

# **Handbuch der Modulelemente**

## **Masterstudiengang Physik**

Department Physik  
Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät  
Universität Siegen

18. September 2019

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Struktur des Studiums</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Modulübersicht</b>	<b>2</b>
2.1	Fachkurse . . . . .	2
2.2	Wahlbereich . . . . .	2
2.3	Pflichtbereich . . . . .	3
2.4	Liste der Module . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Modulbeschreibungen Fachkurse</b>	<b>5</b>
3.1	Experimentalphysik (M-E) . . . . .	5
3.2	Theoretische Physik (M-T) . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Modulbeschreibungen Wahlbereich</b>	<b>12</b>
4.1	Methoden der Experimentalphysik (M-WA) . . . . .	12
4.2	Festkörperphysik (M-WB) . . . . .	16
4.3	Quantenoptik und Nano-Optik (M-WC) . . . . .	19
4.4	Experimentelle Teilchen- und Astroteilchenphysik (M-WD) . . . . .	25
4.5	Theoretische Teilchenphysik: Phänomenologie des Standardmodells (M-WE) . . . . .	29
4.6	Theoretische Teilchenphysik: Fortgeschrittene Methoden (M-WF) . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Modulbeschreibungen Pflichtbereich</b>	<b>37</b>
5.1	Masterpraktikum (M-P) . . . . .	37
5.2	Hauptseminar (M-S) . . . . .	38
5.3	Forschungsphase (M-A) . . . . .	39
<b>6</b>	<b>Beispielcurricula</b>	<b>41</b>

# 1 Struktur des Studiums

Der Masterstudiengang Physik ist modular aufgebaut und umfasst eine einjährige Kursphase und eine einjährige Forschungsphase. Der Arbeitsaufwand für die einzelnen Module wird gemäß dem European Credit Transfer and Accumulation System (ECTS) durch Leistungspunkte (LP) quantifiziert. Der Gesamtaufwand für das Studium beträgt 120 LP.

Die Module verteilen sich auf die folgenden Bereiche

- (a) Schwerpunktbereich (3 Module mit 24 LP)
- (b) Wahlbereich (Module mit insgesamt 21 LP)
- (c) Praktikum (1 Modul mit 9 LP)
- (d) Hauptseminar (1 Modul mit 6 LP)
- (e) Forschungsphase mit Masterarbeit (3 Module mit insgesamt 60 LP)

Die Belegung der Module in der Kursphase richtet sich nach dem Studienangebot und unterliegt keiner vorgegebenen Reihenfolge. So finden die verschiedenen Fachkurse im jährlichen Turnus entweder im Winter- oder im Sommersemester statt, aber sie können gleichermaßen als Schwerpunktfach oder als Ergänzungsfach belegt werden. Die einzelnen Modulbeschreibungen geben zudem die jeweilige Veranstaltungssprache an, die jedoch nicht fest vorgeschrieben ist und auf Wunsch der Studierenden von deutsch auf englisch (oder umgekehrt) geändert werden kann.

Die folgende Darstellung illustriert einen möglichen Studienverlauf:

1. Semester	2. Semester	3. Semester	4. Semester
Fachkurs Schwerpunktfach 4V/2Ü (9)	Wahlbereich Schwerpunktfach 2V/2Ü (6)	<b>Prüfung</b> Schwerpunktfach (-)	
	Fachkurs Ergänzungsfach 4V/2Ü (9)		
Wahlbereich 2V/2Ü (6)	Wahlbereich 2V/2Ü (6)		
Wahlbereich 2V/2Ü (6)	Wahlbereich 1V/1Ü (3)		
Masterpraktikum 4P (9)	Hauptseminar 2S (6)	Vorb.+Einarbeitung für Masterarbeit (15+15)	<b>Masterarbeit</b> (30)
<b>(30)</b>	<b>(30)</b>	<b>(30)</b>	<b>(30)</b>

In Kapitel 6 werden die Ausgestaltungsmöglichkeiten des Masterstudiengangs anhand verschiedener Beispielcurricula illustriert.

## 2 Modulübersicht

### 2.1 Fachkurse

Die Fachkurse umfassen eine Vorlesung (4 SWS) mit begleitenden Übungen (2 SWS) und werden mit 9 LP bewertet. Sie werden im jährlichen Turnus angeboten und geben die Vertiefungsrichtungen zur fachlichen Schwerpunktbildung vor.

#### 1. Experimentalphysik (M-E)

- (a) Experimentelle Festkörperphysik (WS)
- (b) Experimentelle Quantenoptik (SS)
- (c) Experimentelle Teilchenphysik (SS)

#### 2. Theoretische Physik (M-T)

- (a) Quanteninformationstheorie / Grundlagenprobleme der Quantenmechanik (SS)
- (b) Theoretische Teilchenphysik I (SS)
- (c) Theoretische Teilchenphysik II (WS)

### 2.2 Wahlbereich

Die Module im Wahlbereich sind aus dem Lehrangebot des Departments Physik für das Masterstudium zu wählen. Der Umfang der Module im Wahlbereich ist nicht festgelegt und die Module werden gemäß dem zugeordneten Arbeitsaufwand mit 3, 6 oder 9 LCP bewertet. Thematisch erstrecken sich die Module im Wahlbereich über sechs verschiedene Gebiete, aus denen jeweils mindestens eine Veranstaltung pro Jahr angeboten wird. Neben den nachfolgend aufgeführten Modulen werden auch Fachkurse und weitere Wahlfächer des Departments Physik im Wahlbereich anerkannt. Auf Antrag kann der Prüfungsausschuss auch Module aus anderen Departments der naturwissenschaftlich-technischen Fakultät zulassen.

#### A. Methoden der Experimentalphysik (M-WA)

- (1) Statistische Methoden der Datenanalyse
- (2) Elektronikpraktikum
- (3) Detektorphysik
- (4) Beschleunigerphysik II

#### B. Festkörperphysik (M-WB)

- (1) Moderne Methoden der Röntgenphysik
- (2) Festkörperphysik der Nanostrukturen
- (3) Theorie der kondensierten Materie

#### C. Quantenoptik und Nano-Optik (M-WC)

- (1) Laserspektroskopie
- (2) Nano-Optik
- (3) Experimentelle Methoden der Quanten- und Nano-Optik
- (4) Quantentheorie des Lichts
- (5) Mathematik der Quantenmechanik
- (6) Quanteneffekte und Quantenparadoxa

#### D. Experimentelle Teilchen- und Astroteilchenphysik (M-WD)

- (1) Astroteilchenphysik
- (2) Kosmologie
- (3) Physik am Pierre Auger Observatorium
- (4) Physik am LHC

**E. Theoretische Teilchenphysik (M-WE):** Phänomenologie des Standardmodells

- (1) Flavourphysik
- (2) Hadronenphysik
- (3) Colliderphysik
- (4) Higgsphysik

**F. Theoretische Teilchenphysik (M-WF):** Fortgeschrittene Themen

- (1) Erweiterungen des Standardmodells
- (2) Effektive Feldtheorie und Renormierungsgruppe
- (3) Berechnung von Schleifendiagrammen
- (4) Spezielle Kapitel der Quantenfeldtheorie

## **2.3 Pflichtbereich**

Der Pflichtbereich setzt sich aus dem Masterpraktikum (9 LP), dem Hauptseminar (6 LP) und der einjährigen Forschungsphase (Vorbereitsprojekt 15 LP, Einarbeitungsprojekt 15 LP, Masterarbeit 30 LP) zusammen.

