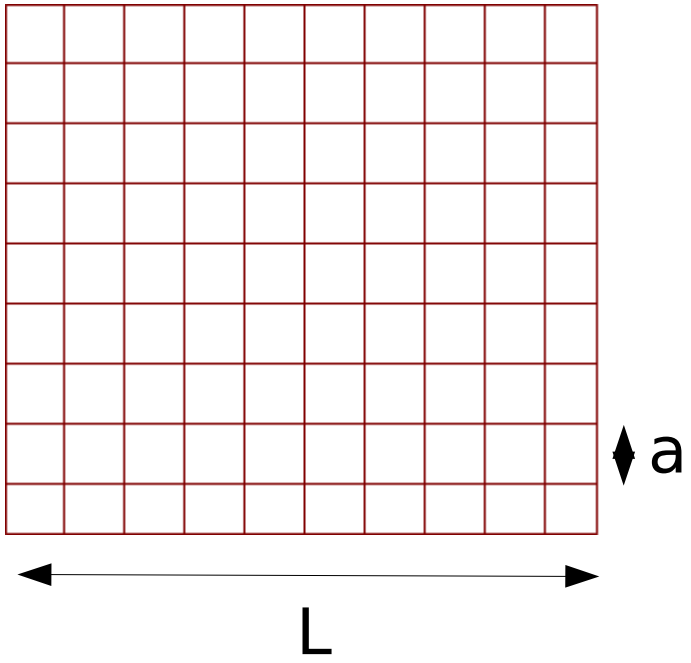
Computersimulationen

- Verwendung eines endlichen Volumens – normalerweise ein (Hyper)würfel
- Reduzieren auf ein Raster: Endlicher Gitterwürfel



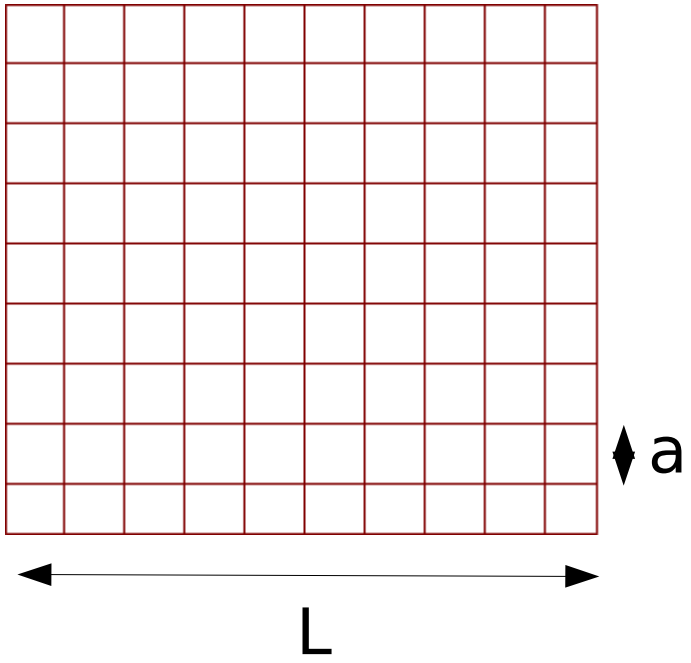
Computersimulationen

- Verwendung eines endlichen Volumens – normalerweise ein (Hyper)würfel
- Reduzieren auf ein Raster: Endlicher Gitterwürfel
- Berechne alle Größen
  - Numerisch aufwendig
  - Möglich mit geeigneten (Monte-Carlo) Methoden



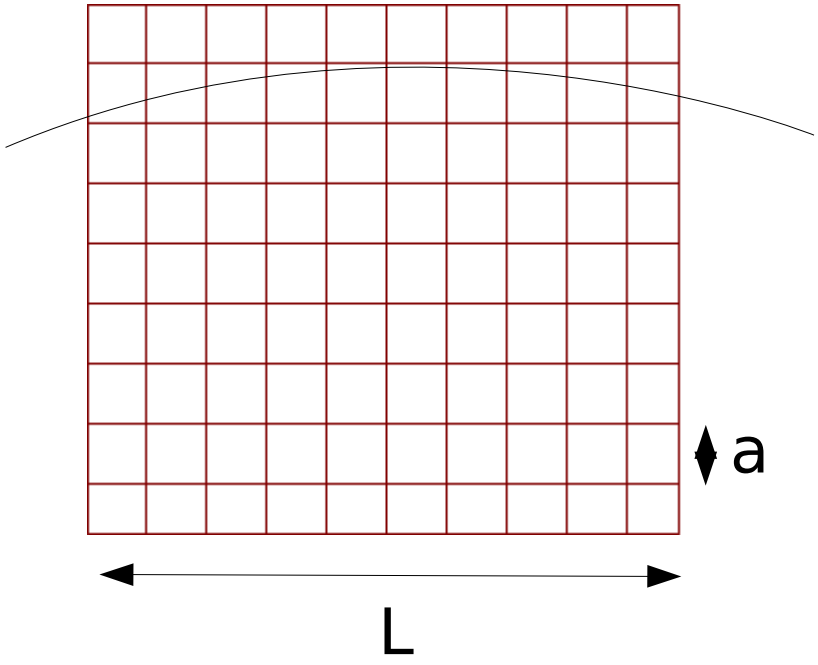
Computersimulationen

- Verwendung eines endlichen Volumens – normalerweise ein (Hyper)würfel
- Reduzieren auf ein Raster: Endlicher Gitterwürfel
- Berechne alle Größen
  - Numerisch aufwendig
  - Möglich mit geeigneten (Monte-Carlo) Methoden
- Probleme
  - Endliches Gitter



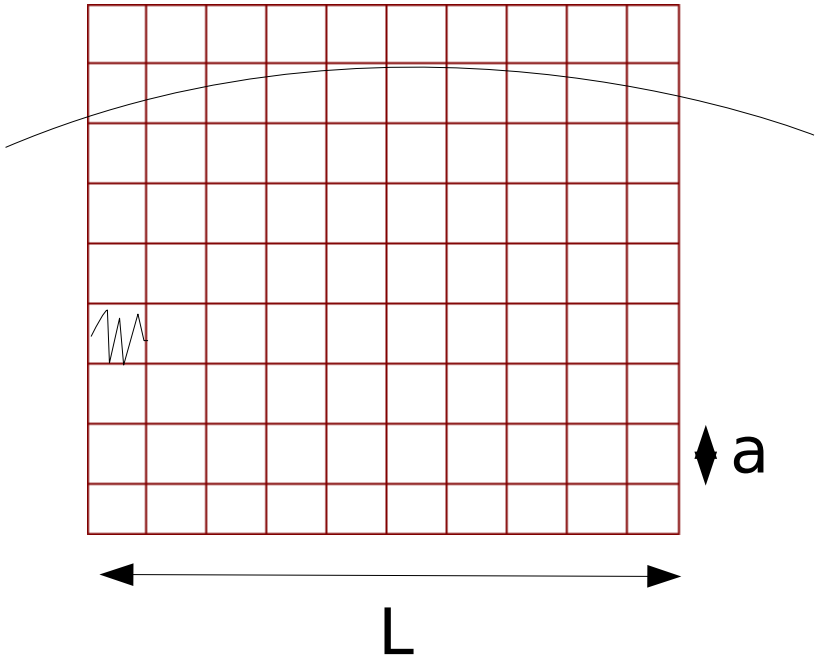
Computersimulationen

- Verwendung eines endlichen Volumens – normalerweise ein (Hyper)würfel
- Reduzieren auf ein Raster: Endlicher Gitterwürfel
- Berechne alle Größen
  - Numerisch aufwendig
  - Möglich mit geeigneten (Monte-Carlo) Methoden
- Probleme
  - Endliches Gitter
  - Zu groß ein Problem



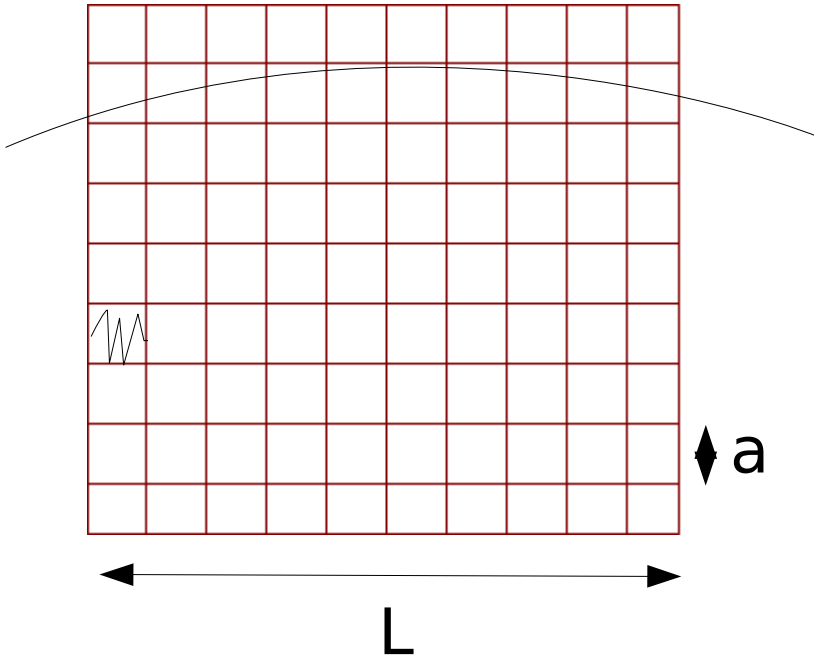
Computersimulationen

- Verwendung eines endlichen Volumens – normalerweise ein (Hyper)würfel
- Reduzieren auf ein Raster: Endlicher Gitterwürfel
- Berechne alle Größen
  - Numerisch aufwendig
  - Möglich mit geeigneten (Monte-Carlo) Methoden
- Probleme
  - Endliches Gitter
  - Zu groß/klein ein Problem



Computersimulationen

- Verwendung eines endlichen Volumens – normalerweise ein (Hyper)würfel
- Reduzieren auf ein Raster: Endlicher Gitterwürfel
- Berechne alle Größen
  - Numerisch aufwendig
  - Möglich mit geeigneten (Monte-Carlo) Methoden
- Probleme
  - Endliches Gitter
  - Zu groß/klein ein Problem
  - Kann kontrolliert werden



Ergebnisse unserer Aktivitäten

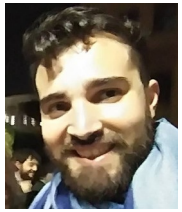
Ergebnisse unserer Aktivitäten

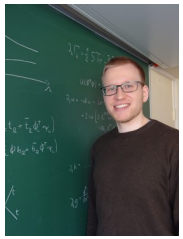
- Bestätigung der Struktur von Higgs und W/Z

Ergebnisse unserer Aktivitäten

- Bestätigung der Struktur von Higgs und W/Z

- Bestätigung für eine vereinfachte Version der Leptonen
  - Einschließlich Massendefekt

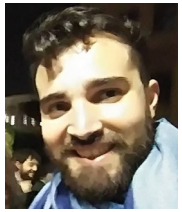


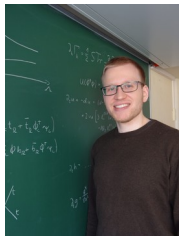


Ergebnisse unserer Aktivitäten

- Bestätigung der Struktur von Higgs und W/Z

- Bestätigung für eine vereinfachte Version der Leptonen
  - Einschließlich Massendefekt



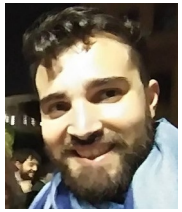


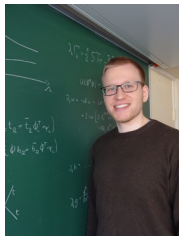
- Der Effekt ist im Standardmodell klein, aber Abweichungen sind prinzipiell beobachtbar

Ergebnisse unserer Aktivitäten

- Bestätigung der Struktur von Higgs und W/Z

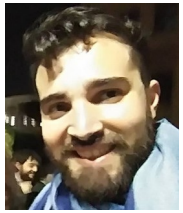
- Bestätigung für eine vereinfachte Version der Leptonen
  - Einschließlich Massendefekt





- Der Effekt ist im Standardmodell klein, aber Abweichungen sind prinzipiell beobachtbar

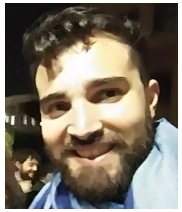
- Bestätigung der qualitativen Änderungen für einige Szenarios neuer Physik

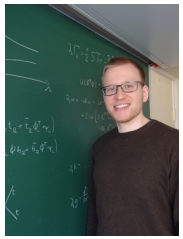


Ergebnisse unserer Aktivitäten

- Bestätigung der Struktur von Higgs und W/Z

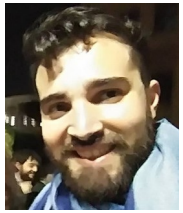
- Bestätigung für eine vereinfachte Version der Leptonen
  - Einschließlich Massendefekt



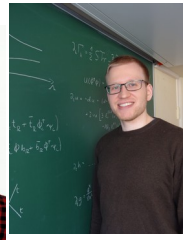


- Der Effekt ist im Standardmodell klein, aber Abweichungen sind prinzipiell beobachtbar

- Bestätigung der qualitativen Änderungen für einige Szenarios neuer Physik



- Zusätzlich: Viele andere (Papier-und-Bleistift-)Rechnungen, die das Szenario stützen



Experiment

Wo könnte man was sehen?

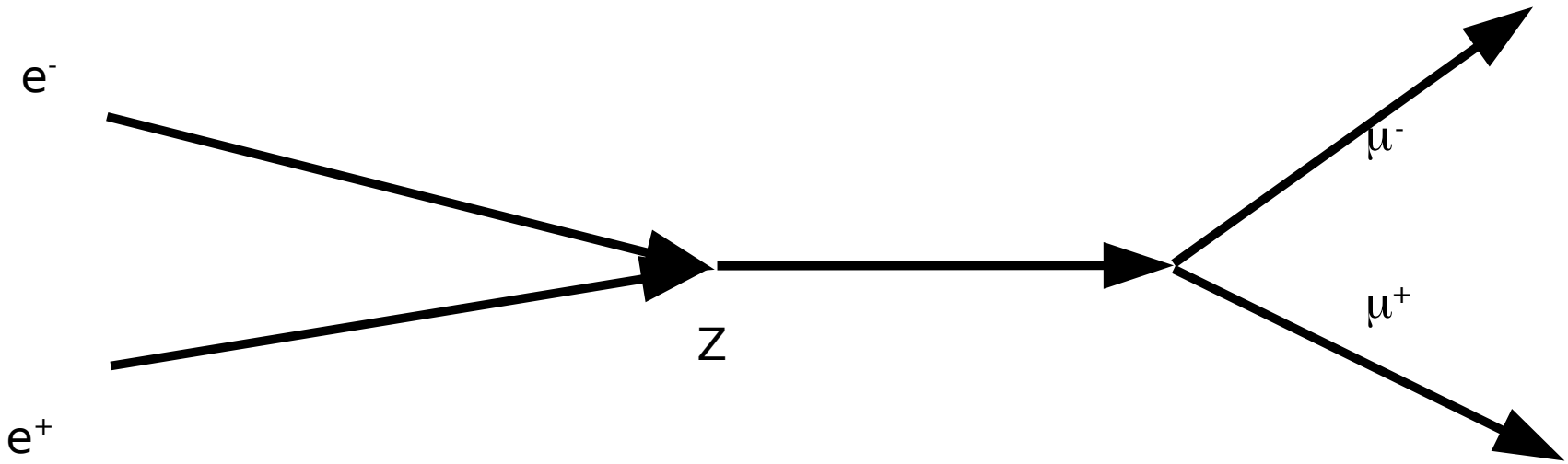
Experiment

Wo könnte man was sehen?
Viele Näherungen
Nur ein Erkunden qualitativer Möglichkeiten

Experiment

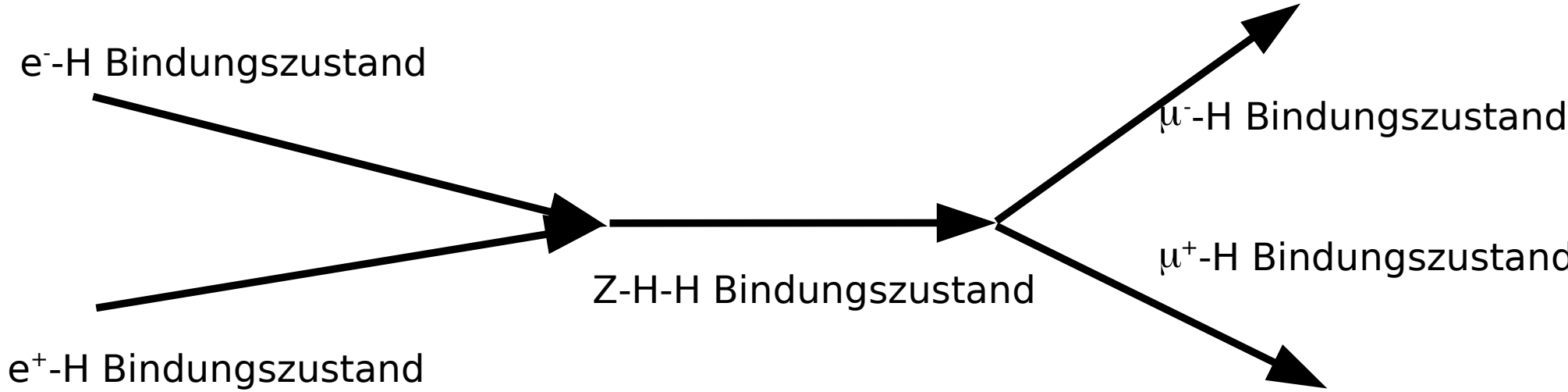
Wo könnte man was sehen?
Viele Näherungen
Nur ein Erkunden qualitativer Möglichkeiten
Und wo man schauen sollte

Standardbild (LEP/ILC)



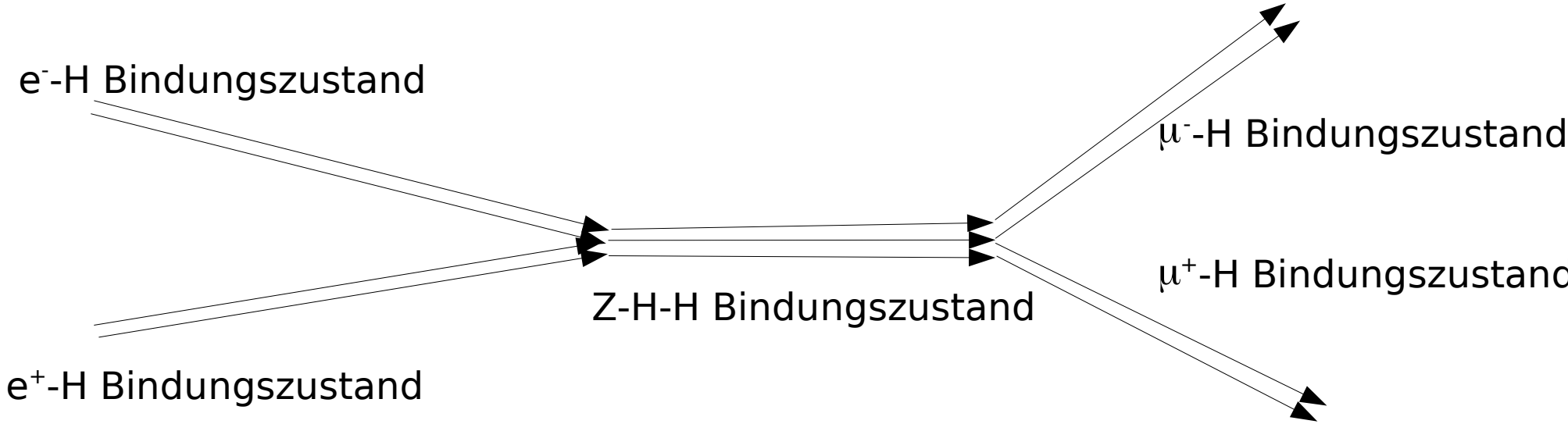
- Kollision elementarer Teilchen

Verbessertes Bild (LEP/ILC)



