



# Themen für Bachelor- und Master-Arbeiten



## Die Erforschung des Higgs-Teilchens

### H → WW\* → lνlν

### H → ττ

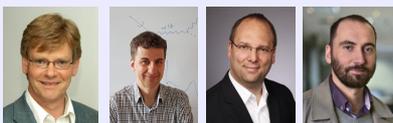
### H → bb

### Interpretationen

ATLAS  
 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}, 36.1 - 79.8 \text{ fb}^{-1}$   
 $m_H = 125.09 \text{ GeV}, |V_{Hl}| < 2.5$   
 $P_{SM} = 81\%$

	Total	Stat.	Syst.	SM
<b>ggF</b>				
0-jet	1.18 ±0.13 (±0.10, ±0.09)			
1-jet, $p_T^H < 60 \text{ GeV}$	0.53 +0.39 +0.32 +0.22 -0.38 (-0.31* -0.21)			
1-jet, $60 \leq p_T^H < 120 \text{ GeV}$	0.82 +0.33 +0.28 +0.17 -0.31 (-0.27* -0.15)			
1-jet, $120 \leq p_T^H < 200 \text{ GeV}$	1.18 +0.68 +0.58 +0.36 -0.63 (-0.56* -0.29)			
≥ 2-jet, $p_T^H < 200 \text{ GeV}$	1.02 +0.48 +0.39 +0.29 -0.45 (-0.38* -0.24)			
≥ 1-jet, $p_T^H \geq 200 \text{ GeV}$	1.79 +0.82 +0.53 +0.32 -0.58 (-0.52* -0.29)			
<b>VBF</b>				
VBF topo + Rest	1.37 +0.32 +0.25 +0.21 -0.30 (-0.24* -0.18)			
VH topo	+1.19 +1.15 +0.29 -1.00 (-0.98* -0.21)			
$p_T^H \geq 200 \text{ GeV}$	+1.30 +1.15 +0.61 -0.88 (-1.28* -1.10* -0.64)			
<b>WH</b>				
$p_T^H < 250 \text{ GeV}$	1.70 +0.75 +0.57 +0.48 -0.71 (-0.56* -0.44)			
$p_T^H \geq 250 \text{ GeV}$	1.14 +0.72 +0.61 +0.39 -0.68 (-0.57* -0.37)			
<b>ZH</b>				
$p_T^H < 150 \text{ GeV}$	0.85 +0.82 +0.63 +0.52 -0.79 (-0.61* -0.49)			
$150 \leq p_T^H < 250 \text{ GeV}$	0.62 +0.68 +0.57 +0.38 -0.56 (-0.56* -0.38)			
$p_T^H \geq 250 \text{ GeV}$	1.84 +0.94 +0.81 +0.47 -0.82 (-0.77* -0.29)			
<b><math>\bar{t}tH + tH</math></b>	1.20 +0.26 +0.20 +0.20 -0.24 (-0.17* -0.19)			

### Die Higgs-Boson Forscher der Abteilung Jakobs, Gustav-Mie-Haus, 3. und 4. Stock



Prof. Dr. Karl Jakobs (karl.jakobs@uni-freiburg.de)  
 Dr. Christian Weiser (christian.weiser@physik.uni-freiburg.de)  
 PD Dr. Karsten Köneke (karsten.koeneke@cern.ch)  
 Dr. Spyridon Argyropoulos (spyridon.argyropoulos@cern.ch)  
 Dr. Benedict Winter, Dr. Stephen Jiggins, Frank Sauerburger, Simona Gargiulo



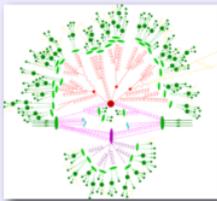


## Tools zur Entdeckung neuer Physik

### Monte-Carlo Simulation

Simulationen werden verwendet um die

- komplexe Struktur von Proton-Proton-Kollisionen
- Wechselwirkung der Teilchen mit dem Detektormaterial zu studieren



- **Matrixelemente**
- **Partonschauer**
- **Hadronisierung**
- + **Simulation des Detektors**
- **notwendig für Vergleich von Daten mit Theorie**

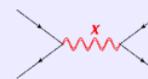
#### Themen

- Validierung neuester theoretischer Vorhersagen
- Verringerung theoretischer Unsicherheiten
- Verbesserung von Ereignisgeneratoren und Detektorsimulation

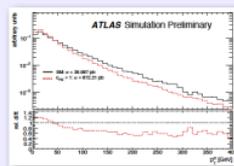
### Effektive Feldtheorie

- Generische Parametrisierung neuer Physik auf hohen Energieskalen ( $\Lambda \geq 1$  TeV)