## 2.4 Liste der Module

Kürzel	Modulbezeichnung	LP
M-E1	Experimentelle Festkörperphysik	9
M-E2	Experimentelle Quantenoptik	9
M-E3	Experimentelle Teilchenphysik	9
M-T1	Quanteninformationstheorie	9
M-T2	Grundlagenprobleme der Quantenmechanik	9
M-T3	Theoretische Teilchenphysik I	9
M-T4	Theoretische Teilchenphysik II	9
M-WA1	Statistische Methoden der Datenanalyse	9
M-WA2	Elektronikpraktikum	6
M-WA3	Detektorphysik	6
M-WA4	Beschleunigerphysik II	3
M-WB1	Moderne Methoden der Röntgenphysik	6
M-WB2	Festkörperphysik der Nanostrukturen	6
M-WB3	Theorie der kondensierten Materie	6
M-WC1	Laserspektroskopie	6
M-WC2	Nano-Optik	6
M-WC3	Experimentelle Methoden der Quanten- und Nano-Optik	6
M-WC4	Quantentheorie des Lichts	6
M-WC5	Mathematik der Quantenmechanik	3
M-WC6	Quanteneffekte und Quantenparadoxa	6
M-WD1	Astroteilchenphysik	6
M-WD2	Kosmologie	6
M-WD3	Physik am Pierre Auger Observatorium	6
M-WD4	Physik am LHC	6
M-WE1	Flavourphysik	6
M-WE2	Hadronenphysik	6
M-WE3	Colliderphysik	6
M-WE4	Higgsphysik	6
M-WF1	Erweiterungen des Standardmodells	6
M-WF2	Effektive Feldtheorie und Renormierungsgruppe	6
M-WF3	Berechnung von Schleifendiagrammen	6
M-WF4	Spezielle Kapitel der Quantenfeldtheorie	3
M-P	Masterpraktikum	9
M-S	Hauptseminar	6
M-AV	Vorbereitungsprojekt	15
M-AE	Einarbeitungsprojekt	15
M-A	Masterarbeit	30

### 3 Modulbeschreibungen Fachkurse

#### 3.1 Experimentalphysik (M-E)

Modulbezeichnung	Experimentelle Festkörperphysik
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-E1
LSF-Signatur	4PHY20011V, 4PHY20012V
Sprache	Englisch
Turnus	jedes WS
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Dozent(in) der experimentellen Festkörperphysik
Lehrform	Vorlesung 4 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	270 h (90 h Kontaktzeit, 180 h Selbststudium)
Leistungspunkte	9
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden werden anhand ausgewählter Kapitel mit aktuellen Themen der Festkörperphysik vertraut gemacht und es werden ihnen die notwendigen Fachkenntnisse für den nachfolgenden Einstieg in die Masterarbeit vermittelt. In den Übungen lernen die Studierenden, festkörperphysikalische Probleme mathematisch zu formulieren und dafür Lösungen zu finden. Die Diskussion der genannten Schritte mit Kommilitonen und Übungsleitern fördert das Verständnis und entwickelt die Fähigkeit zur Kommunikation über physikalische Sachverhalte.
Inhalt	Elektronische Struktur der Festkörper Drudemodell, Sommerfeldmodell, Bändermodell, Kronig-Penney-Modell Bandstrukturen ausgewählter Metalle Optische Eigenschaften von Leitern, Plasmonen Bloch Funktionen, Blochoszillationen Weak and Tight-Binding Methoden Bewegung von Elektronen im Festkörper, effektive Masse Transportphänomene, Boltzmann-Gleichung, elektrische Leitfähigkeit von Metallen, Halbleiter Wiedemann-Franz Gesetz, Seebeck und Peltier-Effekt Halbleiter, Dotierung, thermische und elektrische Eigenschaften P-N-Übergang, Transportgleichungen und Prozesse Elektronen im Magnetfeld, Landau Niveaus, De Haas - van Alphen Effekt Quanten-Hall-Effekt Quantenmechanik der Austauschwechselwirkung, Arten des Magnetismus, Spin-Bahn-Kopplung Bandmagnetismus, Stonermodell, Messung magnetischer Strukturen Dzyaloshinskii–Moriya Wechselwirkung, Skyrmionen Ultraschnelle Magnetisierungsdynamik Ginzburg-Landau-Theorie der Phasenübergänge Kritische Phänomene, kritische Exponenten, Phasendiagramme, Spinodale Struktur und Dynamik weicher Materie
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, elektronische Medien, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Chaikin, Lubensky: Principles of condensed matter physics Ashcroft, Mermin: Festkörperphysik Dresselhaus: SolidState properties Gross und Marx: Festkörperphysik

Modulbezeichnung	Experimentelle Quantenoptik
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-E2
LSF-Signatur	4PHY20021V, 4PHY20022V
Sprache	Englisch
Turnus	jedes SS
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Dozent(in) der experimentellen Quantenoptik
Lehrform	Vorlesung 4 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	270 h (90 h Kontaktzeit, 180 h Selbststudium)
Leistungspunkte	9
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden lernen ausgewählte grundlegende Experimente und theoretische Konzepte der modernen Quantenoptik kennen und es werden ihnen die notwendigen Fachkenntnisse für den nachfolgenden Einstieg in die Masterarbeit vermittelt. In den Übungen lernen die Studierenden, physikalische Probleme zu erkennen, diese in Bezug zum Vorlesungsstoff zu setzen, mathematisch zu formulieren und Lösungen zu finden. Die Diskussion der genannten Schritte mit Kommilitonen und Übungsleitern fördert das Verständnis und entwickelt die Fähigkeit zur Kommunikation über physikalische Sachverhalte.
Inhalt	<p>Quantisierung des elektromagnetischen Feldes</p> <p>Kohärente Zustände, Gequetschte Zustände</p> <p>Korrelationsfunktionen</p> <p>Interferometer</p> <p>Semiklassische / Quantisierte Materie-Licht-Wechselwirkung, Dressed States</p> <p>Dekohärenz</p> <p>Resonator-Quantenelektrodynamik</p> <p>Gespeicherte Atome, Ionen, Moleküle</p> <p>Laserkühlung</p> <p>Bose-Einstein-Kondensation</p> <p>Verschränkung</p> <p>Grundzüge der Quanten-Informationsverarbeitung</p> <p>Grundzüge der Quantenmetrologie und Sensorik</p>
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	M-WC1, M-WC2, M-WC3, M-WC4
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, elektronische Medien, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	<p>Bachor: A Guide to Experiments in Quantum Optics</p> <p>Fox: Quantum Optics</p> <p>Gerry, Knight: Introductory Quantum Optics</p> <p>Grynberg, Aspect, Fabre: Introduction to Quantum Optics</p> <p>Haroche, Raimond: Exploring the Quantum</p> <p>Schleich: Quantum Optics in Phase</p>

Modulbezeichnung	Experimentelle Teilchenphysik
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-E3
LSF-Signatur	4PHY20031V, 4PHY20032V
Sprache	Deutsch
Turnus	jedes SS
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Dozent(in) der experimentellen Teilchenphysik
Lehrform	Vorlesung 4 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	270 h (90 h Kontaktzeit, 180 h Selbststudium)
Leistungspunkte	9
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden werden anhand ausgewählter Themen an die vorderste Front der Forschung herangeführt. Es werden dazu die notwendigen Fachkenntnisse vermittelt, so dass die Studierenden in die Vorbereitungsphase der Masterarbeit einsteigen können. In den Übungen lernen die Studierenden, physikalische Probleme zu erkennen, diese in Bezug zum Vorlesungsstoff zu setzen, mathematisch zu formulieren und Lösungen zu finden. Die Diskussion der genannten Schritte mit Kommilitonen und Übungsleitern fördert das Verständnis und entwickelt die Fähigkeit zur Kommunikation über physikalische Sachverhalte.
Inhalt	Standardmodell der Teilchenphysik Berechnung von Wirkungsquerschnitten Quark-Parton Modell, Strukturfunktionen Physik schwerer Quarks Schlüsselexperimente zum Standardmodell Physik jenseits des Standardmodells
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	M-WA3, M-WD1, M-WD2, M-WD3, M-WD4, M-WE1
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, elektronische Medien, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Berger: Elementarteilchenphysik Griffiths: Introduction to Elementary Particles