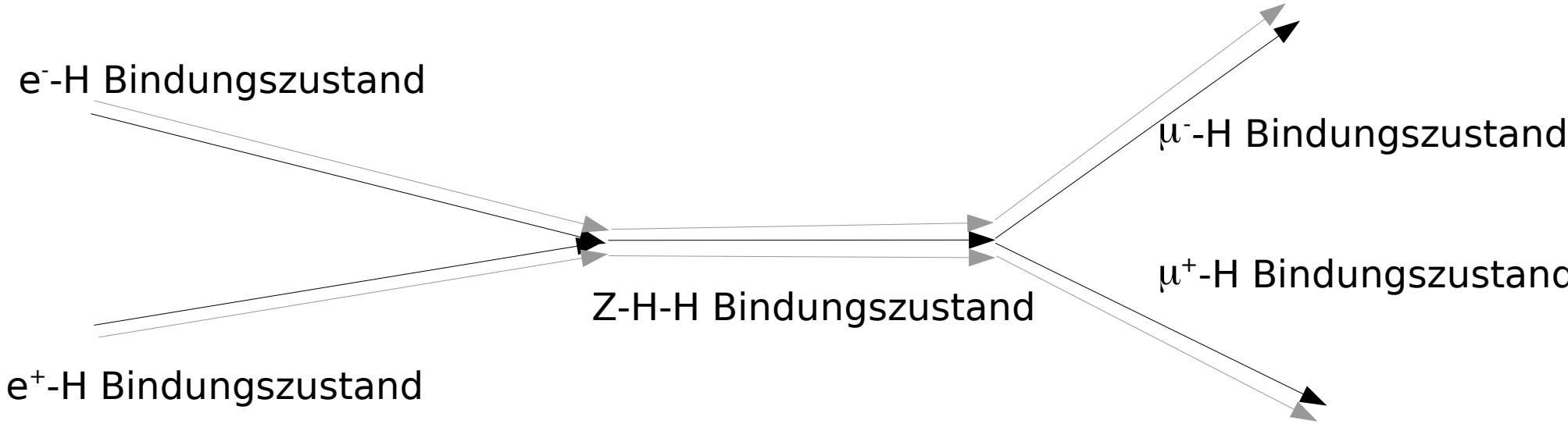
- Kollision von Bindungszuständen

Verbessertes Bild (LEP/ILC)



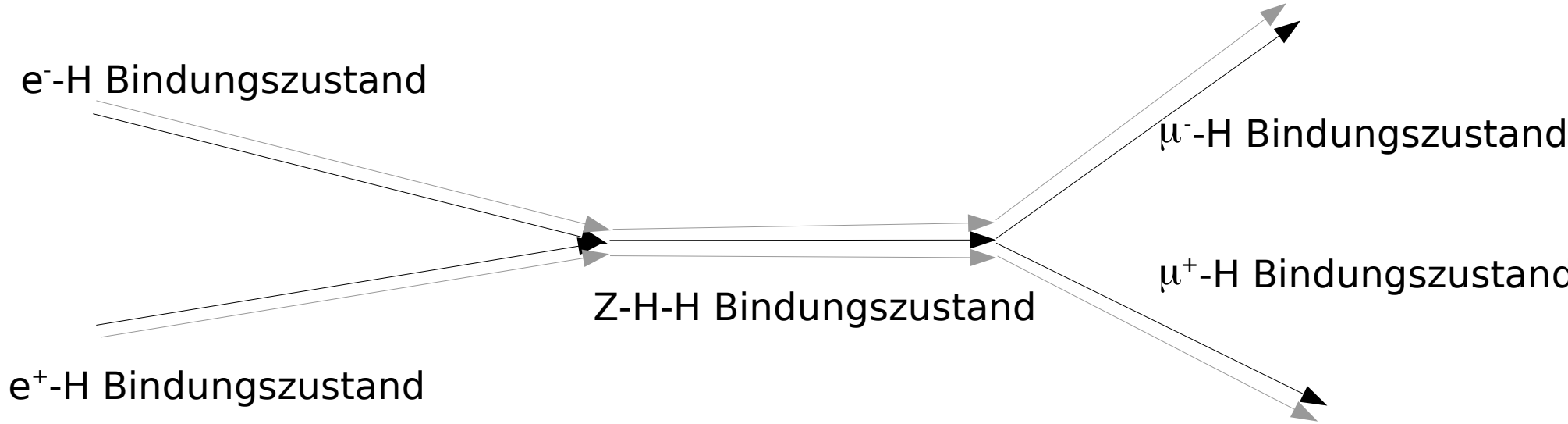
- Kollision von Bindungszuständen
  - 'Baustein'-Teilchen

Verbessertes Bild (LEP/ILC)



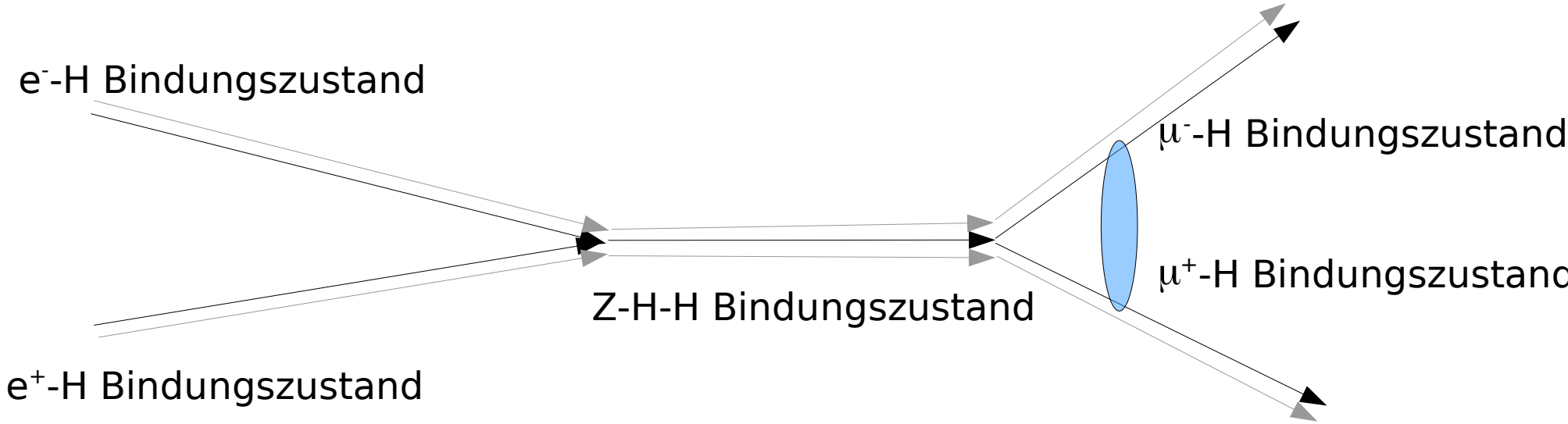
- Kollision von Bindungszuständen
  - 'Baustein’-Teilchen
- Higgsbausteine sind erstmal nur Zuschauer
  - Konzept generisch für solche Kollisionen

Verbessertes Bild (LEP/ILC)



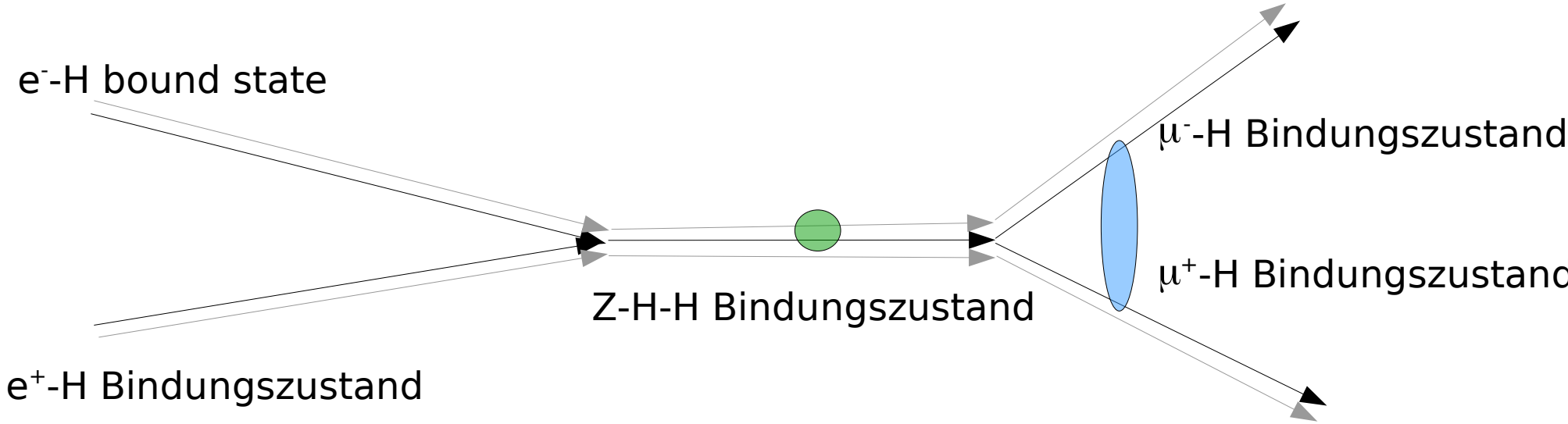
- Kollision von Bindungszuständen
  - 'Baustein'-Teilchen
- Higgsbausteine sind erstmal nur Zuschauer
  - Konzept generisch für solche Kollisionen
- Zusätzliche Effekte

Verbessertes Bild (LEP/ILC)



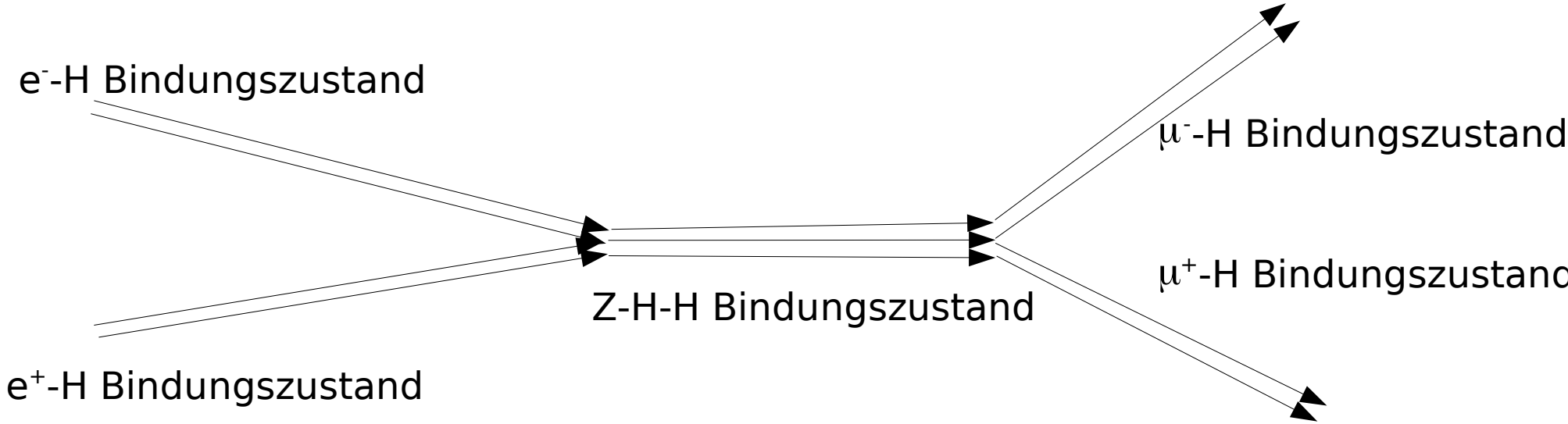
- Kollision von Bindungszuständen
  - 'Baustein'-Teilchen
- Higgsbausteine sind erstmal nur Zuschauer
  - Konzept generisch für solche Kollisionen
- Zusätzliche Effekte
  - Bekannte Effekte: Groß und gemessen

Verbessertes Bild (LEP/ILC)



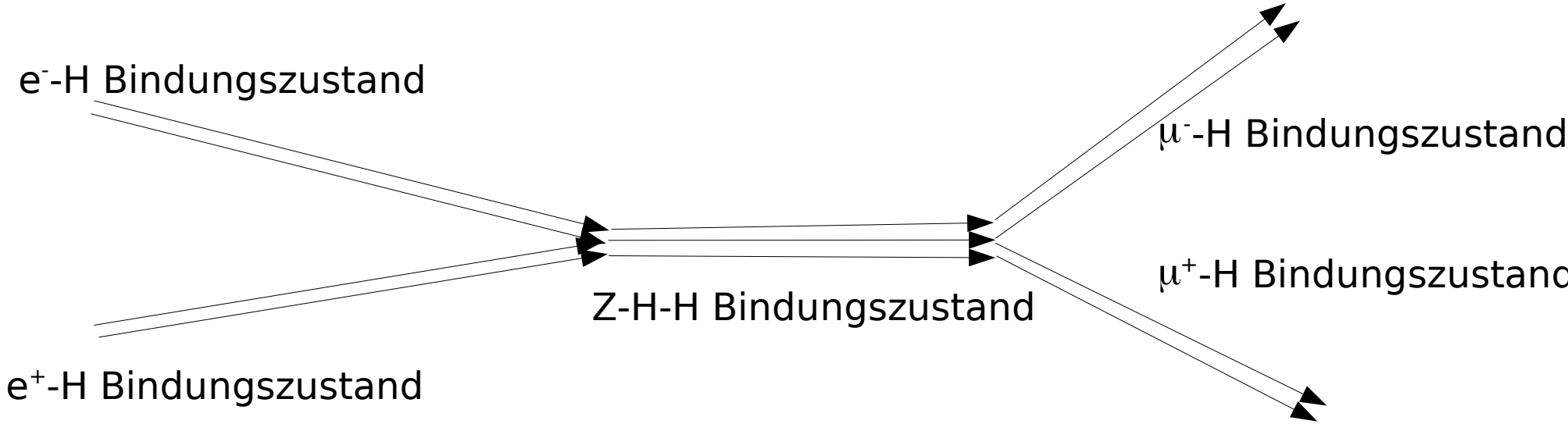
- Kollision von Bindungszuständen
  - 'Baustein'-Teilchen
- Higgsbausteine sind erstmal nur Zuschauer
  - Konzept generisch für solche Kollisionen
- Zusätzliche Effekte
  - Bekannte Effekte: Groß und gemessen
  - Neue: Klein, braucht hohe Sensitivität

Verbessertes Bild (LEP/ILC)



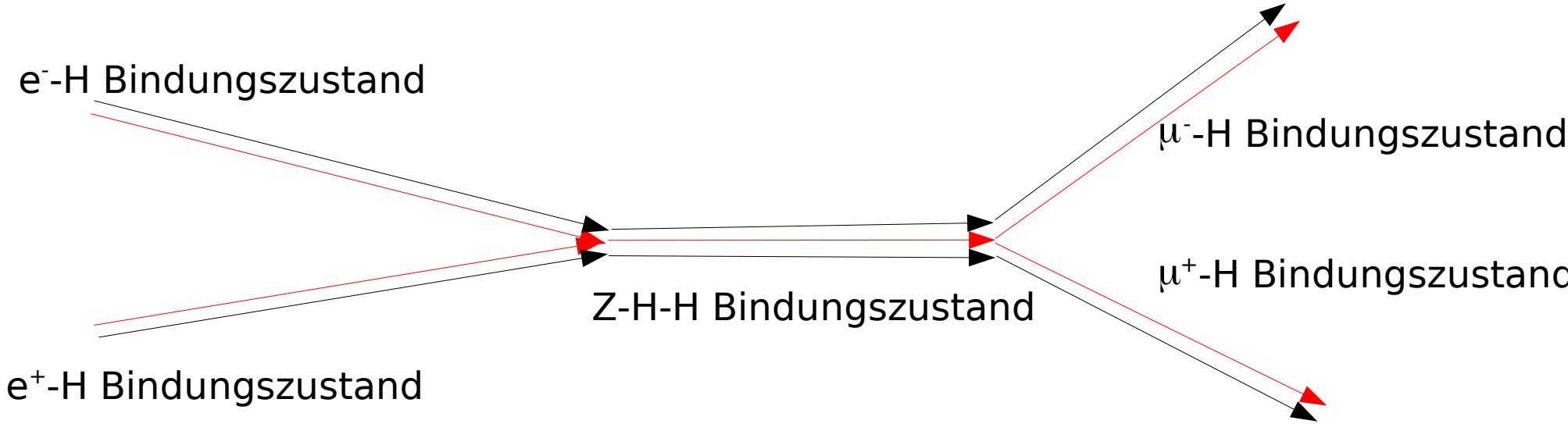
- Wie kann man die neuen Effekte beschreiben?

Verbessertes Bild (LEP/ILC)



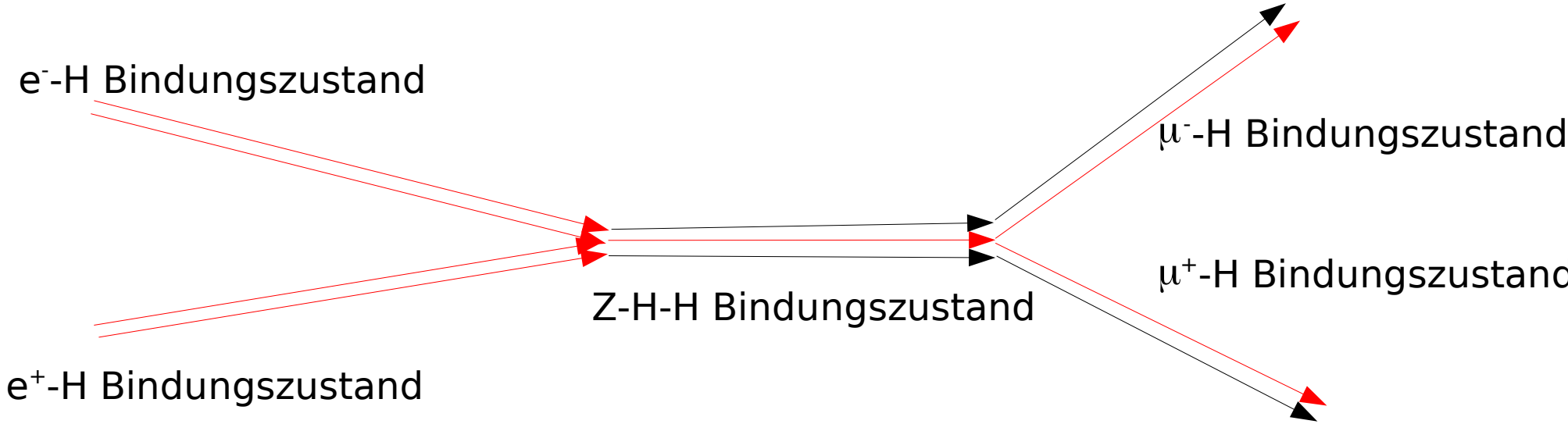
- Wie kann man die neuen Effekte beschreiben?
  - Prozeß wird in drei Teile zerlegt

Verbessertes Bild (LEP/ILC)