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \sum_i \frac{c_i}{\Lambda^{d-4}} \mathcal{O}_i^{(d)}$$



Schwere Teilchen auf Skala  $\Lambda$  werden ausintegriert



Eine Vielzahl von EFT-Operatoren können Abweichungen zu einer Vorhersage des Standardmodells verursachen

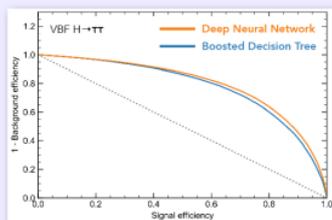
#### Themen

- Anwendung effektiver Feldtheorien zum Studium und zur Interpretation von
- Messungen der Eigenschaften des Higgs-Bosons
  - Suchen nach neuer Physik

### Maschinelles Lernen

- Kombination mehrerer Inputvariablen um Eigenschaften aus Daten zu extrahieren

Neu entwickelte "Deep Learning" Algorithmen übertreffen die Leistungen traditioneller Methoden



#### Themen

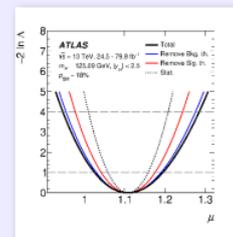
- Anwendung von Deep Learning
- zur Verbesserung der Sensitivität von Analysen
  - in Monte-Carlo Generatoren

### Statistische Analyse

- Hypothesentest: gibt es Anzeichen auf neue Physik in den Daten?

$$L = \prod_b \text{Pois}(N_b | \mu S_b + B_b; B_b) \prod_p f_p(\theta | \bar{\theta})$$

Profile Likelihood Fits sind Grundstein für Hypothesentests bei der Suche nach neuer Physik oder zur Bestimmung der Parameter des Standardmodells



#### Themen

- Entwicklung und Verbesserung statistischer Modelle zur Datenanalyse
- Statistische Kombinationen von Messungen

### Interessiert? Kommen Sie zu uns:



Prof. Dr. K. Jakobs, Dr. C. Weiser, PD Dr. K. Köneke, PD Dr. F. Rühr  
Dr. S. Argyropoulos, Dr. K. Bozek, Dr. S. Jiggins, B. Winter  
Gustav-Mie-Haus 3./4. Stock





# Themen für Bachelor- und Master-Arbeiten

## Kontakt:

Prof. Karl Jakobs ([karl.jakobs@physik.uni-freiburg.de](mailto:karl.jakobs@physik.uni-freiburg.de))  
Dr. Christian Weiser ([christian.weiser@physik.uni-freiburg.de](mailto:christian.weiser@physik.uni-freiburg.de))  
Privatdozent Dr. Karsten Köneke ([karsten.koeneke@cern.ch](mailto:karsten.koeneke@cern.ch))  
Dr. Spyridon Argyropoulos ([spyridon.argyropoulos@cern.ch](mailto:spyridon.argyropoulos@cern.ch))  
Benedict Winter ([benedict.winter@physik.uni-freiburg.de](mailto:benedict.winter@physik.uni-freiburg.de))

## Optimierung von Higgs-Boson-Analysen

Das beobachtete Higgs-Boson nimmt im Standardmodell der Teilchenphysik eine Schlüsselposition ein. Die elektroschwache Symmetriebrechung, aus der das Higgs-Boson hervorgeht, erzeugt dynamisch die Massen der W- und Z-Bosonen und belässt das Photon masselos. Zusätzlich können Fermionmassen durch Interaktionen mit dem Higgs-Boson parametrisiert werden. Ein wichtiger Grund für den Bau des Large Hadron Colliders (LHC) war die Entdeckung des Higgs-Bosons und die anschließende präzise Vermessung seiner Eigenschaften. Um dieses Ziel zu erreichen werden in unserer Gruppe mehrere weltweite Flaggschiffanalysen in den Zerfällen  $H \rightarrow WW^*$ ,  $H \rightarrow \tau\tau$ , und  $H \rightarrow bb$  durchgeführt. Hier bieten sich verschiedene Möglichkeiten diese Analysen mit neuen Methoden weiterzuentwickeln und somit zum tieferen Verständnis der Higgs-Boson-Physik beizutragen.