### 3.2 Theoretische Physik (M-T)

Modulbezeichnung	Quanteninformationstheorie
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-T1
LSF-Signatur	4PHY20111V, 4PHY20112V
Sprache	Englisch
Turnus	SS (jährlich im Wechsel mit M-T2)
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. O. Gühne
Lehrform	Vorlesung 4 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	270 h (90 h Kontaktzeit, 180 h Selbststudium)
Leistungspunkte	9
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden lernen fortgeschrittene theoretische Konzepte der klassischen und quantenmechanischen Informationstheorie kennen. Dadurch lernen sie, physikalische Probleme aus dem Blickwinkel der algorithmischen Komplexität zu betrachten. In den Übungen lösen die Studierenden Aufgaben zur Vertiefung des Vorlesungsstoffs. So wird trainiert, physikalische Probleme zu erkennen, diese in Bezug zum Vorlesungsstoff zu setzen, mathematisch zu formulieren und Lösungen zu finden. Die Diskussion der genannten Schritte mit Kommilitonen und Übungsleitern fördert das Verständnis und entwickelt die Fähigkeit zur Kommunikation über physikalische Sachverhalte.
Inhalt	Protokolle der Quanteninformation: Kryptographie, Teleportation Sicherheitsanalyse der Quantenkryptographie Quantencomputer und Quantenalgorithmen Quantenfehlerkorrektur Komplexitätsklassen von Problemen: P, NP, BQP, QMA Einweg-Quantencomputer Topologische Quanteninformationsverarbeitung
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung, evtl. zusätzlicher Vortrag über eine aktuelle Forschungsveröffentlichung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Nielsen, Chuang: Quantum Information Theory Barnett: Quantum Information Originalliteratur

Modulbezeichnung	Grundlagenprobleme der Quantenmechanik
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-T2
LSF-Signatur	4PHY20121V, 4PHY20122V
Sprache	Englisch
Turnus	SS (jährlich im Wechsel mit M-T1)
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. O. Gühne
Lehrform	Vorlesung 4 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	270 h (90 h Kontaktzeit, 180 h Selbststudium)
Leistungspunkte	9
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden lernen die mathematischen, physikalischen und philosophischen Grundlagenprobleme der Quantenmechanik kennen. Dadurch werden sie an aktuelle Forschungsthemen herangeführt. In den Übungen lösen die Studierenden Aufgaben zur Vertiefung des Vorlesungsstoffs. So wird trainiert, physikalische Probleme zu erkennen, diese in Bezug zum Vorlesungsstoff zu setzen, mathematisch zu formulieren und Lösungen zu finden. Die Diskussion der genannten Schritte mit Kommilitonen und Übungsleitern fördert das Verständnis und entwickelt die Fähigkeit zur Kommunikation über physikalische Sachverhalte.
Inhalt	Formalismus der Quantenmechanik Theoreme von Gleason, Kochen-Specker und Bell Nichtlokalität und EPR Argument Verschränkungstheorie Interpretation der Wellenfunktion Meßprozess in der Quantenmechanik
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung, evtl. zusätzlicher Vortrag über eine aktuelle Forschungsveröffentlichung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Peres: Quantum Theory Originalliteratur

Modulbezeichnung	Theoretische Teilchenphysik I
ggf. Untertitel	Quantenfeldtheorie und Grundlagen des Standardmodells
Kürzel	M-T3
LSF-Signatur	4PHY20131V, 4PHY20132V
Sprache	Englisch
Turnus	jedes SS
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Dozent(in) der theoretischen Teilchenphysik
Lehrform	Vorlesung 4 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	270 h (90 h Kontaktzeit, 180 h Selbststudium)
Leistungspunkte	9
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden verstehen die grundlegenden Konzepte der Quantenfeldtheorie als mathematisch-physikalische Basis der theoretischen Teilchenphysik, darüber hinaus auch für die Quantenoptik und Vielteilchenphysik. Zur Vertiefung des Vorlesungsstoffs lernen die Studierenden in den Übungen, Aufgaben zur Modellierung und Berechnung konkreter Systeme der Quantenfeldtheorie zu lösen.
Inhalt	Darstellungen der Lorentzgruppe Quantisierung freier Felder, Fermionen und Bosonen Klein-Gordon- und Dirac-Gleichung Lagrangedichte und Noether-Theorem Wechselwirkende Felder, Störungstheorie und Feynman-Diagramme $\phi^4$ -Theorie und Quantenelektrodynamik Berechnung von Streuquerschnitten und Zerfallsraten Grundbausteine des Standardmodells, Higgs-Mechanismus
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	M-E3, M-T4, M-WD4, M-WE1, M-WE4
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Peskin, Schroeder: Introduction to Quantum Field Theory Schwartz: Quantum Field Theory and the Standard Model Itzykson, Zuber: Quantum Field Theory Ryder: Quantum Field Theory Weinberg: Quantum Field Theory I

Modulbezeichnung	Theoretische Teilchenphysik II
ggf. Untertitel	Fortgeschrittene Quantenfeldtheorie und Strahlungskorrekturen im Standardmodell
Kürzel	M-T4
LSF-Signatur	4PHY20141V, 4PHY20142V
Sprache	Englisch
Turnus	jedes WS
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Dozent(in) der theoretischen Teilchenphysik
Lehrform	Vorlesung 4 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	270 h (90 h Kontaktzeit, 180 h Selbststudium)
Leistungspunkte	9
Inhaltliche Voraussetzungen	M-T3
Lernziele	Die Studierenden verstehen die theoretischen Konzepte, die insbesondere bei der Quantisierung von Eichtheorien zum Tragen kommen. Dazu gehören die Herleitung von Korrelationsfunktionen in der Quantenfeldtheorie im Pfadintegralformalismus und die damit verbundenen Symmetriebetrachtungen. Die Studierenden können die Renormierung von Feldern und zusammengesetzten Operatoren im Rahmen des Standardmodells nachvollziehen und beherrschen die dazu notwendigen Berechnungsmethoden von Schleifenintegralen. Die Studierenden können die erlernten Methoden für theoretische Präzisionsvorhersagen von elementaren Observablen in der Teilchenphysik anwenden.
Inhalt	Pfadintegralformalismus, effektive Wirkung Symmetrien und Ward-Takahashi-Identitäten Quantisierung von nicht-abelschen Eichtheorien Fadeev-Popov-Geister und BRST-Symmetrie Schleifenintegrale und Renormierung Operatorproduktentwicklung Hadronische Strukturfunktionen und Partonverteilungsfunktionen Anwendung auf elementare Standardmodell-Prozesse am LHC
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	M-WE2, M-WE3, M-WF1, M-WF2, M-WF3, M-WF4
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Peskin, Schroeder: Introduction to Quantum Field Theory Schwartz: Quantum Field Theory and the Standard Model Weinberg: Quantum Field Theory II Collins: Renormalization Donoghue, Golowich, Holstein: Dynamics of the Standard Model Ellis, Stirling, Webber: QCD and Collider Physics