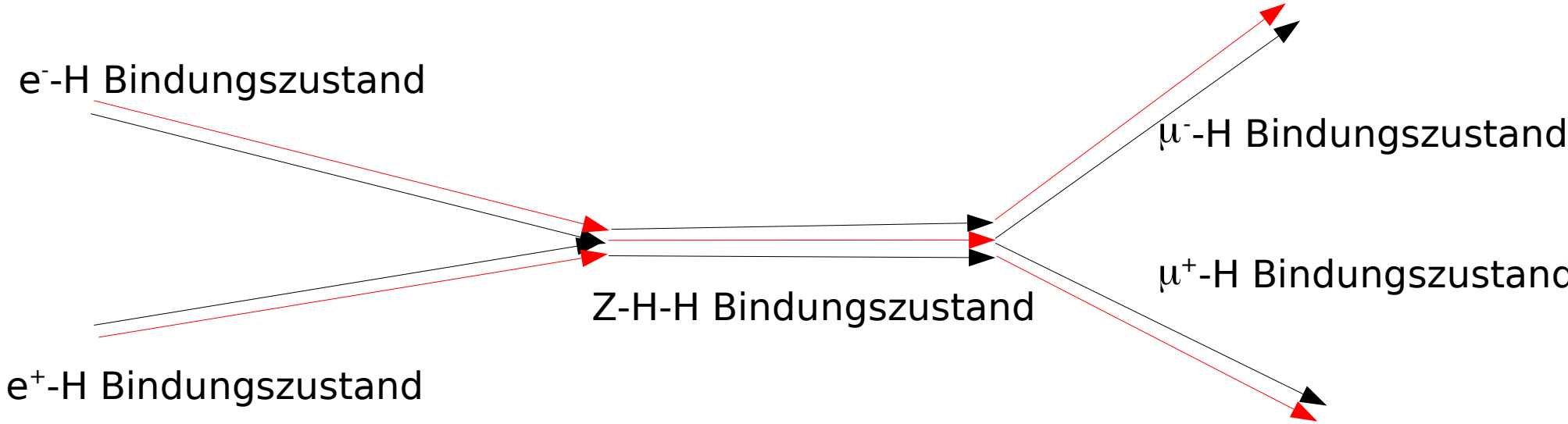
- Wie kann man die neuen Effekte beschreiben?
  - Prozeß wird in drei Teile zerlegt:
  - Bekannte Beiträge

Verbessertes Bild (LEP/ILC)



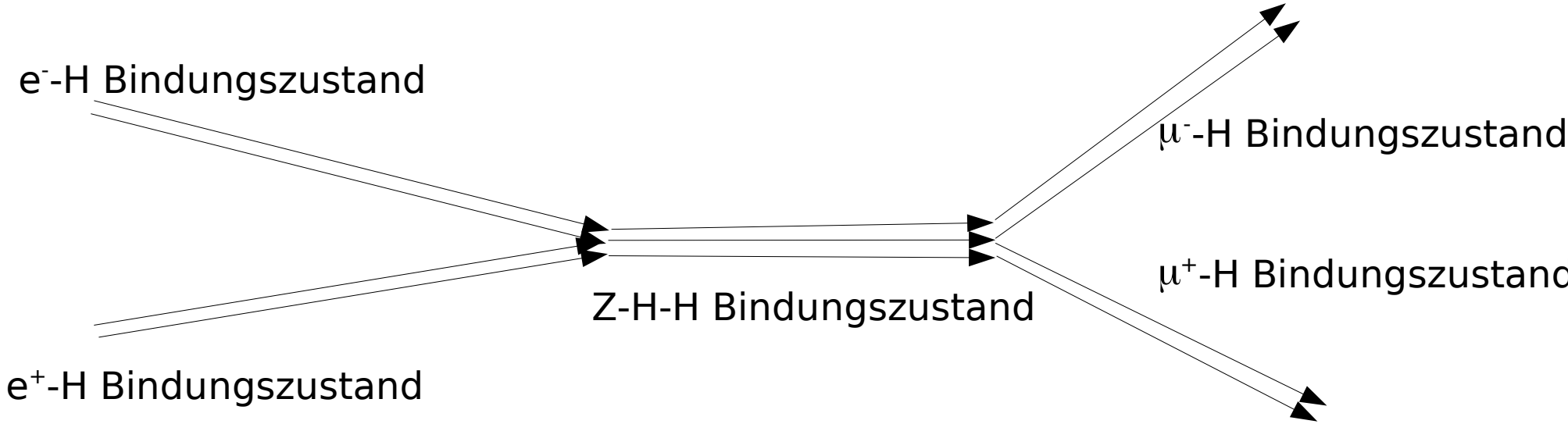
- Wie kann man die neuen Effekte beschreiben?
  - Prozeß wird in drei Teile zerlegt:
  - Bekannte Beiträge
  - Änderungen an diesen

Verbessertes Bild (LEP/ILC)



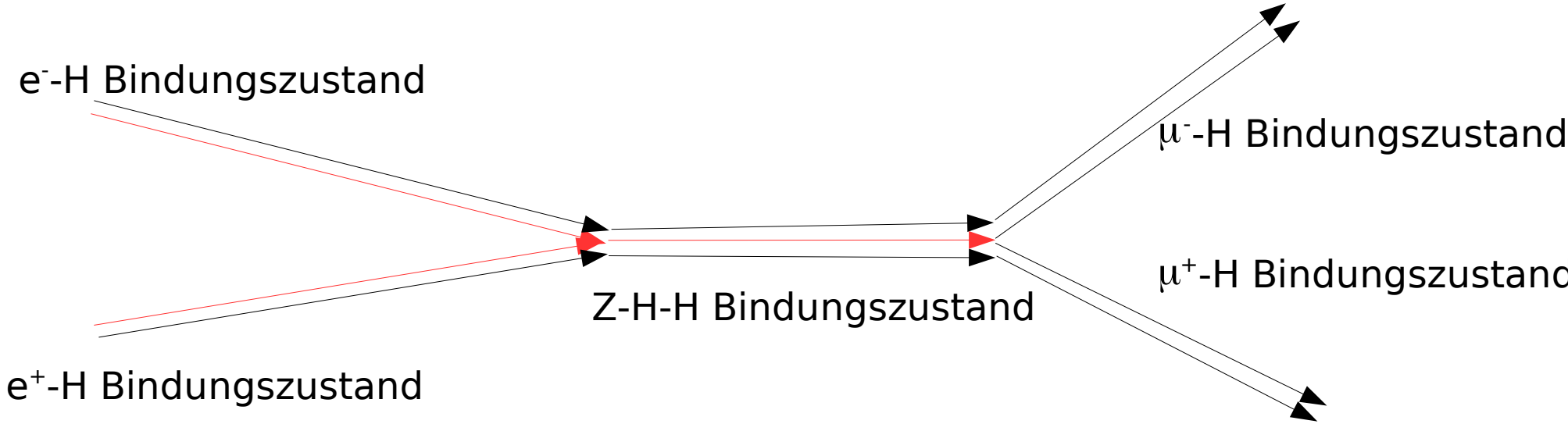
- Wie kann man die neuen Effekte beschreiben?
  - Prozeß wird in drei Teile zerlegt:
  - Bekannte Beiträge
  - Änderungen an diesen
  - Neue durch Reaktionen der Bausteinhiggse

Verbessertes Bild (LEP/ILC)



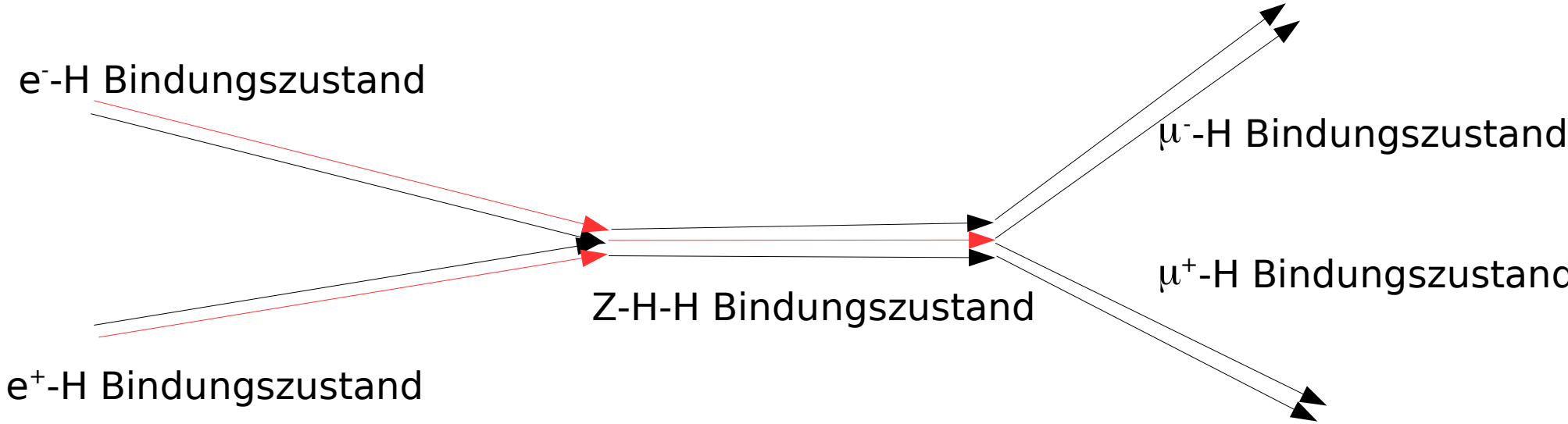
- Erste Näherung: Zerlegung in Schritte

Verbessertes Bild (LEP/ILC)



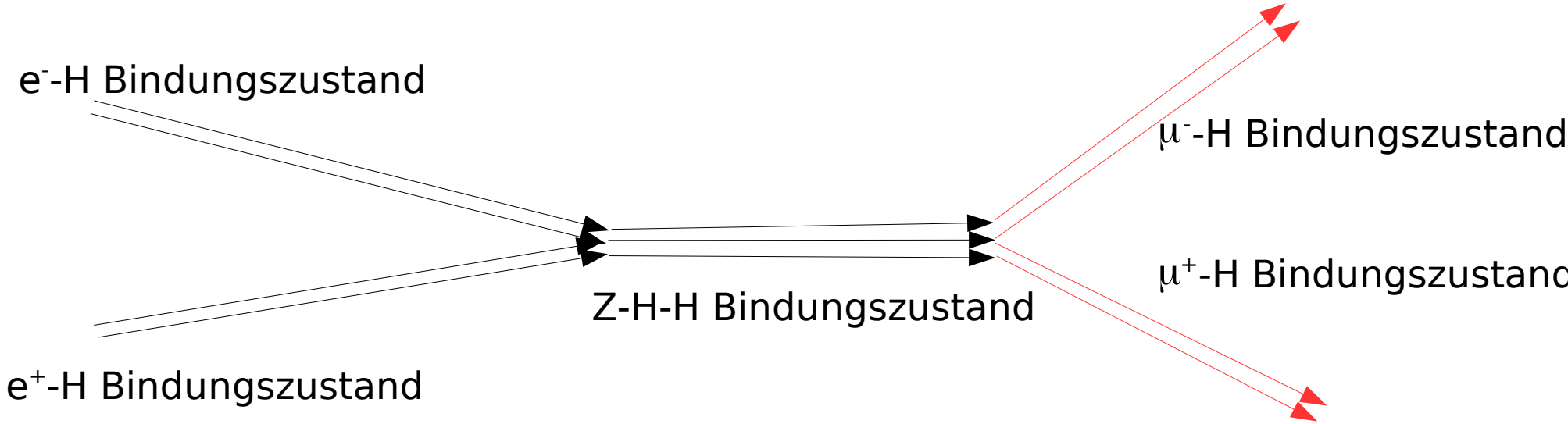
- Erste Näherung: Zerlegung in Schritte
- Wechselwirkende Teilchen entweder Elektronen

Verbessertes Bild (LEP/ILC)



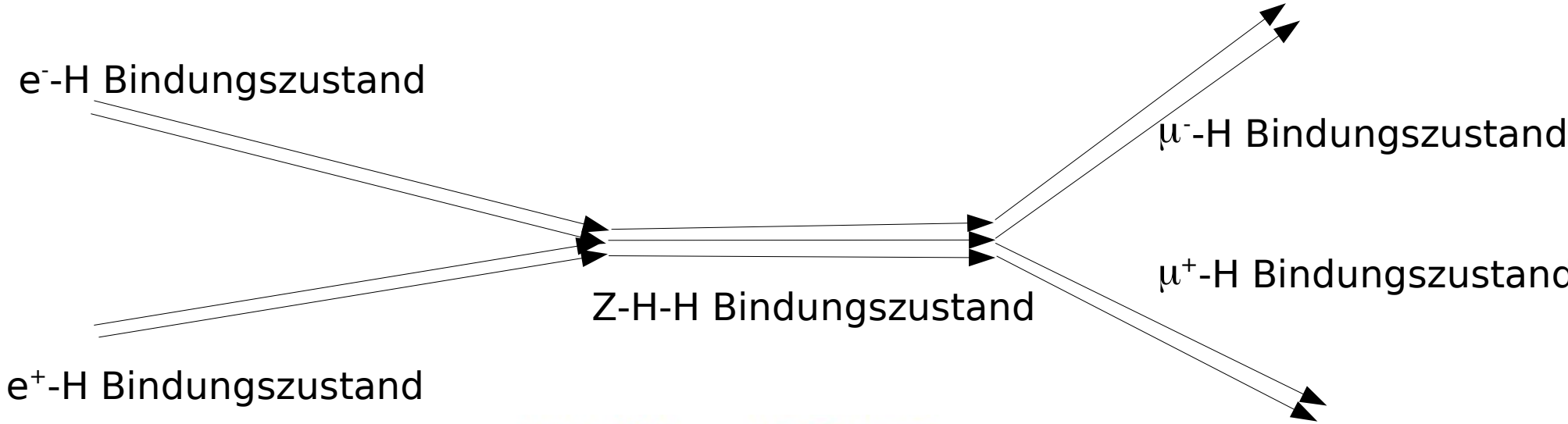
- Erste Näherung: Zerlegung in Schritte
- Wechselwirkende Teilchen entweder Elektronen oder Higgs

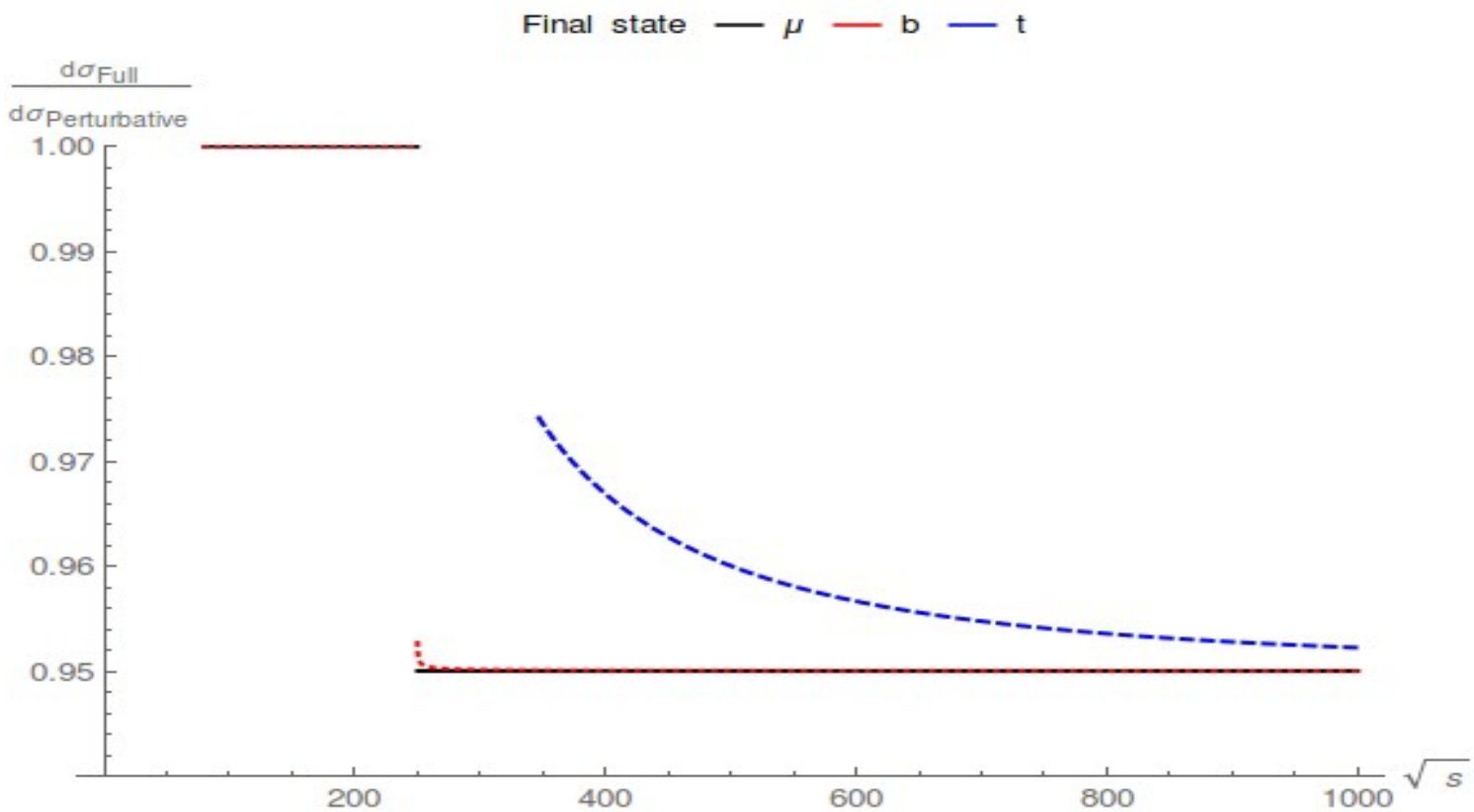
Verbessertes Bild (LEP/ILC)



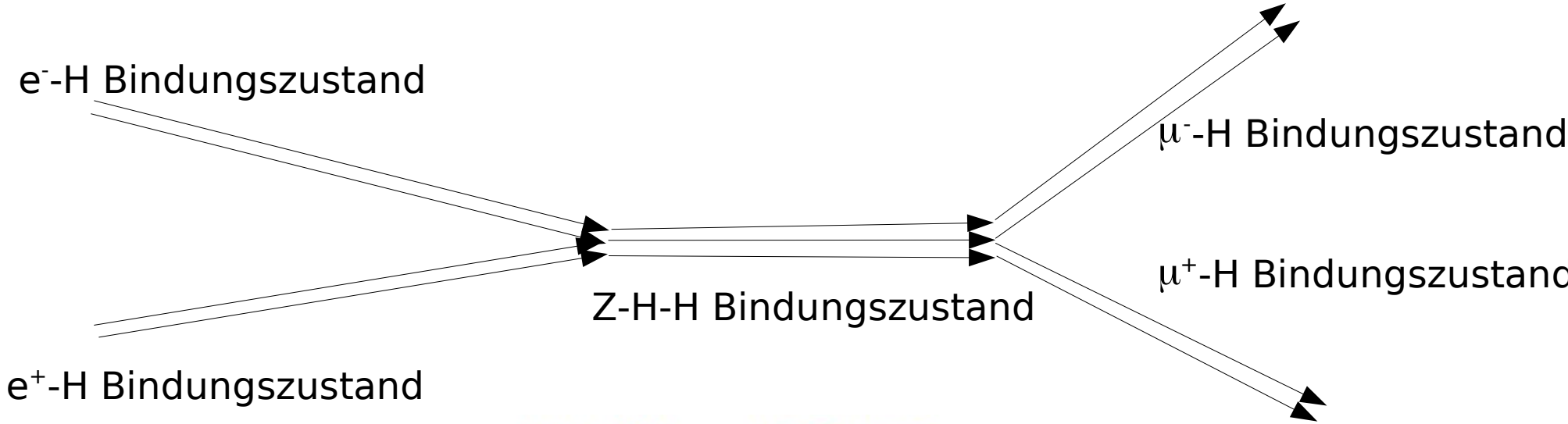
- Erste Näherung: Zerlegung in Schritte
- Wechselwirkende Teilchen entweder Elektronen oder Higgs
- Formierung des Endergebnis im Detektor unabhängig