### Mögliche Themen:

- Entwicklung und Optimierung von Analysen von  $H \rightarrow WW^*$ ,  $H \rightarrow \tau\tau$  oder  $H \rightarrow bb$  Ereignissen

### Entwickelte Kompetenzen:

- Detailliertes Verständnis der Teilchenphysik
- Fundamente einer Analyse in ATLAS: Ereignisselektion (auch mit Hilfe Neuronaler Netzwerke und Deep Learning-Methoden), Untergrundabschätzung, statistische Analyse
- Softwareentwicklung (python, machine learning software, git)
- Kollaborative Forschung in einer globalen Wissenschaftskollaboration

## Entwicklung einer Higgs-Boson-Analyse in einem neuen Prozess

Die assoziierte Produktion eines Higgs-Bosons und eines Vektorbosons ( $W$  oder  $Z$ -Boson) ist ein sehr seltener Prozess, selbst im Vergleich mit anderen Higgs-Produktionsprozessen. Sein Wirkungsquerschnitt und kinematische Verteilungen, wie die des Transversalimpulses des Vektorbosons, enthalten wertvolle Informationen über die Wechselwirkungen der beteiligten Teilchen. Bisher wurden nur Ereignisse mit leptonischen Vektorboson-Zerfällen (ca. 30%) gemessen, da hadronische Vektorboson-Zerfälle (ca. 70%) in der Regel nicht vom Untergrund unterschieden werden können. Neue „Jet-Tagging-Methoden“ erlauben es hadronische Vektorboson-Zerfälle bei hohen transversalen Impulsen ( $>200$  GeV) zu identifizieren. Der Anteil von Ereignissen assoziierter VH-Produktion mit derart hohen Transversalimpulsen ist von besonderem Interesse für die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells. Higgs-Boson-Zerfälle in  $WW^*$  mit nachfolgenden leptonischen Zerfällen der W-Bosonen bieten eine gute Kombination aus Identifizierbarkeit und ausreichender Ereigniszahl. Ziel ist es herauszufinden ob eine Messung des beschriebenen Prozesses möglich ist und wie präzise sie sein kann.

### Entwickelte Kompetenzen:

- Detailliertes Verständnis der Teilchenphysik
- Fundamente einer Analyse in ATLAS: Ereignisselektion (auch mit Hilfe Neuronaler Netzwerke und Deep Learning-Methoden), Untergrundabschätzung, statistische Analyse
- Softwareentwicklung (C++, python, bash, git)
- Kollaborative Forschung in einer globalen Wissenschaftskollaboration



## Themen für Bachelor- und Master-Arbeiten

### Maschinelles Lernen - “Deep Learning”

Maschinelles Lernen bedeutet, dass ein Algorithmus Eigenschaften aus Daten mittels komplexer mathematischer Modelle bestimmen kann. “Deep Neural Network” (DNN) Algorithmen nutzen mehrere Lagen, um high-level Eigenschaften aus Daten zu extrahieren. Generell sind “deep learning” Algorithmen traditionellen Methoden überlegen.

Bachelor- oder Master-Kandidaten können DNN für eine gegebene Anwendung in einer ATLAS-Analyse optimieren. Dabei werden sie sich mit moderner Trainingssoftware vertraut machen und die Leistung der entwickelten DNN evaluieren. Maschinelles Lernen kann genutzt werden um Signal von den verschiedenen Untergründen zu trennen, verschiedene Signalkategorien zu separieren, oder auch um kinematische Eigenschaften zu erlernen. Diese hochmodernen Technologien haben das Potential verschiedene Analysen zur Physik des Higgs-Bosons in neue Wege zu leiten und somit dramatisch zu verbessern.

#### Mögliche Themen:

- Entwicklung und Optimierung von DNN zur Analyse von  $H \rightarrow WW^*$ ,  $H \rightarrow \tau\tau$ , oder  $H \rightarrow bb$  Ereignissen
- Maschinelles Erlernen von kinematischen Eigenschaften, die mit herkömmlichen Methoden nur schlecht rekonstruierbar sind

#### Entwickelte Kompetenzen:

- Detailliertes Verständnis der Teilchenphysik
- Verständnis von Methoden für maschinelles Lernen (insbesondere DNN) und ihre Anwendungen in der Teilchenphysik
- Softwareentwicklung (python, git, Machine Learning-Software wie Tensorflow, PyKeras,...)

### Effektive Feldtheorien

Effektive Feldtheorien (EFT) erlauben es den Einfluss physikalischer Prozesse jenseits des Standardmodells auf experimentell messbare Größen mithilfe von “EFT-Operatoren” zu parametrisieren ohne dass die zugrundeliegende mikroskopische Theorie bekannt sein muss. EFT ermöglichen damit systematische Suchen nach Spuren bisher unentdeckter Prozesse, wobei Resultate unterschiedlicher Messungen kombiniert werden können.

Interessierte Bachelor- und Master-Kandidaten können mittels Monte-Carlo Generatoren den Einfluss von EFT-Erweiterungen des Standardmodells auf Higgs-Boson-Messungen untersuchen und herausfinden welche EFT-Operatoren den größten Einfluss haben. Anschließend können diese Operatoren mit ATLAS-Daten eingeschränkt werden.