## 4 Modulbeschreibungen Wahlbereich

### 4.1 Methoden der Experimentalphysik (M-WA)

Modulbezeichnung	Statistische Methoden der Datenanalyse
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WA1
LSF-Signatur	4PHY91011V, 4PHY91012V
Sprache	Deutsch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WA
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. P. Buchholz
Lehrform	Vorlesung 3 SWS, Übung 3 SWS
Arbeitsaufwand	270 h (90 h Kontaktzeit, 180 h Selbststudium)
Leistungspunkte	9
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden werden mit den Grundlagen der Datenanalyse und der Anwendung auch komplexerer statistischer Methoden vertraut gemacht. Die Kompetenzen zur Lösung typischer Fragestellungen zur Analyse im Rahmen einer Bachelor- oder Masterarbeit werden vermittelt.
Inhalt	Beschreibung von Daten, Deskriptive Statistik Fundamentale Konzepte und Begriffe der Statistik Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen Monte-Carlo-Methode Parameterschätzung Hypothesentests Konfidenzintervalle und Ausschlußgrenzen Ereignisklassifikation Systematische Unsicherheiten Multivariate Methoden
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, elektronische Medien, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium, praktische Übungen mit Datenanalysesoftware auf dem Rechner.
Literatur	Barlow: Statistics – A Guide to the Use of Statistical Methods in the Physical Sciences Bevan: Statistical Data Analysis for the Physical Sciences Blobel, Lohrmann: Statistische und numerische Methoden der Datenanalyse Bohm, Zech: Introduction to Statistics and Data Analysis for Physicists Brandt: Datenanalyse für Naturwissenschaftler und Ingenieure Cowan: Statistical Data Analysis

Modulbezeichnung	Elektronikpraktikum
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WA2
LSF-Signatur	4PHY91021V, 4PHY91022V
Sprache	Deutsch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WA
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. P. Buchholz
Lehrform	Vorlesung 2 SWS, Übung 4 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (90 h Kontaktzeit, 90 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden werden mit den Grundlagen der Elektronik vertraut gemacht. Dazu werden in einer integrierten Veranstaltung sowohl die Grundlagen im Vorlesungsstil vermittelt als auch Versuche durchgeführt. Die zu untersuchenden Elektronikschaltungen werden dabei parallel als Versuche aufgebaut und mit PSPICE auf dem PC simuliert. Die Studierenden lernen sowohl den Umgang mit den Bauteilen als auch mit CAD-Programmen. Der kritische Vergleich der Messungen an den tatsächlichen Schaltungen mit den Simulationen ist ein weiteres Lernziel.
Inhalt	Einführung in PSPICE Passive Bauelemente: Widerstand, Kondensator, Spule Einführung in die Halbleiterphysik Diodenschaltungen Transistorschaltungen Feldeffekttransistoren Operationsverstärker
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, elektronische Medien, Simulationen am PC und praktische Übungen mit diskreten Bauelementen.
Literatur	Duyan, Hahnloser, Traeger: PSPICE Hering, Bressler, Gutekunst: Elektronik für Ingenieure Horowitz, Hill: The Art of Electronics Tietze, Schenk: Halbleiter-Schaltungstechnik v.Wangenheim: PC-Simulation elektronischer Grundsaltungen

Modulbezeichnung	Detektorphysik
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WA3
LSF-Signatur	4PHY91031V, 4PHY91032V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich B-WA
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. I. Fleck
Lehrform	Vorlesung 3 SWS, Übung 1 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden werden mit den Grundlagen der Detektorphysik vertraut gemacht. Sie lernen die Funktionsweise von Detektoren zu verstehen und die physikalischen Prinzipien, die für die Erzeugung von Signalen verantwortlich sind. Sie lernen die Anwendungsfelder verschiedener Arten von Detektoren kennen.
Inhalt	Wechselwirkung zwischen Teilchen und Materie Detektoreigenschaften Gasgefüllte Detektoren Festkörperdetektoren Teilchenidentifikation Medizinische Anwendungen
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, elektronische Medien, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Gruppen, Schwartz: Particle Detectors Gruppen, Buvat: Handbook of Particle Detection and Imaging Kolanowski, Wermes: Teilchendetektoren

Modulbezeichnung	Beschleunigerphysik II
ggf. Untertitel	Supraleitende HF Systeme
Kürzel	M-WA4
LSF-Signatur	4PHY91041V, 4PHY91042V
Sprache	Deutsch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WA
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. J. Knobloch
Lehrform	Vorlesung 1 SWS, Praktikum 1 SWS (Blockveranstaltung)
Arbeitsaufwand	90 h (30 h Kontaktzeit, 60 h Selbststudium)
Leistungspunkte	3
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Aufbauend auf die allgemeine Beschleunigerphysik, werden Studierende mit den Grundlagen der supraleitenden HF (SRF) vertraut gemacht – eine Schlüsseltechnologie für viele moderne Beschleuniger. Dazu werden in einer integrierten Veranstaltung sowohl die Grundlagen im Vorlesungsstil als auch mit rechnergestützten Simulationen vermittelt. Die Studierenden erlangen somit die Fähigkeit im Bereich der Beschleunigerphysik, sowie SRF, Masterarbeiten zu absolvieren.
Inhalt	Rückblick Kupfer HF Kavitäten und deren Grenzen (Verluste, HOMs) Vorteile der supraleitenden Resonatoren Einführung in die Supraleitung und Theorie der supraleitenden HF Systeme Praktische Grenzen von SRF Resonatoren und Lösungen Produktion und Behandlung von SRF Systemen Komponenten für den Betrieb von SRF Kavitäten im Beschleuniger Praktikum: Simulationen und Optimierung von SRF Systemen
Studienleistung	Schriftliche Ausarbeitung eines Praktikumsberichts
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Anerkannter Praktikumsbericht
Verwendbarkeit des Moduls	
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, elektronische Medien, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Padamsee, Knobloch, Hays: Superconducting RF for Particle Accelerators

**4.2 Festkörperphysik (M-WB)**

Modulbezeichnung	Moderne Methoden der Röntgenphysik
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WB1
LSF-Signatur	4PHY93011V, 4PHY93012V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WB
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. C. Gutt
Lehrform	Vorlesung 2 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden kennen grundlegende Konzepte der Röntgenphysik: sie verstehen die Entstehung der Strahlung und die physikalischen Mechanismen der Wechselwirkungsprozesse. Die mathematischen Grundlagen zur Beschreibung von Interferenzphänomenen in der kondensierten Materie werden beherrscht und können selbständig angewendet werden. Die Studierenden verstehen wie mittels Röntgenstrahlung die atomaren Eigenschaften von kondensierter Materie gemessen werden können. Die Kenntnis moderner kohärenzbasierter und zeitaufgelöster Methoden versetzt die Studierenden in die Lage, eine Bachelor bzw. Masterarbeit im Bereich der Forschung mit Synchrotronstrahlungsquellen bzw. freien Elektronen-Lasern durchzuführen.
Inhalt	Wechselwirkung von Röntgenstrahlung mit Materie Absorption, Streuung, harte und weiche Röntgenstrahlung Quellen für Röntgenstrahlung Röhren, Synchrotron und Freie Elektronen Laser Beugung an Kristallen, amorphen Systemen, Nanostrukturen Laue Gleichungen, Ewald- Kugel, Beugungsmethoden Phononenspektroskopie, Gitterschwingungen, Debye-Waller-Faktor Magnetische Beugung, XMCD Effekt, resonante Streuung Kohärenz Ultraschnelle Röntgenbeugung Anwendungen in der Nanowissenschaft
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, elektronische Medien, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Als Nielsen, McMorro: Modern Methods of X-ray Physics Warren: X-ray diffraction