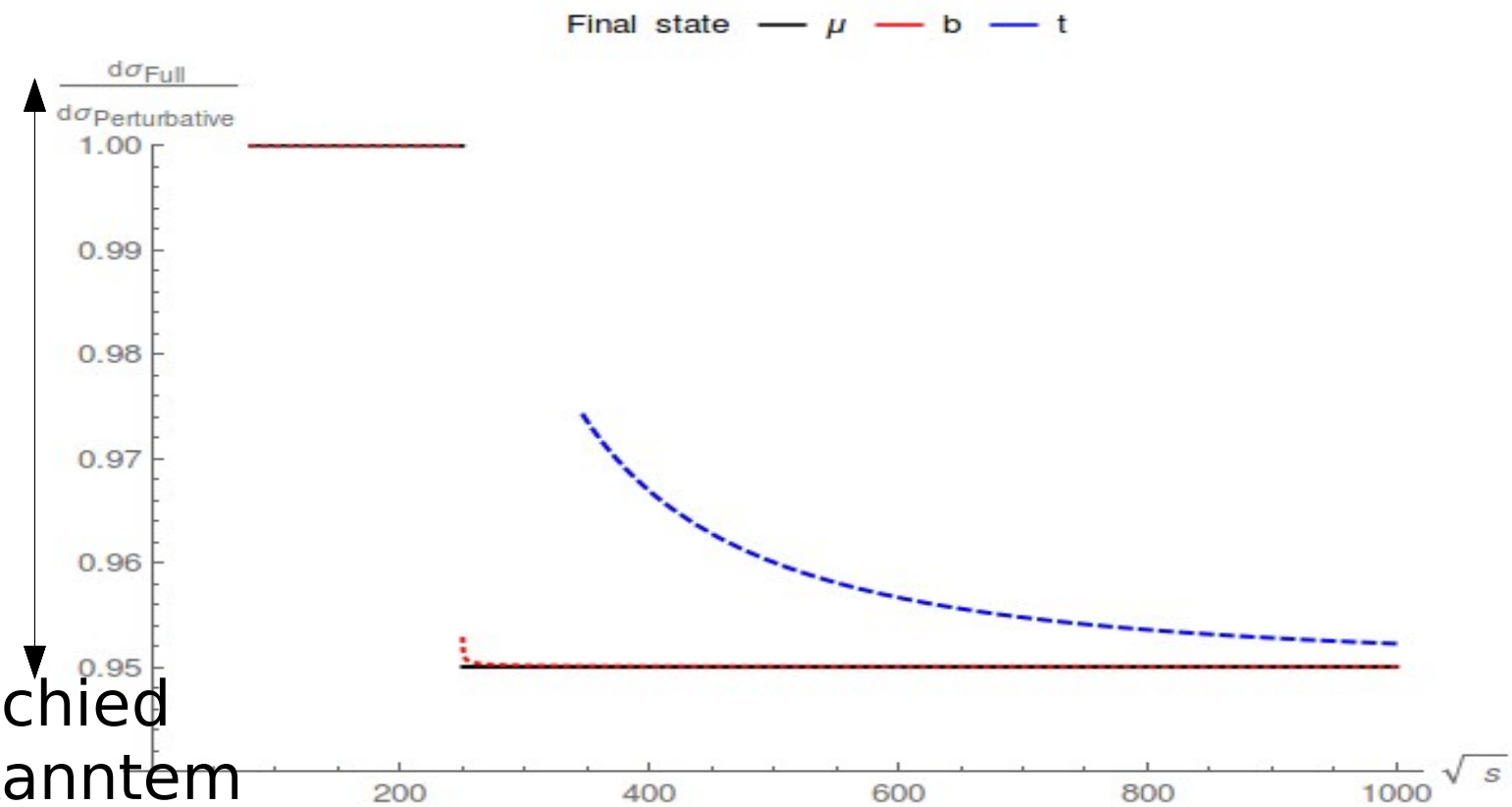
Verbessertes Bild (LEP/ILC)





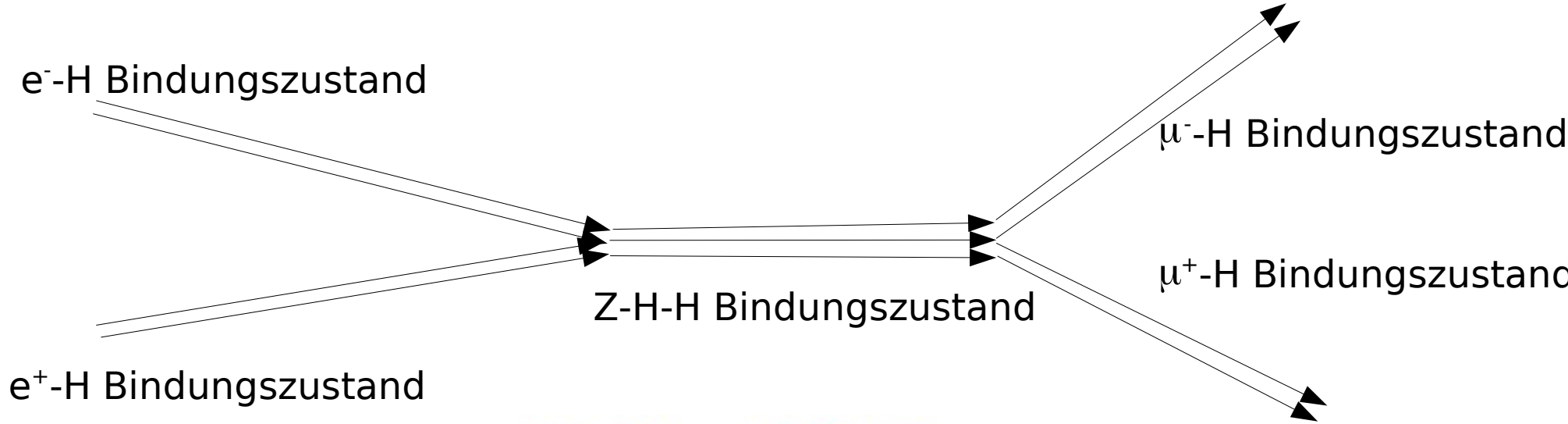
Verbessertes Bild (LEP/ILC)

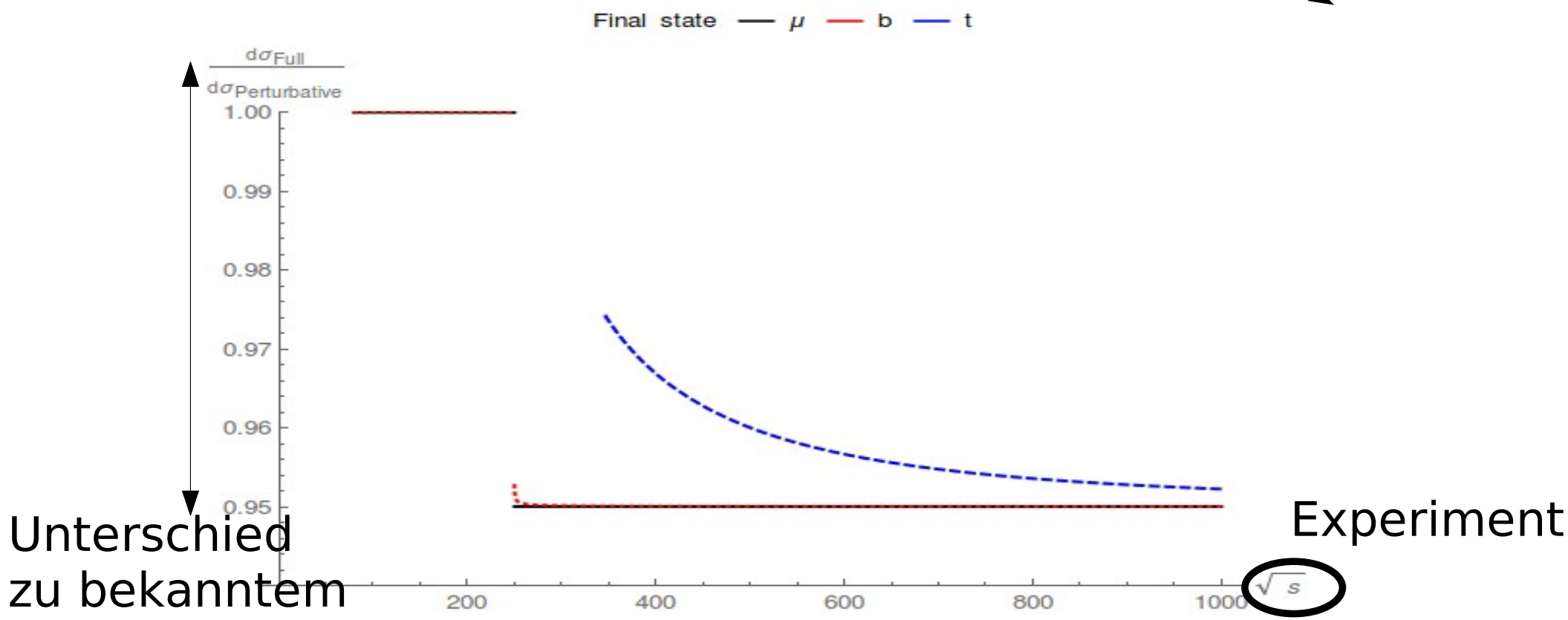




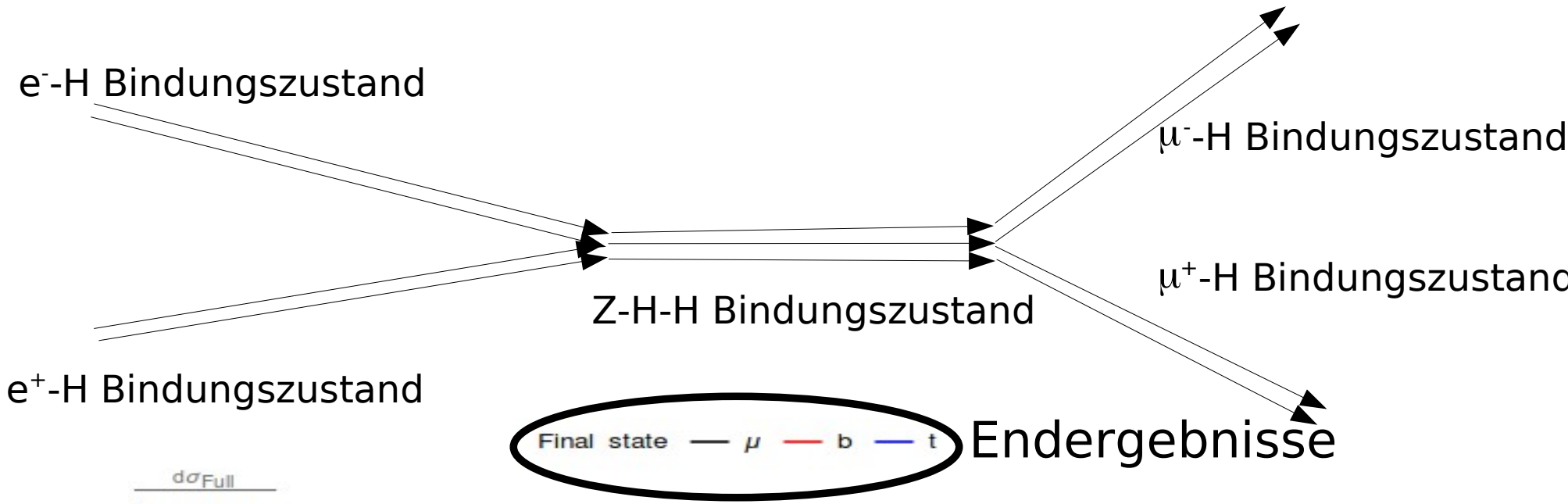
Unterschied
zu bekanntem

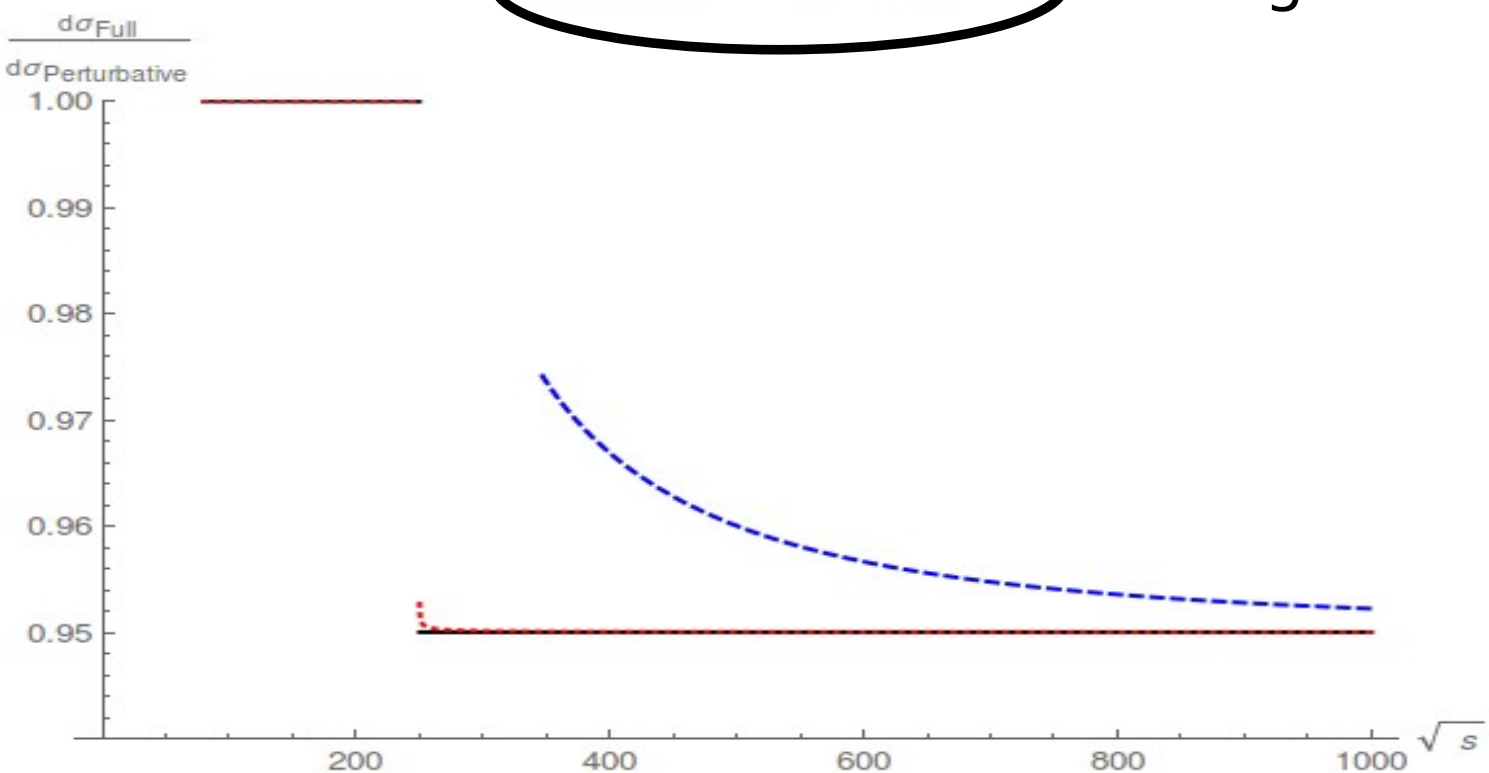
Verbessertes Bild (LEP/ILC)



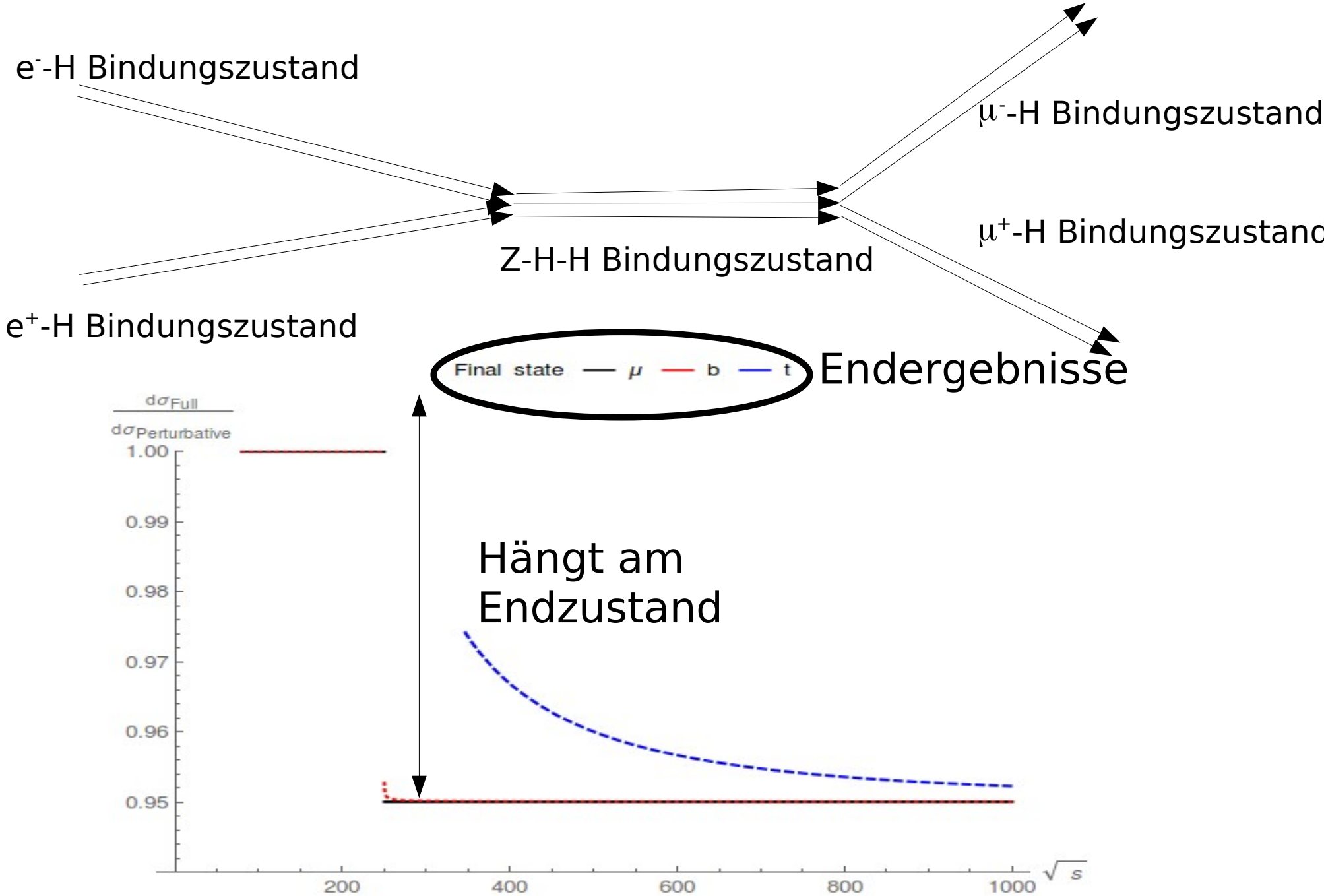


Verbessertes Bild (LEP/ILC)