#### Mögliche Themen:

- Auswirkung von EFT-Operatoren auf Higgs-Ereignisse in ATLAS. Verschiedene Higgs-Zerfälle ( $H \rightarrow WW^*$ ,  $H \rightarrow \tau\tau$ ,  $H \rightarrow bb$ ) und Produktionsprozesse (ggF, VBF, VH) können untersucht werden
- Einschränkung von EFT-Operatoren mithilfe von ATLAS-Daten

#### Entwickelte Kompetenzen:

- Detailliertes Verständnis der Teilchenphysik
- Verständnis effektiver Feldtheorien und Untersuchung ihrer Auswirkungen auf Messungen am LHC mithilfe von Monte-Carlo-Generatoren
- Statistische Analyse mittels Profil-Likelihood-Fits
- Softwareentwicklung (C++, python, bash, git)
- Kollaborative Forschung in einer globalen Wissenschaftskollaboration



# Themen für Bachelor- und Master-Arbeiten

## Statistische Analysen

Statistische Analysen basierend auf der Maximierung von Likelihood-Funktionen werden verwendet, um ein gegebenes Modell an gemessene Daten anzupassen. Das heißt es werden die Parameterwerte gefunden, mit denen das Modell die Daten bestmöglich beschreibt. Die Parameter können freie Parameter des Standardmodells sein oder den Einfluss neuer Physik quantifizieren. Systematische Unsicherheiten werden in der Likelihood-Funktion mithilfe zusätzlicher Parameter berücksichtigt. Die resultierende Vielzahl von Parametern sowie statistische Fluktuationen bei der Evaluation systematischer Unsicherheiten können zu Instabilitäten bei der Maximierung der Likelihood führen, was vermieden werden muss.

Interessierte Studenten werden lernen Likelihood-Fits durchzuführen und dabei systematische Unsicherheiten zu berücksichtigen. Zur Vermeidung von Instabilitäten können verfügbare oder selbst (weiter-)entwickelte Glättungsalgorithmen eingesetzt werden. Alternativ kann die Sensitivität einer Higgs-Analyse durch eine verbesserte Nutzung der verfügbaren Daten im Fit optimiert werden.

### Mögliche Themen:

- Glättungsalgorithmen zur Evaluation systematischer Unsicherheiten in statistischen Analysen
- Optimierung der Nutzung von LHC-Daten bei der Analyse von Higgs-Ereignissen

### Entwickelte Kompetenzen:

- Detailliertes Verständnis der Teilchenphysik
- Statistische Analyse mittels Likelihood-Fits, insbesondere die Berücksichtigung systematischer Unsicherheiten
- Softwareentwicklung (C++, python, bash, git)
- Kollaborative Forschung in einer globalen Wissenschaftskollaboration

## Monte-Carlo Simulation

Fast alle Physikanalysen in der Hochenergiephysik sind zum Vergleich gemessener Daten mit Theorievorhersagen auf Monte-Carlo Simulationen angewiesen. Die begrenzte Genauigkeit der verfügbaren Simulationen führen zu Theorieunsicherheiten in ATLAS-Messungen. Theorieunsicherheiten gewinnen mit ansteigender Datenmenge an Bedeutung. Daher werden ihre Ursachen intensiv untersucht um die Auswirkungen zu begrenzen. Dafür werden unter anderem unterschiedliche Simulationen verglichen und neue Methoden zur Validierung entwickelt, die moderne Softwarelösungen wie kontinuierliche Integration nutzen.

Interessierte Studenten können die Qualität der Simulationen verbessern, zur Evaluation von Theorieunsicherheiten in einer Higgs-Analysen in ATLAS beitragen oder bei der Entwicklung von Softwarelösungen zur automatisierten Validierung von Ereignisgeneratoren mitwirken. Hierbei können Methoden für maschinelles Lernen eingesetzt werden.

### Mögliche Themen:

- Evaluation von Theorieunsicherheiten in laufenden Higgs-Analysen mithilfe der neuesten Ereignisgeneratoren
- Automatisierung der Validierung von Ereignisgeneratoren mithilfe moderner Softwarelösungen (Kontinuierliche Integration in GitLab)
- Verbesserung der Simulation der Kalorimeter im ATLAS Detektor

### Entwickelte Kompetenzen:

- Detailliertes Verständnis der Teilchenphysik
- Prinzipien für Monte-Carlo Simulationen, Vergleiche theoretischer Vorhersagen mit Daten
- Softwareentwicklung (C++, python, bash, git, ggf. kontinuierliche Integration und machine learning software)