Modulbezeichnung	Festkörperphysik der Nanostrukturen
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WB2
LSF-Signatur	4PHY93021V, 4PHY93022V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WB
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. C. Busse
Lehrform	Vorlesung 2 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden lernen Konzepte, Methoden und Phänomene der Festkörperphysik der Nanostrukturen kennen. Diese werden auch anhand von neuesten Beispielen aus der aktuellen Literatur erläutert. Die Studierenden lernen, wie die Reduzierung der Dimensionalität die Eigenschaften der Festkörper modifiziert. Sie werden in die Lage versetzt, Größenabschätzungen der zu erwartenden Effekte vorzunehmen und neue Phänomene auch mit Blick auf mögliche Anwendungen zu bewerten. Weiterhin lernen die Studierenden, wissenschaftliche Literatur zu lesen und kritisch zu bewerten. In den Übungen lernen die Studierenden, physikalische Probleme aus der Nanowelt mathematisch zu formulieren und zu lösen. Die Diskussion der genannten Schritte mit Kommilitonen und Übungsleitern fördert das Verständnis und entwickelt die Fähigkeit zur Kommunikation über physikalische Sachverhalte.
Inhalt	Elektronische Struktur und Zustandsdichte in 3D, 2D, 1D und 0D Generelle Lösung der Schrödingergleichung im Potenzialtopf Quantenzustände in 1D und 0D Nanostrukturen Oberflächenkristallographie Chemisorption und Physisorption, heterogene Katalyse 2D-Materialien (Graphen, hexagonales Bornitrid, Übergangsmetalle der Dichalkogenide) Dirac-artige Bandstrukturen Geometrische Struktur und Bandstruktur von Halbleiter-Nanostrukturen Einfluss von Verunreinigungen und Gitterverzerrungen auf die Bandstruktur von Halbleiter-Nanostrukturen Exzitonen und Ladungsträgerrekombination Methoden zur Herstellung von Nanostrukturen, dünnen Schichten und zweidimensionalen Materialien Röntgenographische Bestimmung der Gitterstruktur Hochauflösende Mikroskopische Methoden (STM, AFM, SEM, TEM)
Studienleistung	Mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, elektronische Medien, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Oura et al.: Surface Science - An Introduction Harrison: Quantum Wells, Wires and Dots Grundman: The Physics of Semiconductors Bimberg: Semiconductor Nanostructures

Modulbezeichnung	Theorie der kondensierten Materie
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WB3
LSF-Signatur	4PHY94091V, 4PHY94092V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WB
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. W. Kilian
Lehrform	Vorlesung 2 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden werden mit den theoretischen Grundlagen und elementaren Modellen der Theorie der kondensierten Materie vertraut gemacht und lernen, wesentliche Konzepte und Zusammenhänge in der modernen Quantenfeldtheorie zu erfassen.
Inhalt	Quantenfeldtheorie für Vielteilchensysteme Pfad- und Feldintegral für Bosonen und Fermionen Matsubara-Formalismus Störungsrechnung Elektronenstruktur im Festkörper Supraleitung
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Altland, Simmons: Condensed Matter Field Theory Mahan: Many-Particle Physics Zinn-Justin: Quantum Field Theory and Critical Phenomena

### 4.3 Quantenoptik und Nano-Optik (M-WC)

Modulbezeichnung	Laserspektroskopie
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WC1
LSF-Signatur	4PHY92011V, 4PHY92012V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WC
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	PD Dr. M. Johanning
Lehrform	Vorlesung 2 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden werden mit den Instrumenten und Methoden der Laserspektroskopie vertraut gemacht. Über die Kenntnis des Atomaufbaus und dessen Abhängigkeit von Umgebungsgrößen sowie der Licht-Materie-Wechselwirkung kann die Nutzung des Atoms als Sensor verstanden werden. Weiterhin erlernen die Studierenden wie aus dem spektroskopischen Fingerabdruck Information über Probenzusammensetzung und Zustandsgrößen wie Druck oder Temperatur extrahiert werden können. Moderne laserspektroskopische Methoden zur Nutzung von Atomen als Frequenzstandard sowie Methoden zur Zustandsmanipulation werden vermittelt.
Inhalt	Atome, Moleküle und ihre Wechselwirkung mit Licht und statischen und dynamischen elektromagnetischen Feldern kohärente Wechselwirkung, Dekohärenz, Optische Bloch-Gleichungen und Ratengleichungen Grundlagen spektroskopischer Instrumente: z. B. Matrizenoptik, Resonatoren, Wellenlängenselektion Laser: Aufbau und Eigenschaften, Lasermoden, kontinuierliche Laser, gepulste Laser, Lasermodulation Lineare Spektroskopie: Absorption, Emission, Methoden zur Empfindlichkeitssteigerung, Messungen von Dichten, Feldern, Temperaturen Nichtlineare Spektroskopie: z. B. Sättigungsspektroskopie, Frequenzmischung und Erzeugung von Harmonischen Moderne Laseranwendungen: Präzisionsspektroskopie, Frequenzkamm, Laserkühlung
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	M-P, M-E2, M-WC2, M-WC3
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, elektronische Medien, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Demtröder: Laser Spectroscopy Foot: Atomic Physics Fox: Quantum Optics Siegman: Lasers Suter: The Physics of Laser-Atom Interactions

Modulbezeichnung	Nano-Optik
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WC2
LSF-Signatur	4PHY92021V, 4PHY92022V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WC
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. M. Agio
Lehrform	Vorlesung 2 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Vertieftes Kennenlernen der grundlegenden Phänomene der Nano-Optik, die teilweise anhand von Vorführexperimenten erläutert werden. In den Übungen wird trainiert, physikalische Probleme zu erkennen, diese in Bezug zum Vorlesungsstoff zu setzen, mathematisch zu formulieren und Lösungen zu finden. Die Diskussion der genannten Schritte mit Kommilitonen und Übungsleitern fördert das Verständnis und entwickelt die Fähigkeit zur Kommunikation über physikalische Sachverhalte.
Inhalt	Theoretische Grundlagen Ausbreitung und Fokussierung von optischen Feldern Auflösung und Lokalisierung Nanoskalige optische Mikroskopie Optische Wechselwirkungen und Quantenemitter Einzelmolekülspektroskopie Photonische Kristalle Oberflächenplasmon-Polaritonen Optische Antennen Optische Kräfte
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	M-E2, M-WC1, M-WC3, M-WC4
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, elektronische Medien, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Novotny, Hecht: Principles of Nano-Optics Agio: Molecular Scattering and Fluorescence in Strongly Confined Optical Fields Lakowicz: Principles of Fluorescence Spectroscopy

Modulbezeichnung	Experimentelle Methoden der Quanten- und Nano-Optik
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WC3
LSF-Signatur	4PHY92031V, 4PHY92032V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WC
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. M. Agio, Prof. Dr. C. Wunderlich
Lehrform	Vorlesung 2 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden lernen einige grundlegende experimentelle Techniken kennen, die für moderne Experimente der Quanten- und Nanooptik wichtig sind. Der Einblick in dieses Repertoires an Techniken erleichtert den Studierenden den Einstieg in das eigenständige Experimentieren im Rahmen einer Masterarbeit. In den Übungen, auch im Labor, lernen die Studierenden praxisnah den Umgang mit modernen Instrumenten.
Inhalt	Ortsaufgelöste Einzelphotonendetektion Zeitkorrelierte Einzelphotonendetektion Konfokale Mikroskopie Lock-In Verstärker Akusto- und elektrooptische Modulation von Laserlicht Diodenlaser, Lasersysteme Methoden der Laserstabilisierung Erzeugung maßgeschneiderter Radiofrequenzimpulse Vakuumtechnologie Präzise Bewegung und Positionierung
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	M-E2, M-WC1, M-WC2, M-WC4
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, elektronische Medien, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium, Übungen im Labor, Übungen zur Einführung in die LabView-Programmierung.
Literatur	Demtröder: Laser Spectroscopy Lakowicz: Principles of fluorescence spectroscopy Migdall, Fan, Bienfang: Single-Photon Generation and Detection