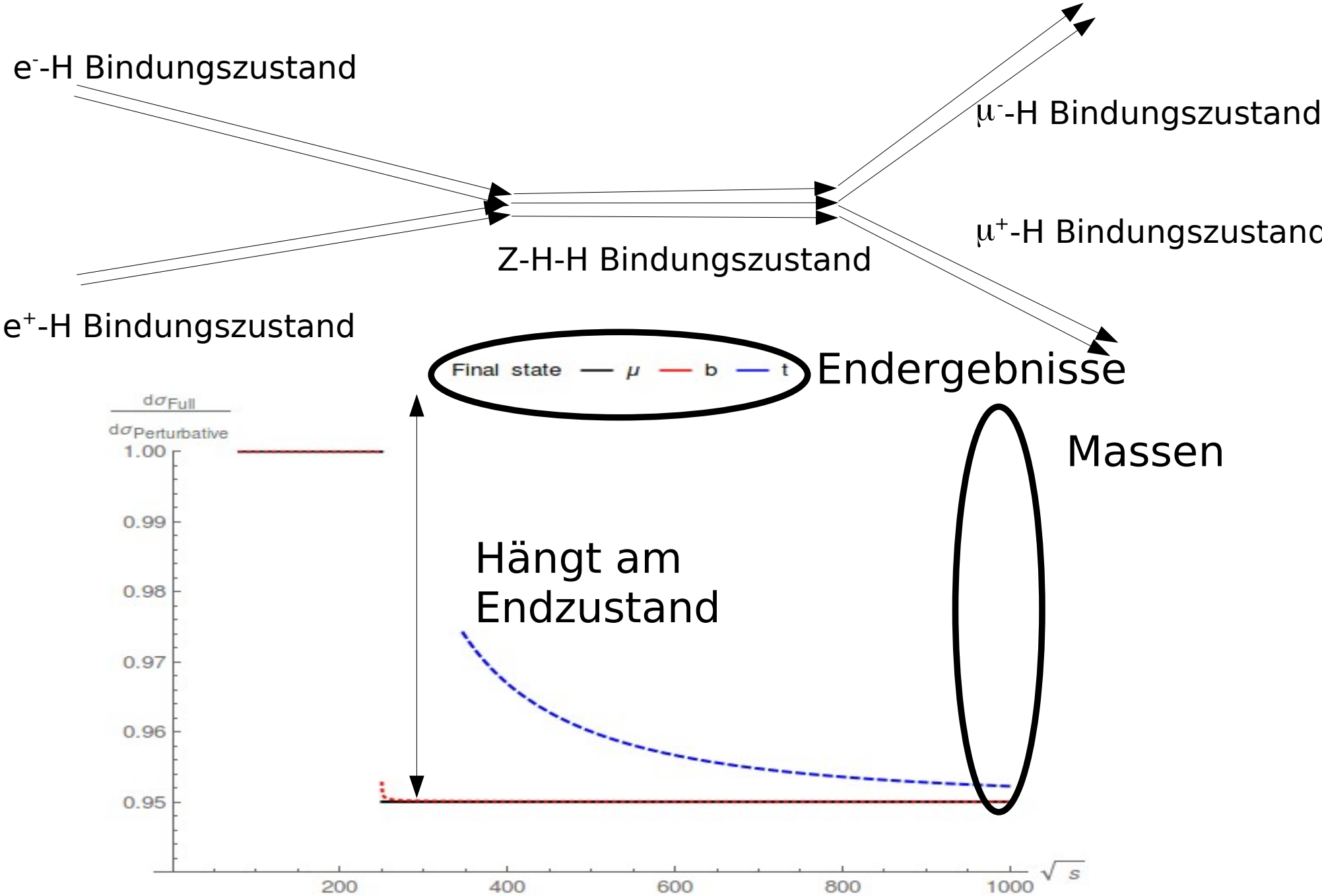




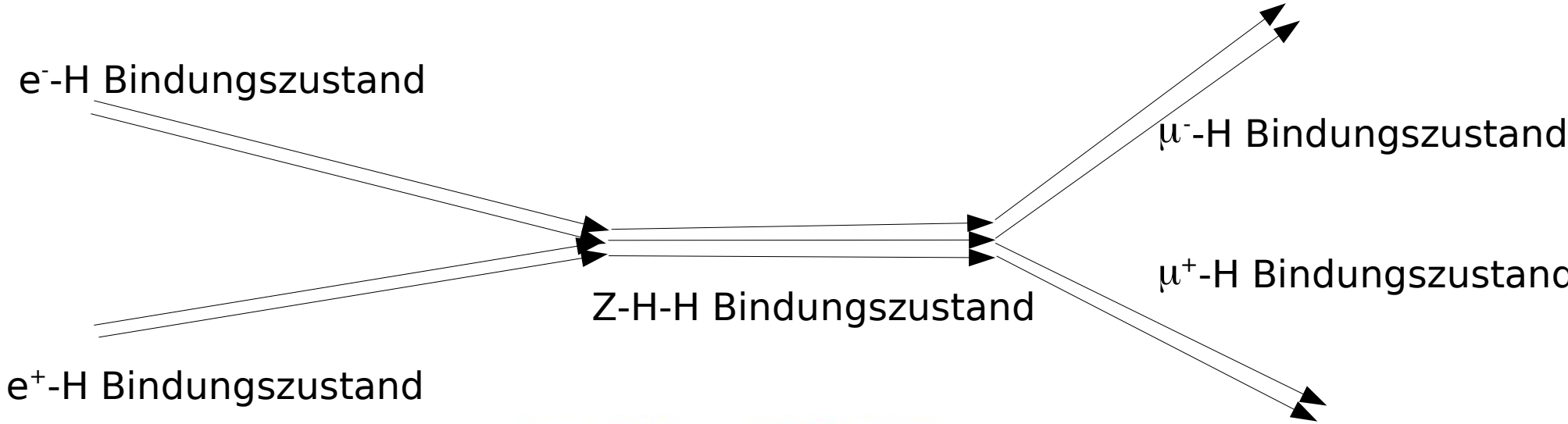
Verbessertes Bild (LEP/ILC)

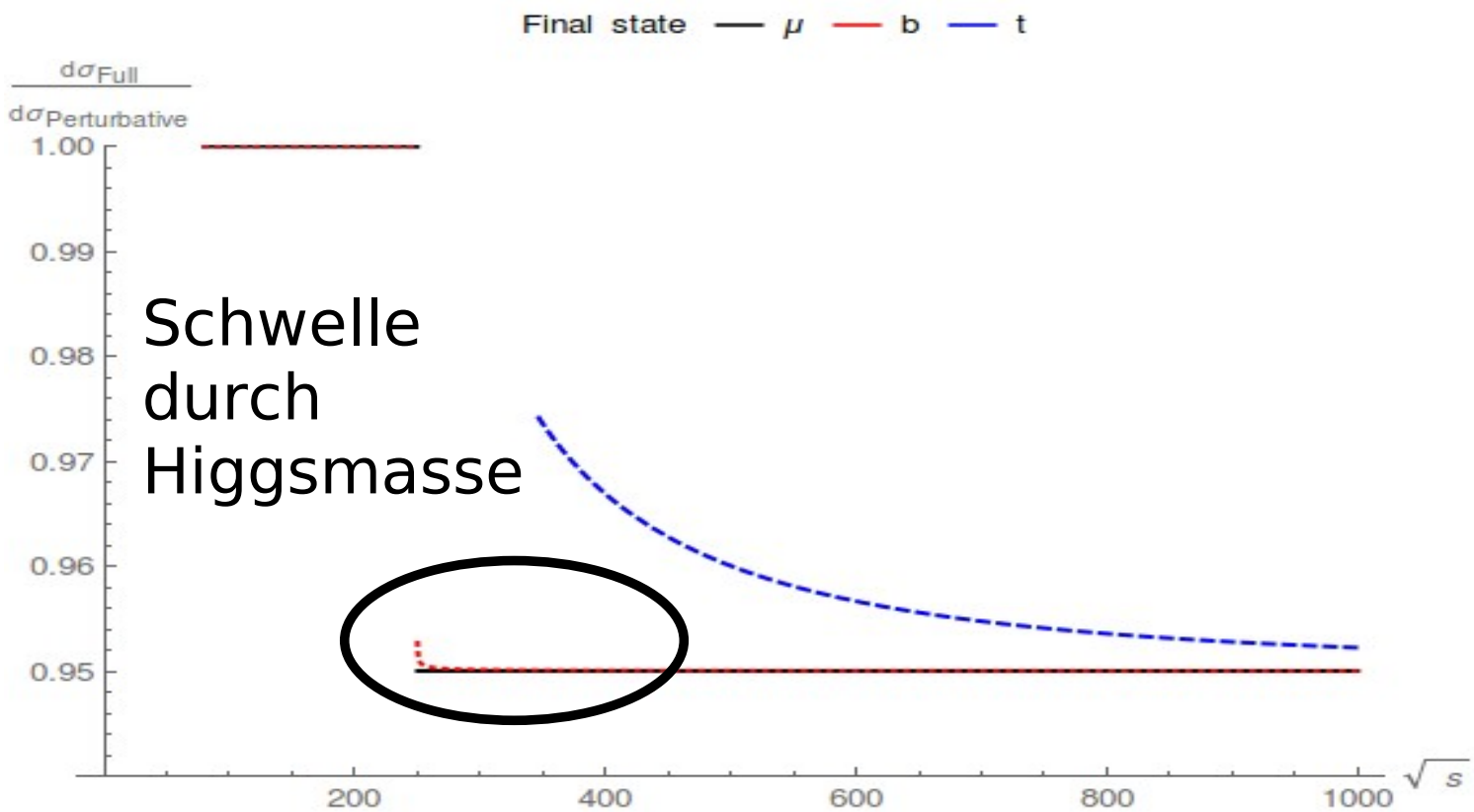


Verbessertes Bild (LEP/ILC)

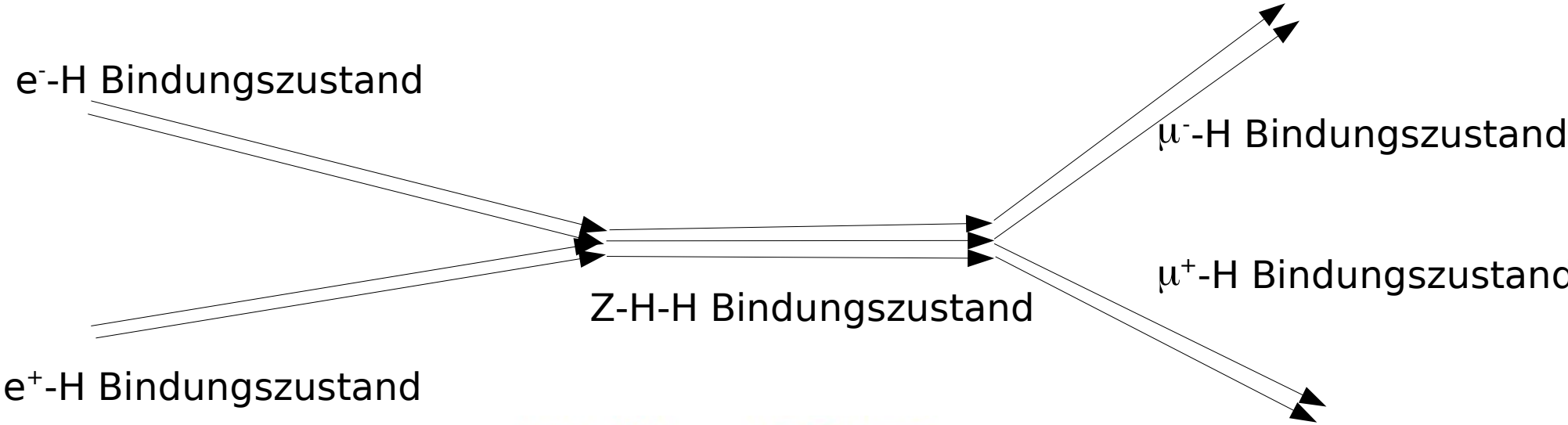


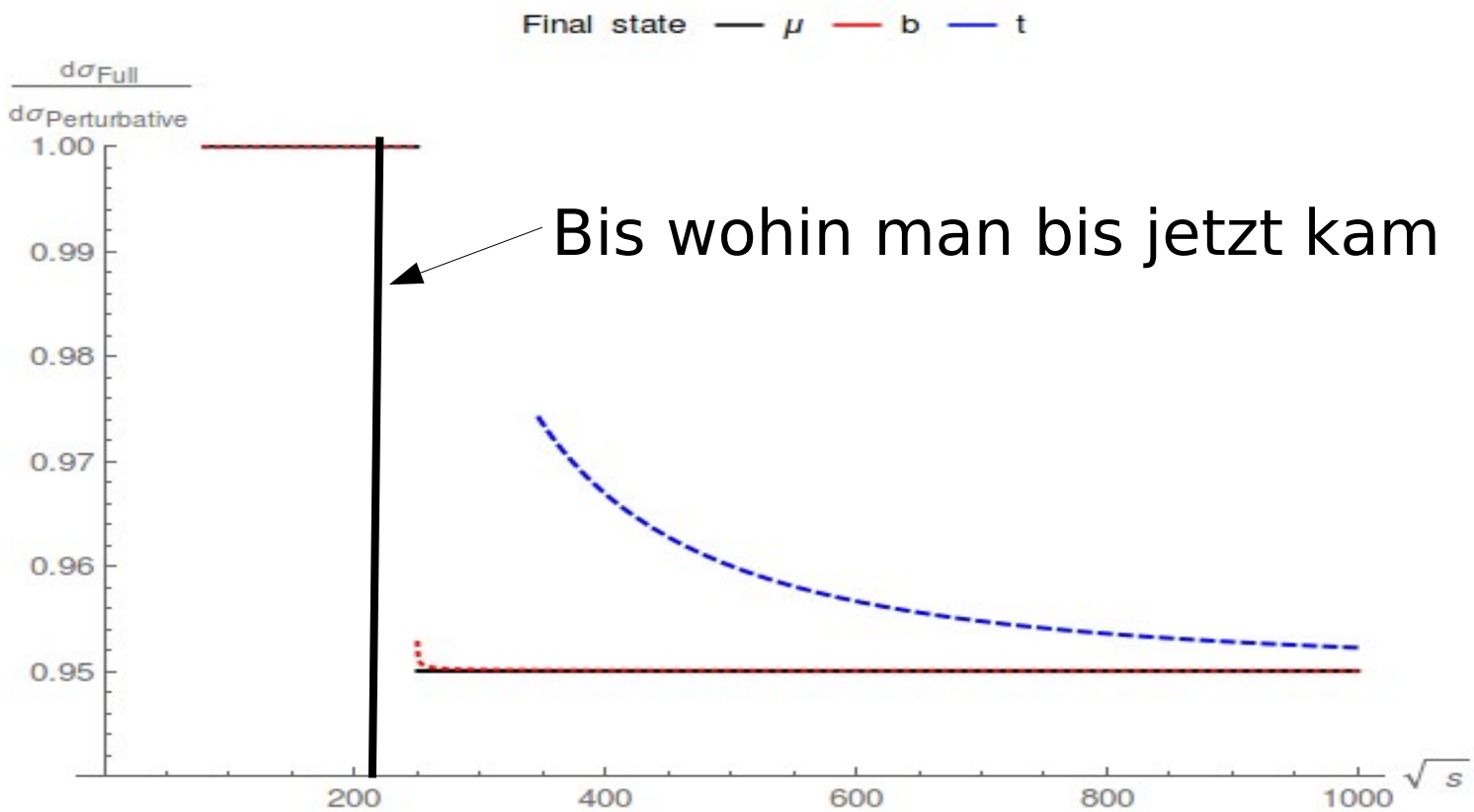
Verbessertes Bild (LEP/ILC)





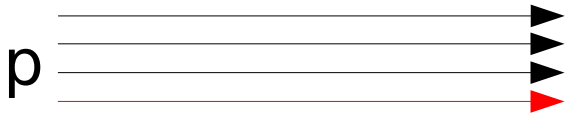
Verbessertes Bild (LEP/ILC)