Modulbezeichnung	Quantentheorie des Lichts
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WC4
LSF-Signatur	4PHY95011V, 4PHY95012V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WC
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. O. Gühne
Lehrform	Vorlesung 2 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Verständnis der theoretischen Konzepte der Quantenoptik, insbesondere die Beschreibung von Quantensystemen im Phasenraum. Weiterhin sollen die Studierenden lernen, die theoretischen Konzepte auf moderne Experimente anwenden zu können.
Inhalt	<p>Quantisierung des elektromagnetischen Feldes</p> <p>Wignerfunktion, Gaußsche Zustände</p> <p>Theorie des Lasers</p> <p>Optische Komponenten</p> <p>Wechselwirkung von Licht mit Materie</p> <p>Optomechanik</p>
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung, evtl. zusätzlicher Vortrag über eine aktuelle Forschungsveröffentlichung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	M-T1
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	<p>Schleich: Quantum Optics in Phase Space</p> <p>Loudon: The Quantum Theory of Light</p>

Modulbezeichnung	Mathematik der Quantenmechanik
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WC5
LSF-Signatur	4PHY95021V, 4PHY95022V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WC
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. O. Gühne
Lehrform	Vorlesung 1 SWS, Übung 1 SWS (Blockveranstaltung)
Arbeitsaufwand	90 h (30 h Kontaktzeit, 60 h Selbststudium)
Leistungspunkte	3
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Verständnis der mathematischen Struktur der Quantenmechanik, insbesondere der modernen Formulierung von Quantenkanälen und Messungen.
Inhalt	Theorie der Hilberträume und Spektraldarstellung Zustände und Effekte Observable und gemeinsame Messbarkeit Vollständig positive Abbildungen und Kanäle Verallgemeinerte Messungen (POVMs) und Instrumente Tensorprodukte
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	M-T2
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Heinosaari, Ziman: The Mathematical Language of Quantum Theory Busch, Lahti, Pellonpää, Ylino: Quantum Measurement

Modulbezeichnung	Quanteneffekte und Quantenparadoxa
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WC6
LSF-Signatur	4PHY95031V, 4PHY95032V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WC
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. O. Gühne
Lehrform	Vorlesung 2 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden kennen überraschende Effekte der Quantenmechanik, die teilweise auch technologisch relevant sind. Dadurch wird der Unterschied zur klassischen Physik sichtbar.
Inhalt	Wechselwirkungsfreie Messung Zeno-Effekt Mehrfachspaltexperimente Aharonov–Casher-Effekt Überlichtschnelles Tunneln Zufall in Quantenmessungen Wigners Freund Das Meßproblem & Dekohärenz
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung, evtl. zusätzlicher Vortrag über eine aktuelle Forschungsveröffentlichung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	M-T2
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Aharonov, Rohrlich: Quantum Paradoxes: Quantum Theory for the Perplexed Originalliteratur

**4.4 Experimentelle Teilchen- und Astroteilchenphysik (M-WD)**

Modulbezeichnung	Astroteilchenphysik
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WD1
LSF-Signatur	4PHY91051V, 4PHY91052V
Sprache	Deutsch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WD
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. M. Risse
Lehrform	Vorlesung 2 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden werden mit den Grundlagen der Astroteilchenphysik vertraut gemacht. Es werden zudem Einsichten in aktuelle Forschungsgebiete der Astroteilchenphysik vermittelt.
Inhalt	Kosmische Strahlung: direkte und indirekte Beobachtung, Beschleunigung und Quellen, Propagation, Luftschauer, Experimente Aktuelle Ergebnisse: Fluss, Zusammensetzung, Anisotropien, Wechselwirkungsprozesse, neue Physik Gamma-Astronomie: Gamma-Ray-Bursts, TeV-Gamma-Astronomie Neutrino-Astronomie: Sonne, Supernova 1987a, Hochenergieneutrinos
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	M-WD3
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, elektronische Medien, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Gruppen: Astroteilchenphysik Klapdor-Kleingrothaus, Zuber: Teilchenastrophysik

Modulbezeichnung	Kosmologie
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WD2
LSF-Signatur	4PHY91061V, 4PHY91062V
Sprache	Deutsch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus M-WD
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. M. Risse
Lehrform	Vorlesung 2 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden werden mit den Grundlagen der Kosmologie vertraut gemacht. Sie lernen Beobachtungsmethoden und mathematische Beschreibungen des Universums kennen. Es werden zudem Einsichten in aktuelle Forschungsgebiete der Kosmologie vermittelt.
Inhalt	Beobachtungsinstrumente Weltmodelle, Standardmodell der Kosmologie Bestimmung der kosmologischen Parameter Dunkle Energie, Dunkle Materie Urknall, Inflation Elemententstehung Kosmische Hintergrundstrahlung Strukturbildung
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Schneider: Einführung in die extragalaktische Astronomie und Kosmologie

Modulbezeichnung	Physik am Pierre Auger Observatorium
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WD3
LSF-Signatur	4PHY91071V, 4PHY91072V
Sprache	Deutsch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WD
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. M. Risse
Lehrform	Vorlesung 2 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Das internationale Pierre-Auger-Observatorium ist das weltweit größte Experiment zur Messung der kosmischen Strahlung bei höchsten Energien. Von den physikalischen Grundlagen, über das Messprinzip und Datenanalyse, bis hin zu aktuellen Resultaten und offenen Fragen lernen die Studierenden wesentliche Aspekte dieses aktuellen Forschungszweiges aus erster Hand kennen.
Inhalt	Luftschauer Auger-Detektoren Kosmische Strahlung Energiespektrum Massenzusammensetzung Anisotropien Suche nach ultrahochenergetischen Photonen und Neutrinos Suche nach Verletzung der Lorentzinvarianz Hadronische Wechselwirkungen bei höchsten Energien
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	M-E3
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, elektronische Medien, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Gruppen: Astroteilchenphysik Klapdor-Kleingrothaus, Zuber: Teilchenastrophysik

Modulbezeichnung	Physik am LHC
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WD4
LSF-Signatur	4PHY91081V, 4PHY91082V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WD
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. I. Fleck
Lehrform	Vorlesung 2 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden lernen die Prozesse in Proton-Proton-Kollisionen kennen. Sie werden an die aktuellen Ergebnisse des LHC herangeführt und somit auf die Forschungsarbeit in der experimentellen Teilchenphysik vorbereitet. Die Studierenden können Jetalgorithmen verstehen und anwenden. Die Schnittstellen zwischen theoretischer und experimenteller Teilchenphysik werden verdeutlicht.
Inhalt	Harter Streuprozess Hadronisierung Jetalgorithmen Strukturfunktionen Eichbosonenerzeugung Physik des Top-Quarks Physik des Higgs-Bosons
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	M-WE3
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Thomson: Modern Particle Physics Berger: Elementarteilchenphysik

**4.5 Theoretische Teilchenphysik: Phänomenologie des Standardmodells (M-WE)**

Modulbezeichnung	Flavourphysik
ggf. Untertitel	Flavourphysik in Experiment und Theorie
Kürzel	M-WE1
LSF-Signatur	4PHY94011V, 4PHY94012V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WE
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. T. Mannel, Prof. Dr. B Spaan (TU Dortmund)
Lehrform	Vorlesung 2 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	M-T3
Lernziele	Ziel der Vorlesung ist den Studierenden einen Überblick über die modernen Methoden der Flavourphysik zu vermitteln. Auf der theoretischen Seite sollen die Grundlagen des Standardmodells für die Flavourphysik erlernt werden, auf der experimentellen Seite werden die grundlegenden Techniken der aktuellen und geplanten Experimente der Flavourphysik erlernt.
Inhalt	<p>Einführung in die Flavourphysik          Flavour im Standardmodell          CKM Matrix          Messungen von CKM Matrixelementen          Physik des Top-Quarks          Verletzung der CP Symmetrie          Effektive Wechselwirkung für schwache Zerfälle          Seltene Zerfälle in Experiment und Theorie          Flavourphysik von Leptonen</p> <p>Das Modul ist als integrierter Kurs zwischen Experiment und Theorie konzipiert, die theoretischen Vorlesungen werden von einem Siegener Theoretiker, die experimentellen von einem Dortmunder Experimentalphysiker gelesen.</p>
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	M-WE2, M-WF1, M-WF2
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb und Beamerpräsentation, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Bevan et al: The Physics of the B Factories, Eur. Phys. J. C74 (2014) 3026

Modulbezeichnung	Hadronenphysik
ggf. Untertitel	Hadronen in Quantenchromodynamik
Kürzel	M-WE2
LSF-Signatur	4PHY94021V, 4PHY94022V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WE
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. T. Feldmann
Lehrform	Vorlesung 2 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	M-T3, M-T4
Lernziele	Die Studierenden sind mit dem Aufbau von Mesonen und Baryonen im Quarkmodell, der Nomenklatur und den relevanten Quantenzahlen vertraut. Die Studierenden können hadronische Zerfälle und Streuprozesse im Partonbild beschreiben und auf die relevanten hadronischen Größen reduzieren. Die Studierenden kennen die approximativen Symmetrien und die daraus resultierenden theoretischen Methoden, um elementare hadronische Observable quantitativ abzuschätzen.
Inhalt	Quarkstruktur und Spektroskopie von Hadronen Isospin, Hyperladung, $SU(3)$ Flavoursymmetrie Symmetrien von Hadronen mit schweren Quarks Phänomenologie von hadronischen Zerfällen und Streuprozessen Hadronische Strukturfunktionen Zerfallskonstanten und Formfaktoren Chirale Störungstheorie Effektive Theorie schwerer Quarks Operatorproduktentwicklung, Quark- und Gluonkondensate Analytizität, Unitarität und Dispersionsrelationen QCD-Summenregeln und Lichtkegelsummenregeln
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	MWE-1, MWE-3, MWF-2
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Nachtmann: Elementarteilchenphysik Halzen, Martin: Dynamics of the Standard Model Donoghue, Golowich, Goldstein: Dynamics of the Standard Model

Modulbezeichnung	Colliderphysik
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WE3
LSF-Signatur	4PHY94031V, 4PHY94032V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WE
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. G. Bell
Lehrform	Vorlesung 3 SWS, Übung 1 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	M-T3, M-T4
Lernziele	Den Studierenden werden die Grundlagen der theoretischen Colliderphysik vermittelt, insbesondere verstehen Sie wie Ultraviolett- und Infrarotdivergenzen in der Störungsentwicklung der Quantenchromodynamik zu interpretieren sind. Darüber hinaus lernen sie grundlegende Konzepte der Jetphysik kennen und sie bekommen einen Einblick in die wichtigsten Streuprozesse des LHC.
Inhalt	Grundlagen der Quantenchromodynamik, Renormierung $e^+e^-$ Streuung, Infrarotsingularitäten Jet-Algorithmen, Event-shape Variablen Operatorproduktentwicklung Tiefinelastische Streuung, Parton Modell Partonverteilungsfunktionen, DGLAP Gleichungen Proton-Proton Streuung, Drell-Yan Produktion Soft-Collinear Effective Theory
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	M-WD4, M-WE4, M-WF2, M-WF3
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Peskin, Schröder: Introduction to Quantum Field Theory Schwartz: Quantum Field Theory and the Standard Model Ellis, Stirling, Webber: QCD and collider physics Dissertori, Knowles, Schmelling: QCD Becher, Broggio, Ferroglia: Introduction to Soft-Collinear Effective Theory

Modulbezeichnung	Higgsphysik
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WE4
LSF-Signatur	4PHY94041V, 4PHY94042V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WE
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. W. Kilian
Lehrform	Vorlesung 2 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	M-T3
Lernziele	Die Studierenden werden mit phänomenologischen Aspekten und theoretischen Konzepten der Higgsphysik vertraut gemacht. Sie lernen, Motivation und mögliche Szenarien für neue Phänomene im Kontext des aktuellen Wissensstands der Teilchenphysik einzuschätzen.
Inhalt	Spontane Symmetriebrechung in der Quantenfeldtheorie Higgs-Mechanismus im Standardmodell der Teilchenphysik Zerfälle des Higgs-Bosons Produktion des Higgs-Bosons an $e^+e^-$ und $pp$ -Collidern Strahlungskorrekturen zu Higgs-Prozessen Anomale Higgs-Kopplungen und effektive Theorie Erweiterte Higgs-Modelle
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	M-WE3, M-WF1, M-WF2
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Gunion, Dawson, Haber, Kane: The Higgs Hunter's Guide LHC Higgs Cross Section WG: Handbook of LHC Higgs Cross Sections

**4.6 Theoretische Teilchenphysik: Fortgeschrittene Methoden (M-WF)**

Modulbezeichnung	Erweiterungen des Standardmodells
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WF1
LSF-Signatur	4PHY94051V, 4PHY94052V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WF
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. T. Feldmann
Lehrform	Vorlesung 2 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	M-T3, M-T4
Lernziele	Die Studierenden sind mit den Unzulänglichkeiten des Standardmodells der Teilchenphysik vertraut, welche die Suche nach "neuer Physik" an aktuellen Beschleunigerexperimenten motivieren. Die Studierenden kennen die theoretischen Konzepte, die zur Konstruktion von Modellen jenseits des Standardmodells benutzt werden und wissen, mit Hilfe welcher Observablen solche Ansätze bestätigt oder ausgeschlossen werden können.
Inhalt	Offene Fragen im Standardmodell Supersymmetrie und Poincaré-Gruppe Konstruktion und Phänomenologie des MSSM Theorien mit vereinheitlichter Eichgruppe: SU(5), SO(10), Pati-Salam Little-Higgs-Modelle und Compositeness Modelle mit extra Raumzeit-Dimensionen
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	MWE-1, MWE-4
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Weinberg: QFT III Kane: Perspectives on SUSY Martin: hep-ph/9709356 Georgi: Lie Algebras in Particle Physics Slansky: Phys.Rept. 79, 1 Perelstein: hep-ph/0512128 Schmaltz,Tucker-Smith: hep-ph/0502182