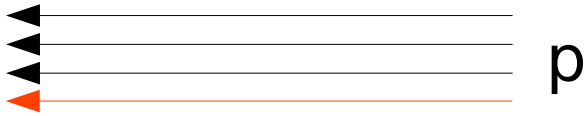




Das Higgs im Proton

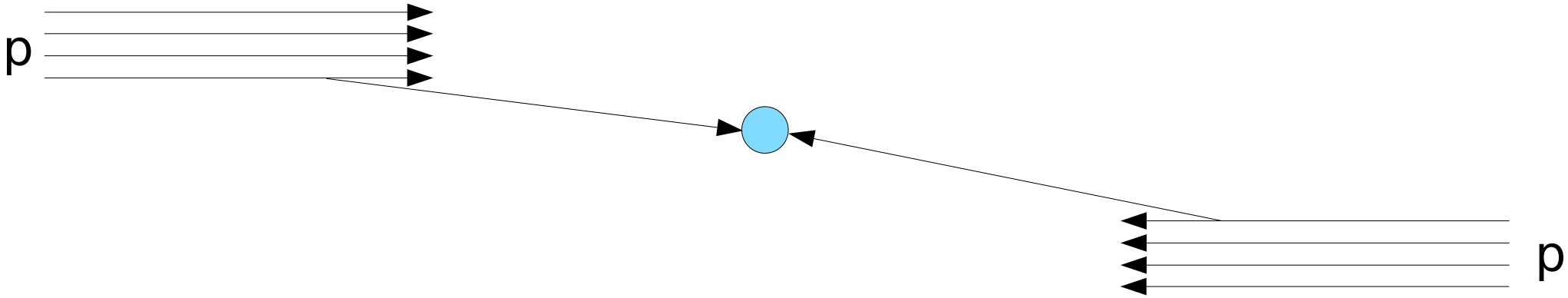
Das Higgs im Proton



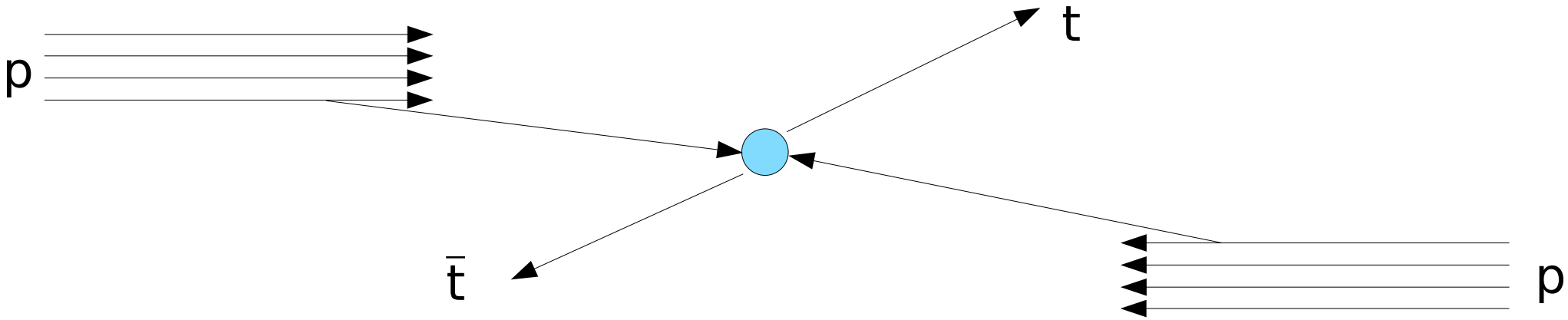


Das Higgs im Proton

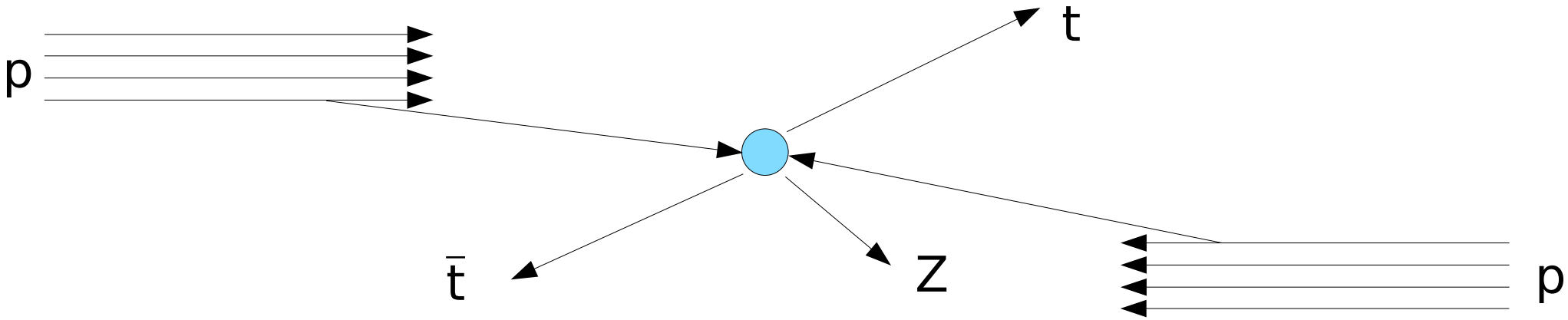
Das Higgs im Proton



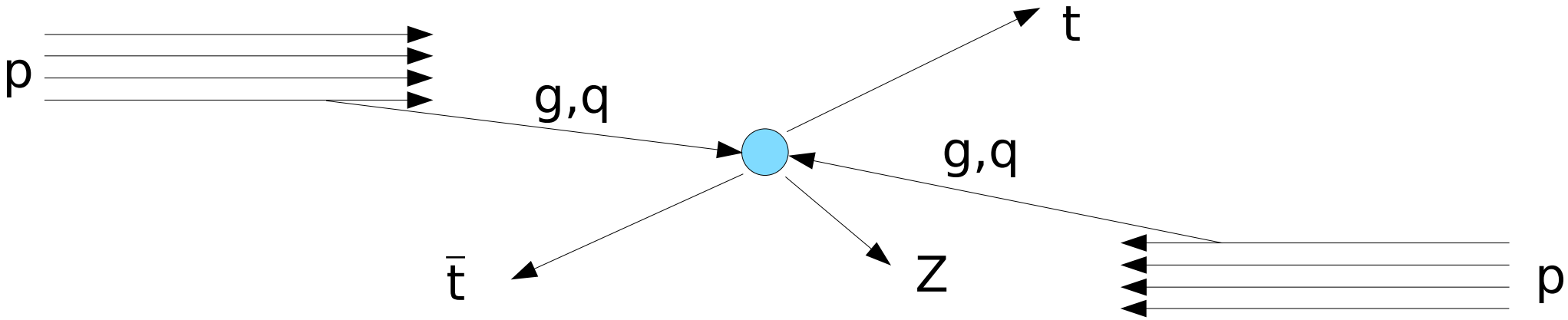
Das Higgs im Proton



Das Higgs im Proton

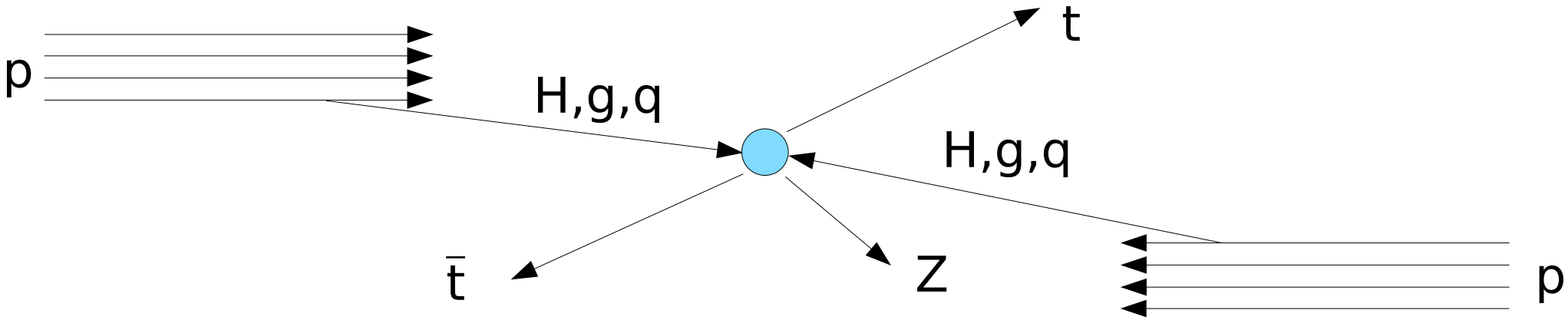


Das Higgs im Proton



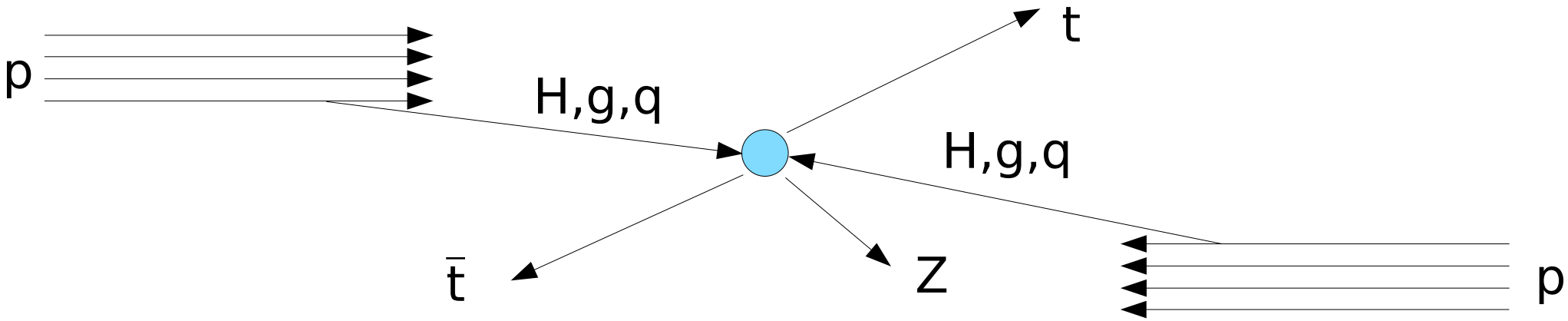
- Berechnung mit Uni Wien Werkzeugen

Das Higgs im Proton



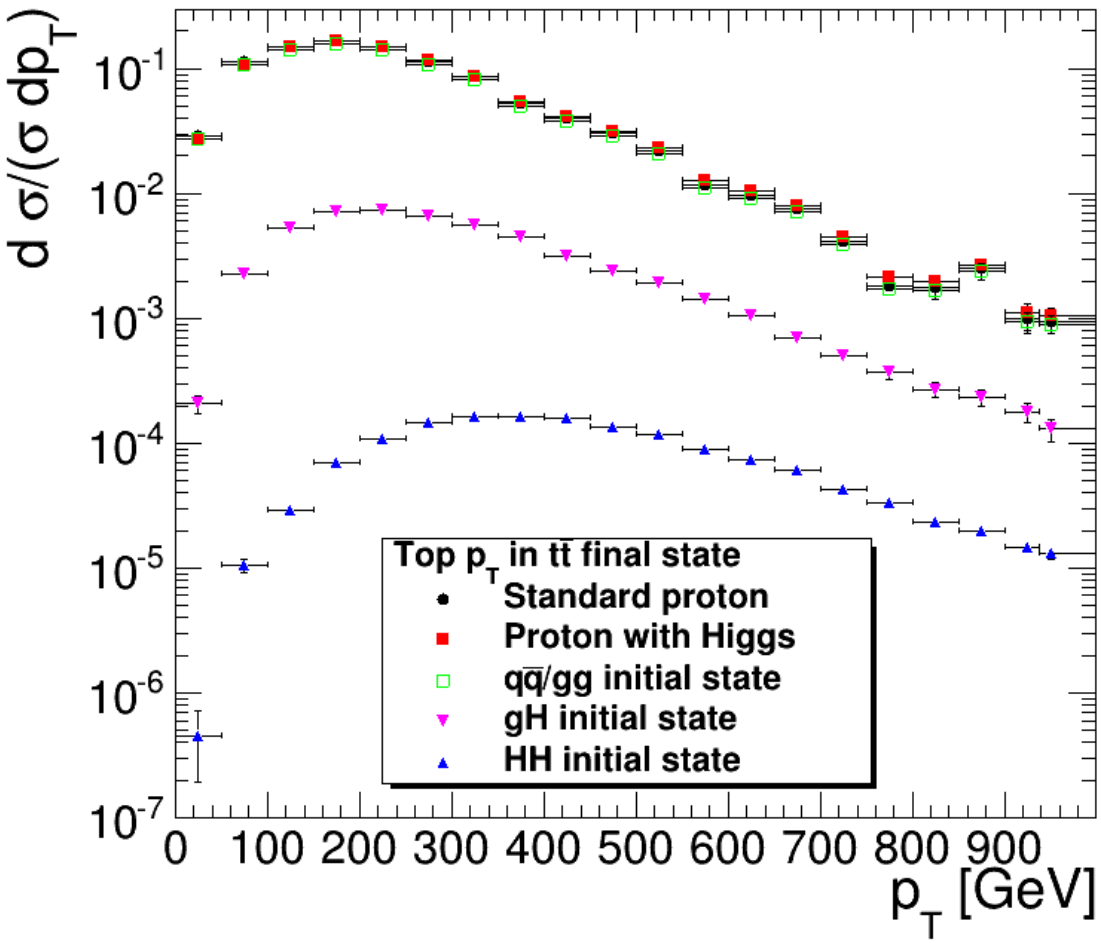
- Berechnung mit Uni Wien Werkzeugen
  - Modifiziert um das Higgs einzubeziehen

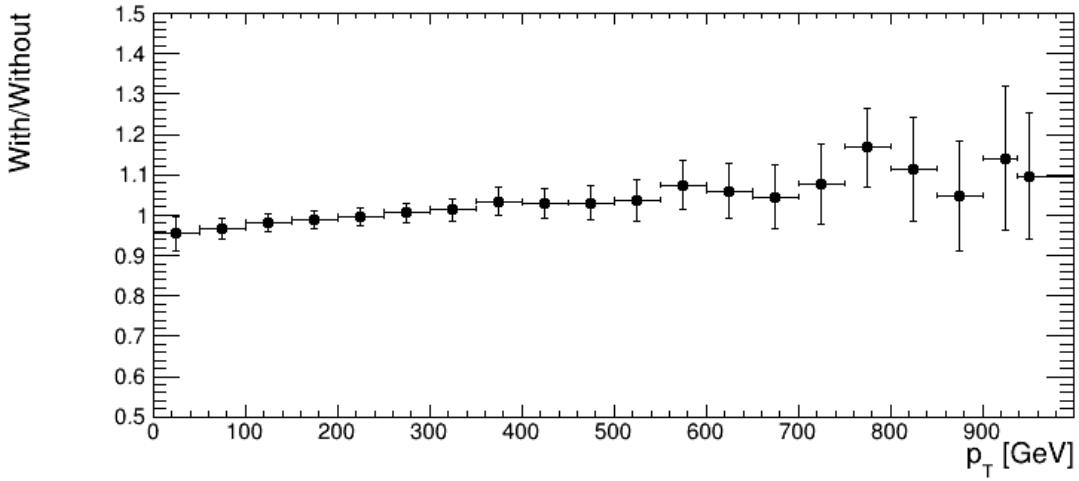
Das Higgs im Proton



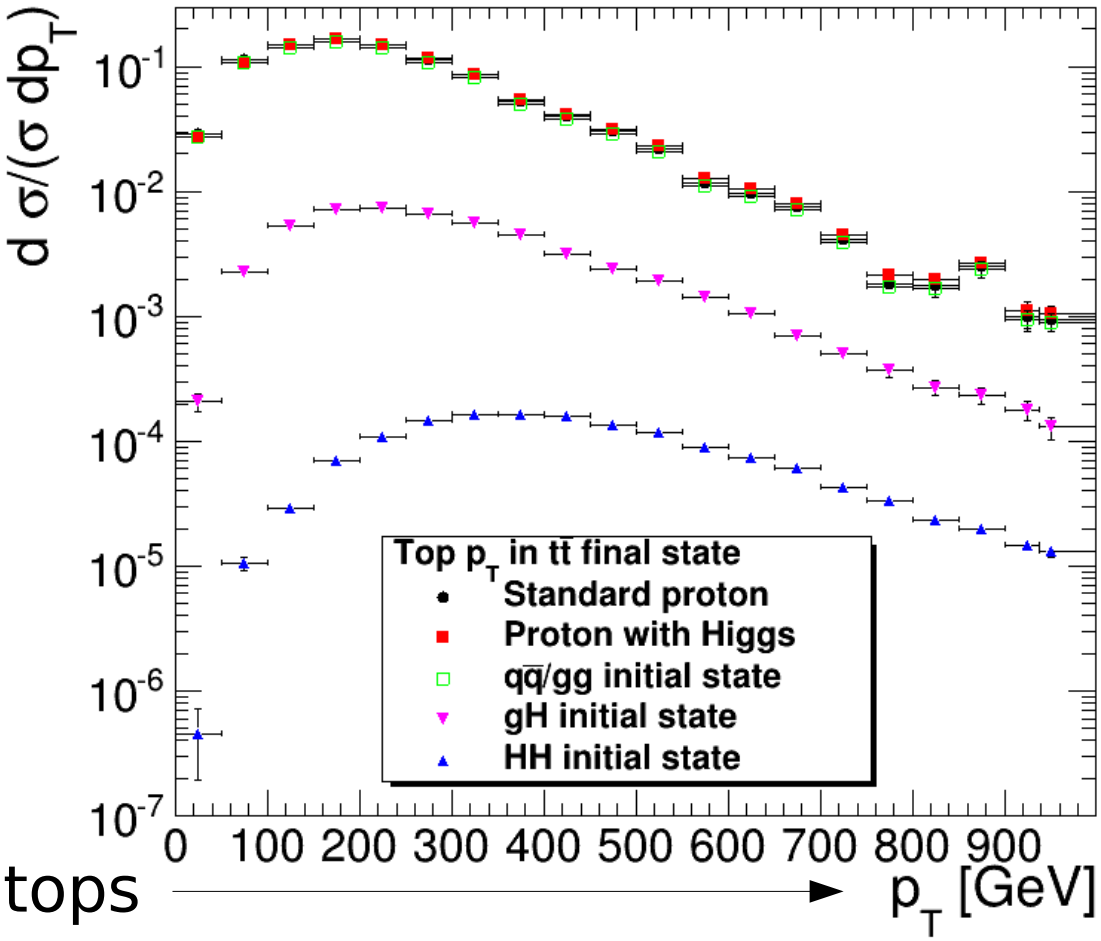
- Berechnung mit Uni Wien Werkzeugen
  - Modifiziert um das Higgs einzubeziehen
- Wird von wenigen Prozessen dominiert
  - Unabhängig vom zusätzlichen Higgs
    - qq, gg
  - Durch das zusätzliche Higgs erzeugt
    - Hg, HH

Das Higgs im Proton

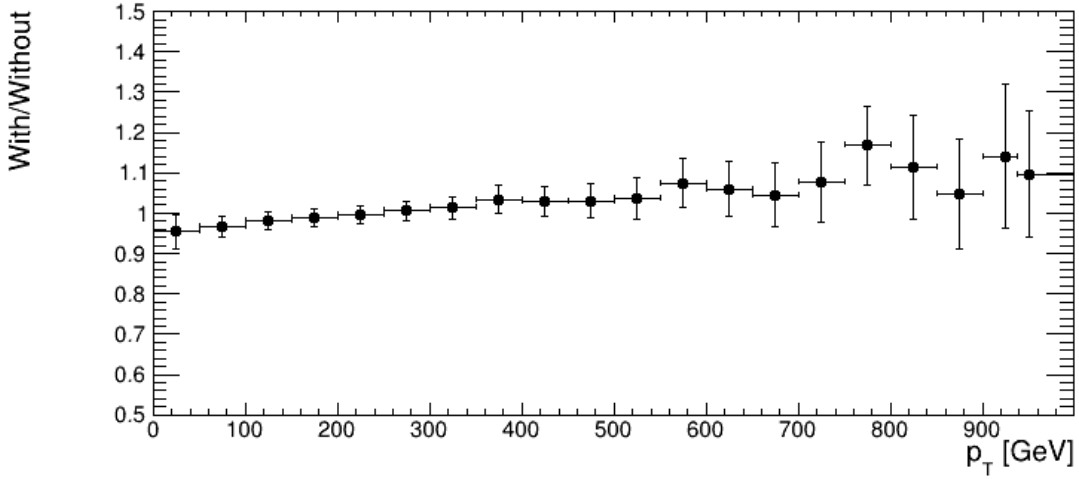




Das Higgs im Proton

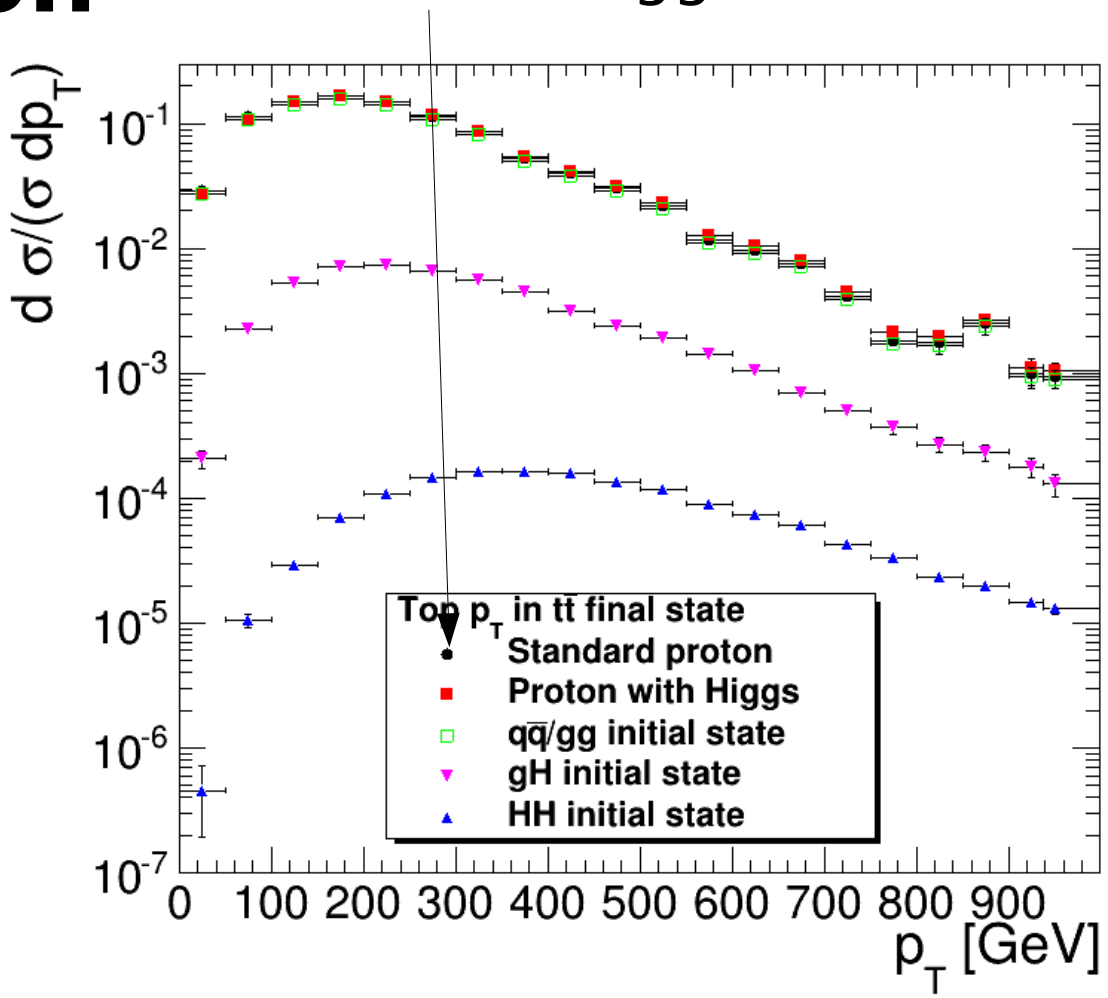


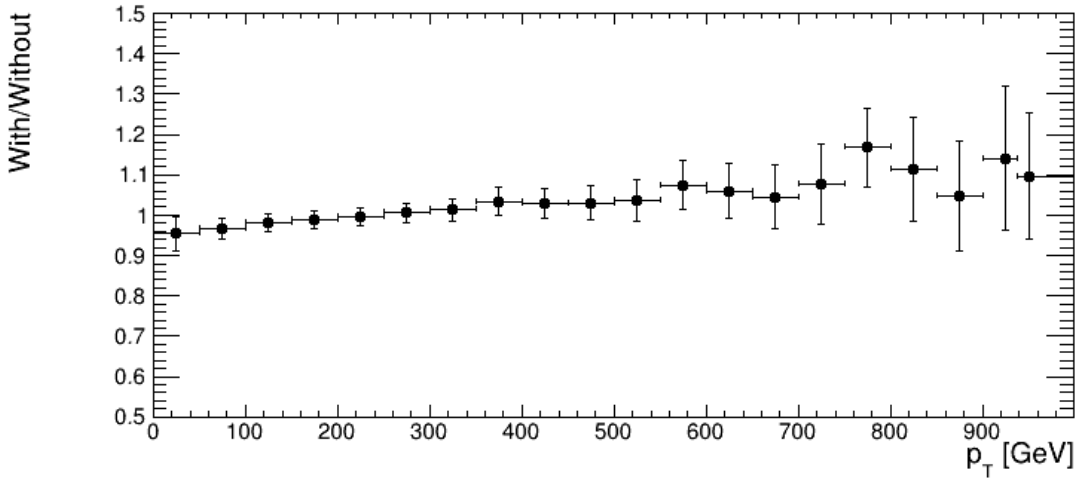
Energie der tops



Das Higgs im Proton

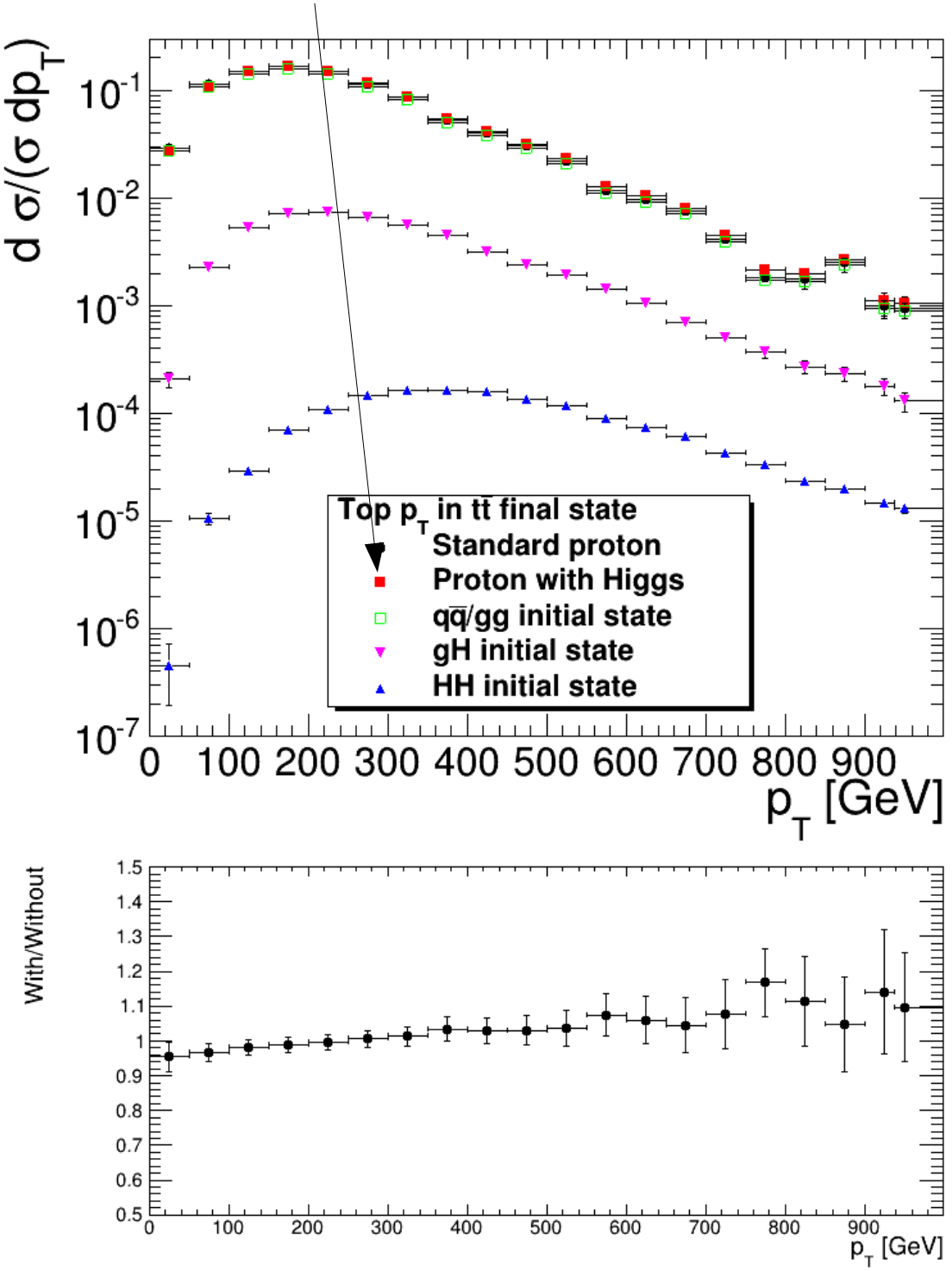
Ohne Higgs im Proton





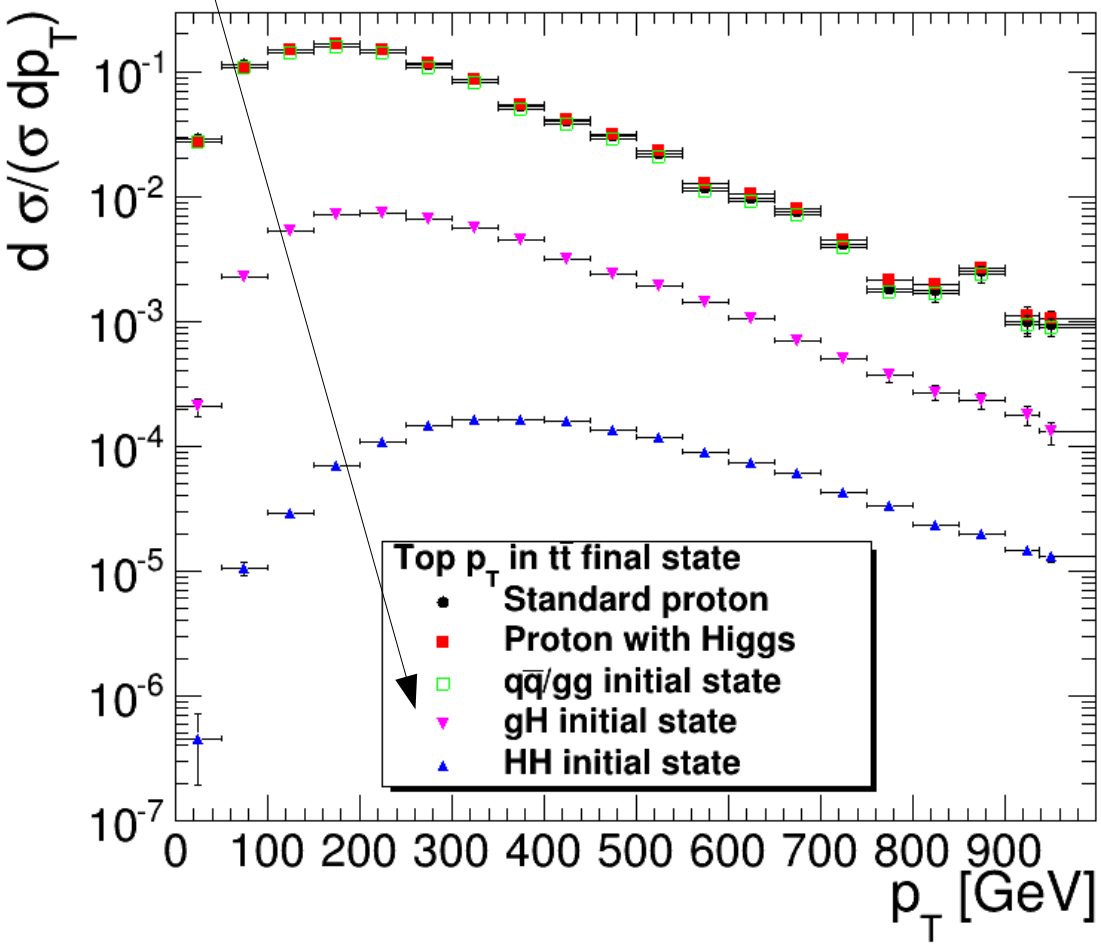
Das Higgs im Proton

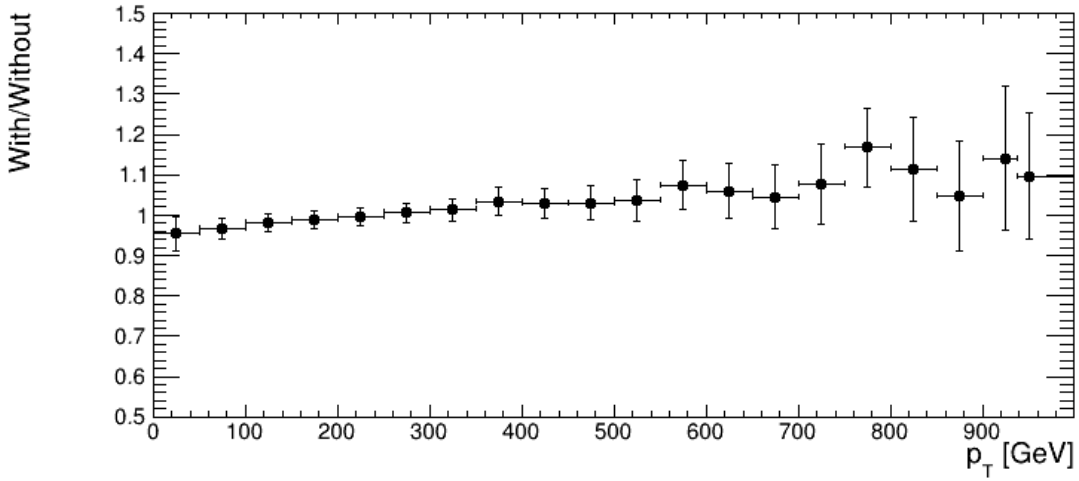
Mit Higgs im Proton



Das Higgs im Proton

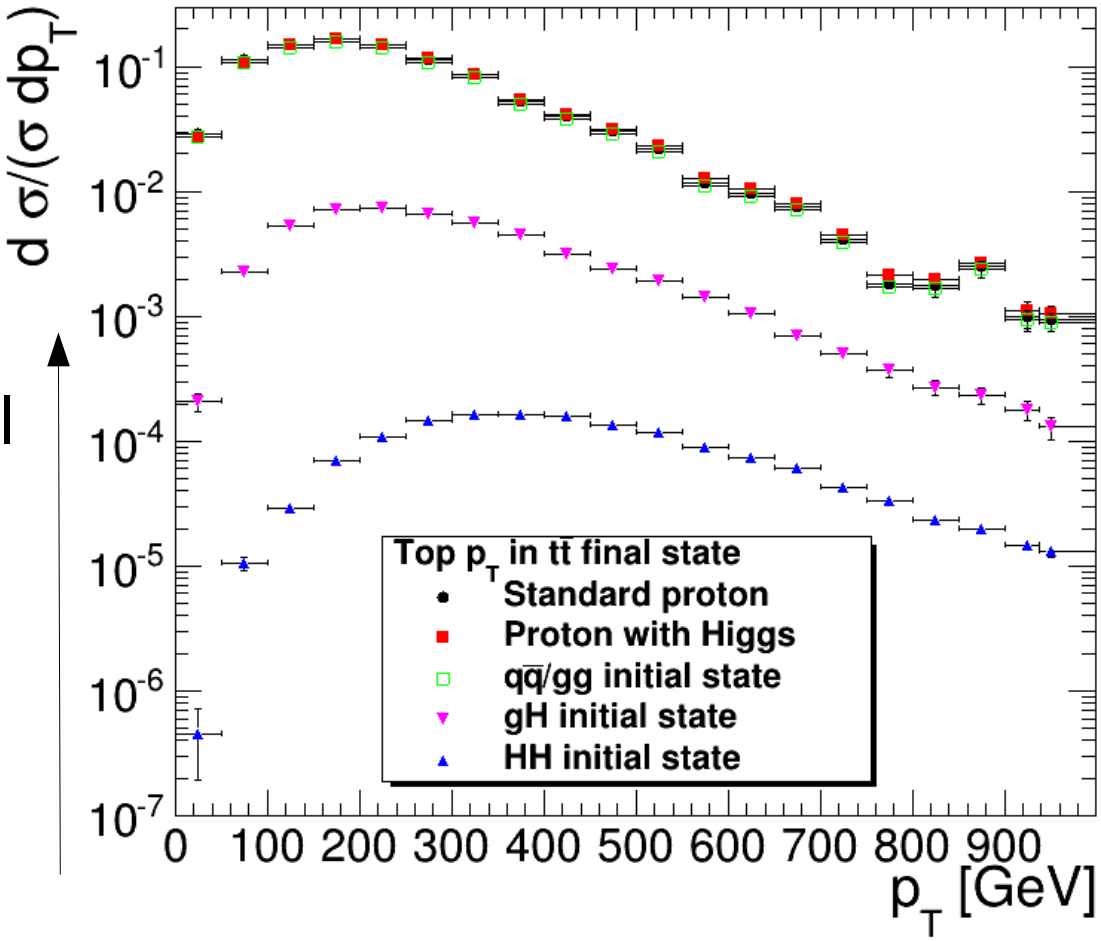
Einzelne Prozesse



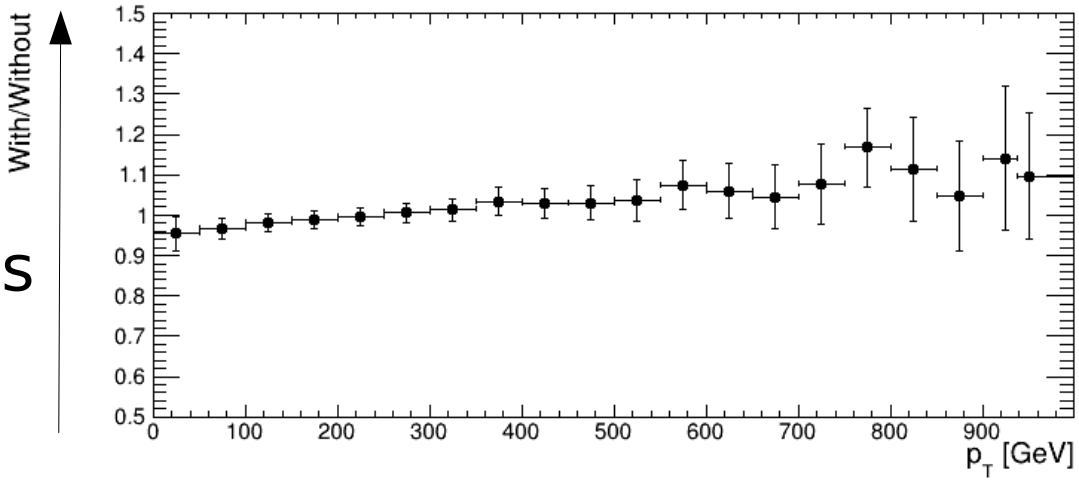


Das Higgs im Proton

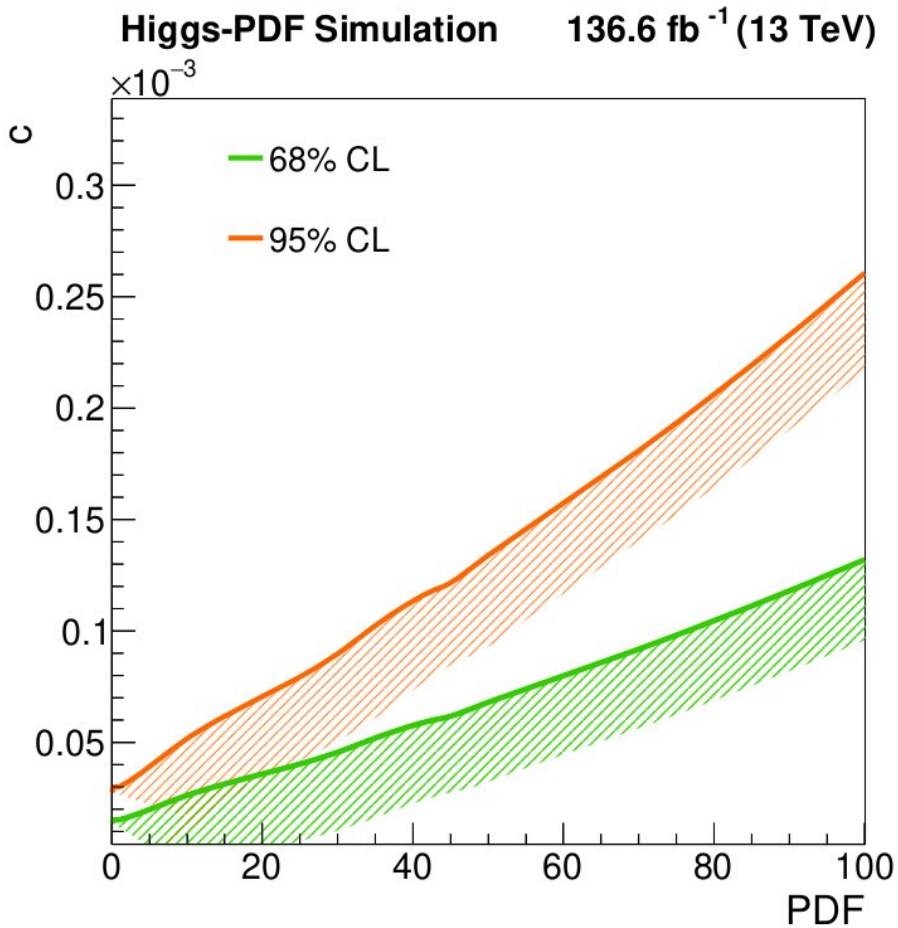
Relative Anzahl

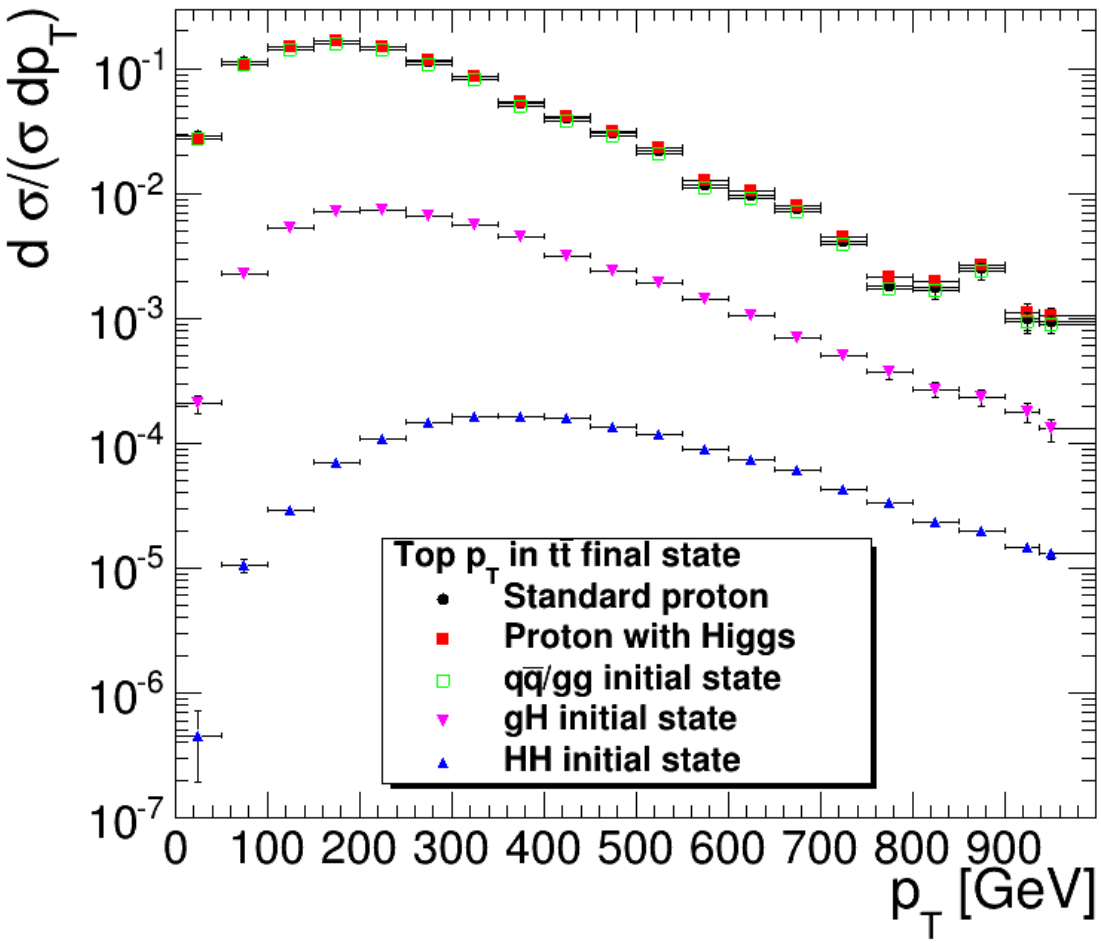


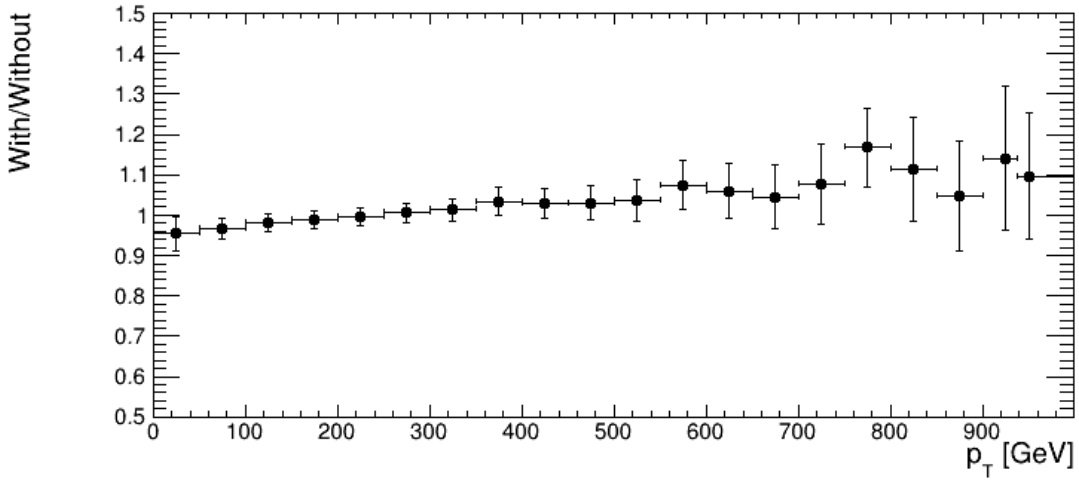
Relativ zu ohne Higgs



Das Higgs im Proton

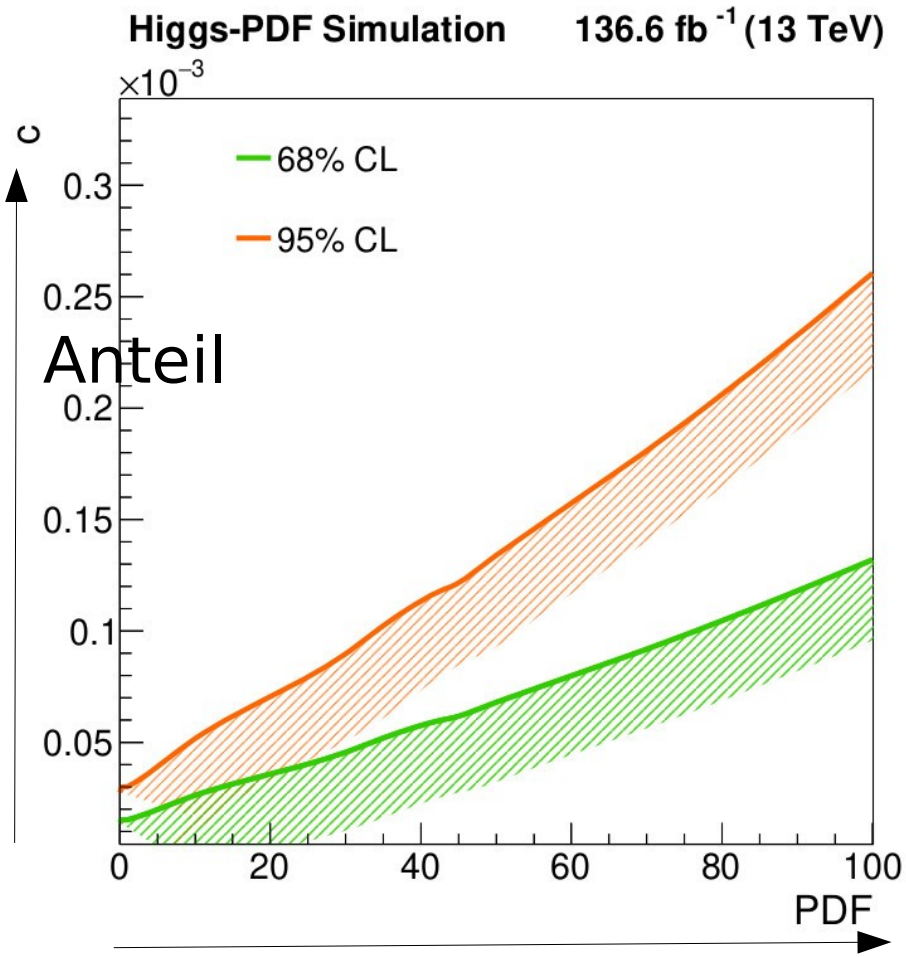






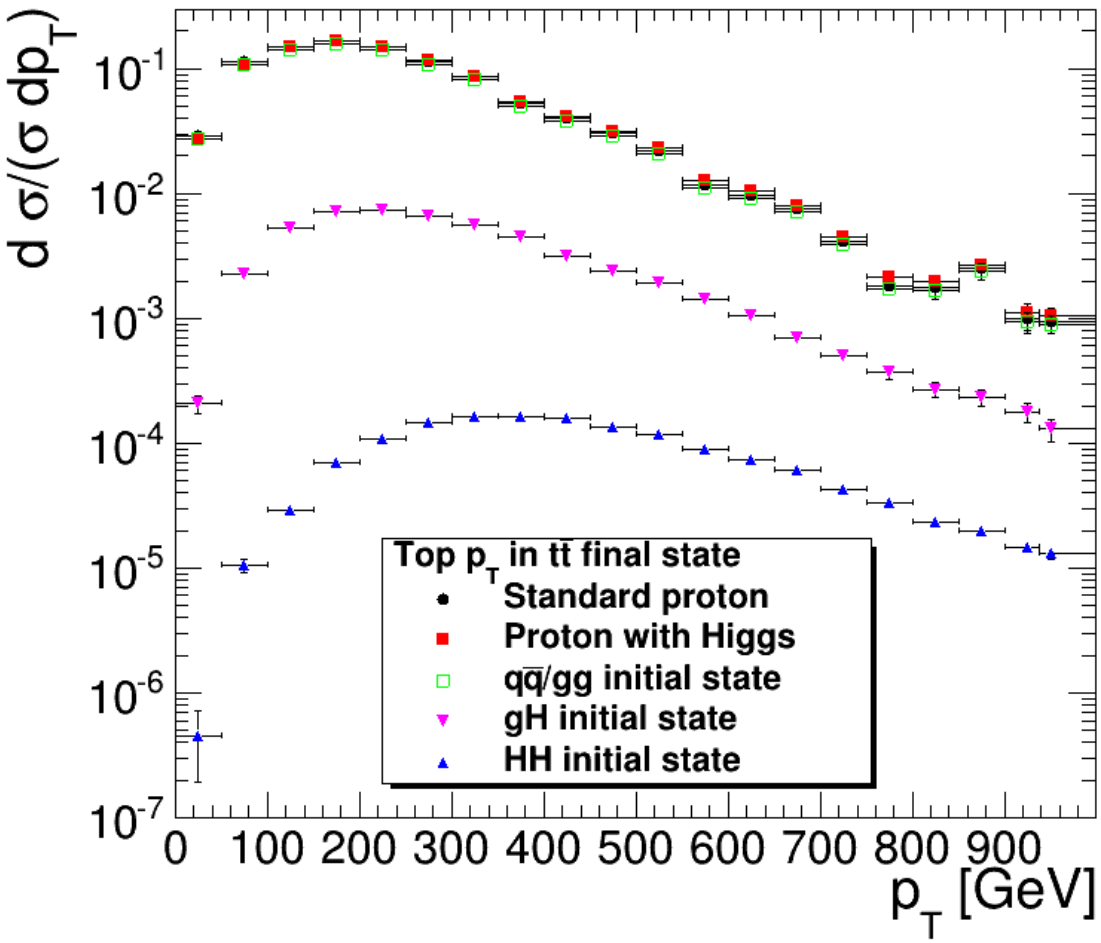
Simuliert mit Hilfe des HEPHY/Wien für das CMS Experiment am CERN

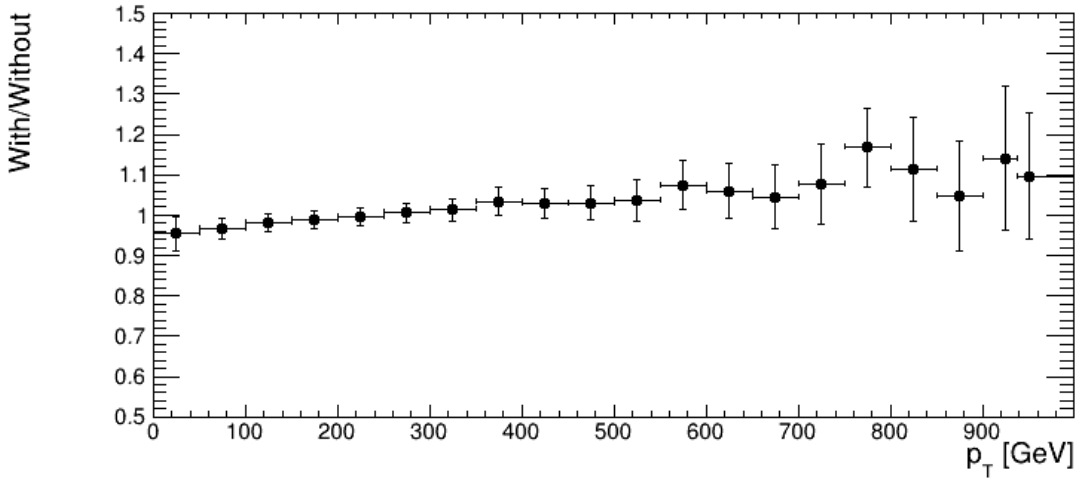
Das Higgs im Proton



Anteil

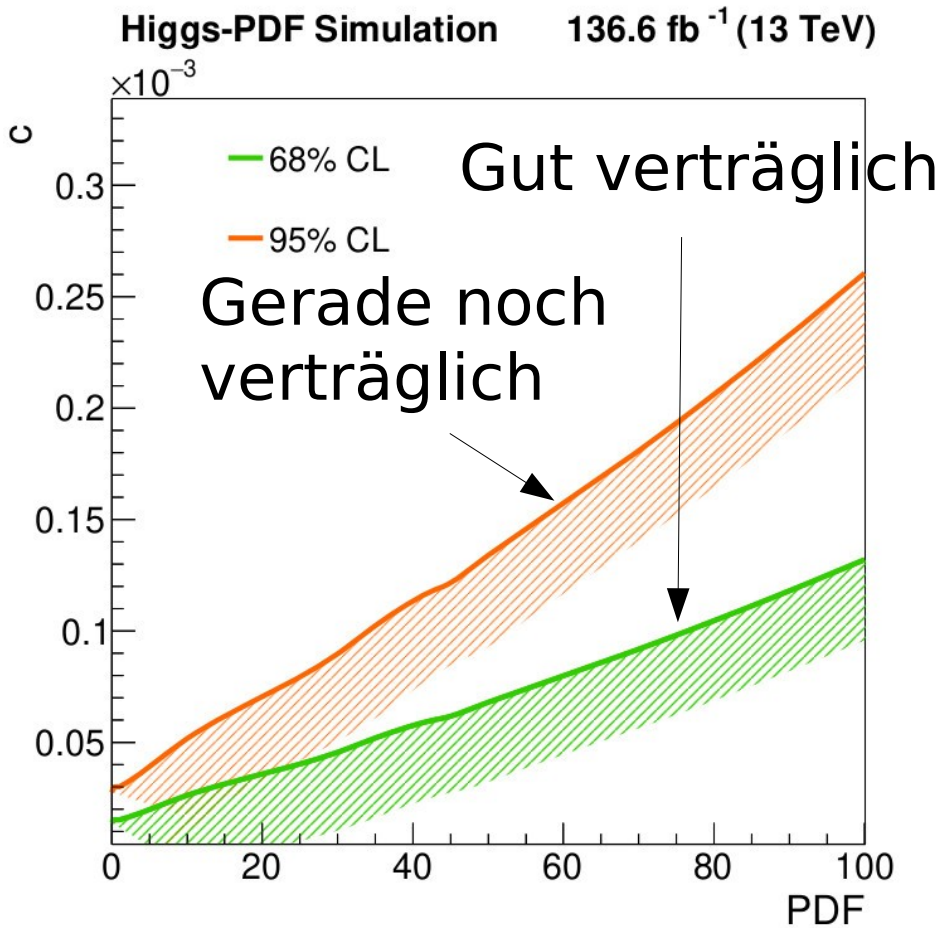
Verteilung des Higgs

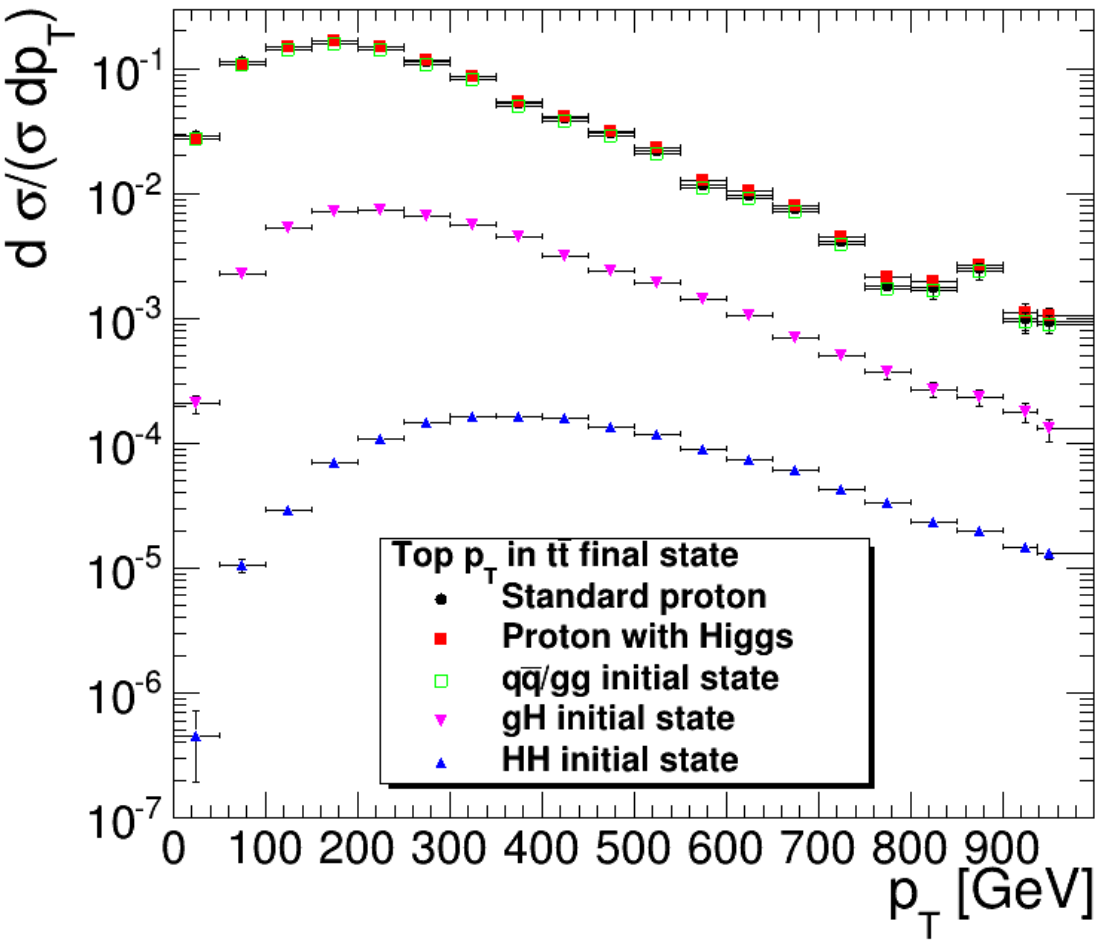


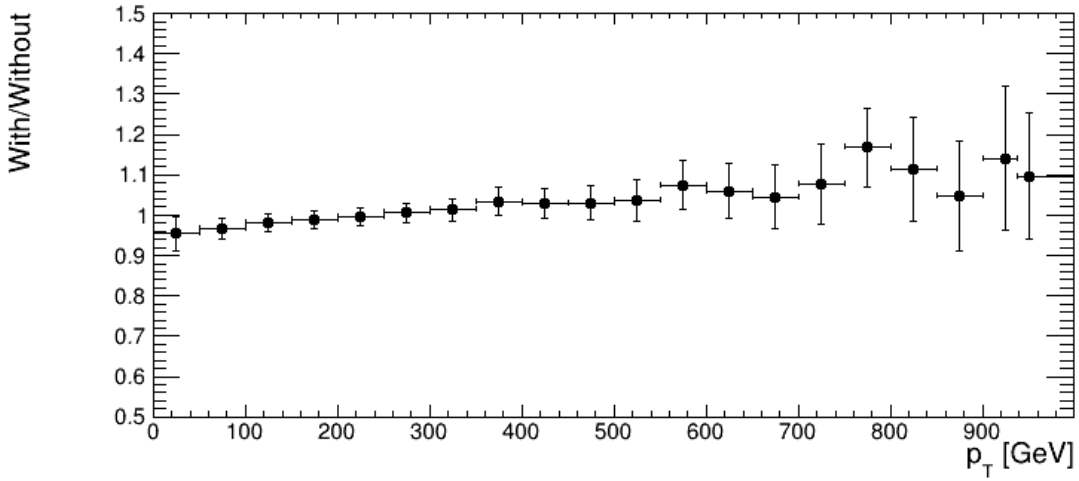


Simuliert mit Hilfe des HEPHY/Wien für das CMS Experiment am CERN

Das Higgs im Proton







Simuliert mit Hilfe des HEPHY/Wien für das CMS Experiment am CERN

Zusammenfassung

Noch viele interessante Effekte in den bekannten Theorien

Auswirkungen nur mit neuen Experimenten testbar

Zusammenfassung

Noch viele interessante Effekte in den bekannten Theorien

Auswirkungen nur mit neuen Experimenten testbar

Technische Übersicht: arxiv.org/abs/1712.04721

Das Proton im Higgs: arxiv.org/abs/2002.01688

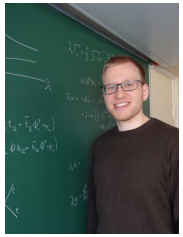
Blog mit mehr Details: axelmaas.blogspot.com

Zusammenfassung

Noch viele interessante Effekte in den bekannten Theorien

Auswirkungen nur mit neuen Experimenten testbar

Nächste Generation arbeitet bereits!



Technische Übersicht: arxiv.org/abs/1712.04721

Das Proton im Higgs: arxiv.org/abs/2002.01688

Blog mit mehr Details: axelmaas.blogspot.com