Modulbezeichnung	Effektive Feldtheorie und Renormierungsgruppe
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WF2
LSF-Signatur	4PHY94061V, 4PHY94062V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WF
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. T. Mannel
Lehrform	Vorlesung 2 SWS, Übung 2 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	M-T3, M-T4
Lernziele	Die Studierenden lernen die Grundlagen der effektiven Feldtheorien zu beherrschen und auf Beispiele anzuwenden. Konkrete Lernziele der Vorlesung sind deshalb ein vertieftes Verständnis der Renormierung in der Quantenfeldtheorie und die sichere Anwendung von Renormierungsgruppenmethoden in verschiedenen Bereichen.
Inhalt	Erzeugende Funktionale und Funktionalintegrale Effektive Wirkung und effektive Lagrangedichten Renormierungsgruppe, gleitende Kopplungskonstanten Dimensionale Regularisierung und Methode der Regionen Summation von großen Logarithmen in der Störungstheorie Fermitheorie der schwachen Wechselwirkung Chirale Störungstheorie Effektive Theorie schwerer Quarks und Heavy Quark Expansion Soft-Collinear Effective Theory
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	M-WE1, M-WE3, M-WF1, M-WF3
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, Übungen mit Aufgaben zum angeleiteten Selbststudium.
Literatur	Petrov: Effective Field Theories

Modulbezeichnung	Berechnung von Schleifendiagrammen
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WF3
LSF-Signatur	4PHY94071V, 4PHY94072V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WF
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	PD Dr. T. Huber
Lehrform	Vorlesung 3 SWS, Übung 1 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (60 h Kontaktzeit, 120 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	M-T3, M-T4
Lernziele	Die Berechnung von Strahlungskorrekturen in der Quantenfeldtheorie erfordert die Berechnung sog. Schleifenintegrale. Basierend auf der Methode der dimensional Regularisierung lernen die Studierenden analytische und numerische Methoden zur Berechnung solcher Integrale kennen, und verstehen den Zusammenhang mit Streu- und Zerfallsprozessen an Beschleunigern. In den Übungen vertiefen die Studierenden den Vorlesungsstoff und machen sich mit vorhandenen Rechenpaketen zur Berechnung von Schleifendiagrammen am Computer vertraut.
Inhalt	Eigenschaften von Schleifenintegralen in Dimensionaler Regularisierung Feynman und Schwinger Parameter Methode der Sektorzerlegung Mellin-Barnes Darstellungen Integration-by-parts Methoden, Reduktion auf Masterintegrale Methode der Differentialgleichungen Asymptotische Entwicklungen
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	M-WE3, M-WE4, M-WF2
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb und Präsentationen am PC, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Smirnov: Analytic Tools for Feynman Integrals

Modulbezeichnung	Spezielle Kapitel der Quantenfeldtheorie
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-WF4
LSF-Signatur	4PHY94081V, 4PHY94082V
Sprache	Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung aus Wahlbereich M-WF
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. T. Mannel
Lehrform	Vorlesung 1 SWS, Übung 1 SWS (Blockveranstaltung)
Arbeitsaufwand	90 h (30 h Kontaktzeit, 60 h Selbststudium)
Leistungspunkte	3
Inhaltliche Voraussetzungen	M-T3, M-T4
Lernziele	Aufbauend auf Grundkenntnissen in der Quantenfeldtheorie sollen die Studierenden einige spezielle Eigenschaften von Quantenfeldtheorien kennenlernen, die in verschiedenen Bereichen der Physik relevant sind. Lernziel ist ein sicherer und kritischer Umgang mit fortgeschrittenen Methoden der Quantenfeldtheorie.
Inhalt	Fortgeschrittene Funktionalintegralmethoden in der Teilchenphysik Darstellung von Symmetrien in der Quantenfeldtheorie Spontane Symmetriebrechung und Higgs Mechanismus Anomale Symmetrien Mathematische Grundlagen von Eichtheorien Quantisierung von Eichtheorien Nichtstörungstheoretische Aspekte der Quantenfeldtheorie Infrarotprobleme in der Quantenfeldtheorie
Studienleistung	Schriftliche oder mündliche Prüfung
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Bestandene Prüfung
Verwendbarkeit des Moduls	
Medienformen	Vorlesung mit Tafelanschrieb, Übungen mit Aufgaben zum Selbststudium.
Literatur	Weinberg: The Quantum Theory of Fields, Vol. 1,2.

## 5 Modulbeschreibungen Pflichtbereich

### 5.1 Masterpraktikum (M-P)

Modulbezeichnung	Masterpraktikum
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-P
LSF-Signatur	4PHY20054V
Sprache	Deutsch / Englisch
Turnus	jedes WS
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Prof. Dr. I. Fleck
Lehrform	Praktikum 4 SWS
Arbeitsaufwand	270 h (60 h Kontaktzeit, 210 h Selbststudium)
Leistungspunkte	9
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden vertiefen anhand von selbst durchgeführten Experimenten ihre praktischen Fertigkeiten und werden an das eigenständige wissenschaftliche Arbeiten herangeführt. Durch die quantitative Auswertung der Experimente lernen die Studierenden den Umgang mit Analyseprogrammen und vertiefen ihre Kenntnisse der Fehlerrechnung. Eine kritische Bewertung von Aufbau und Durchführung des Versuchs sowie der Resultate ist Teil des Protokolls.
Inhalt	Eine Auswahl von Versuchen zu folgenden Themen: Lebensdauer $\pi$ - $\mu$ - $K$ $\beta$ -Spektroskopie Kernlebensdauer Dynamische Lichtstreuung Fabry-Perot-Interferometer Röntgen-Fluoreszenzanalyse Röntgenreflektometrie Laue Diffraktion Dopplerfreie Laserspektroskopie Debye-Scherrer Charakteristika unterschiedlicher physikalischer Systeme und Methoden Übergreifende Fragestellungen der Experimentalphysik
Studienleistung	Die durchgeführten Versuche und die Protokolle mit Auswertung werden testiert. Die Anforderungen an die Protokolle werden in der Veranstaltung bekannt gegeben.
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Anerkannte Versuchsprotokolle
Verwendbarkeit des Moduls	
Medienformen	Anleitung zum selbständigen Experimentieren, elektronische Medien.
Literatur	Bergmann, Schaefer: Experimentalphysik Demtröder: Experimentalphysik Kittel: Festkörperphysik Als-Nielsen, McMorrow: Elements of Modern X-ray Physics

**5.2 Hauptseminar (M-S)**

Modulbezeichnung	Hauptseminar
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-S
LSF-Signatur	4PHY20203V
Sprache	Deutsch / Englisch
Turnus	jährlich mind. eine Veranstaltung
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Dozent(in) der Physik
Lehrform	Seminar 2 SWS
Arbeitsaufwand	180 h (30 h Kontaktzeit, 150 h Selbststudium)
Leistungspunkte	6
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Die Studierenden lernen, wie man unter Verwendung von Fachliteratur einen Seminarvortrag über ein ausgewähltes Thema vorbereitet und unter Anwendung fortgeschrittener Präsentationstechniken hält.
Inhalt	Fragestellungen aus den Forschungsgebieten des Departments: Festkörperphysik und Röntgenoptik Experimentelle Quantenoptik und Nano-Optik Experimentelle Teilchen- und Astroteilchenphysik Theoretische Quantenoptik Theoretische Teilchenphysik
Studienleistung	Vortrag
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten	Mindestens mit der Note “ausreichend” bewerteter Vortrag
Verwendbarkeit des Moduls	
Medienformen	Vortrag, elektronische Medien
Literatur	Wird in der Veranstaltung bekannt gegeben.

### 5.3 Forschungsphase (M-A)

Modulbezeichnung	Vorbereitungsprojekt
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-AV
LSF-Signatur	
Sprache	Deutsch / Englisch
Moduldauer	1/2 Semester
Modulverantwortliche(r)	Dozent(in) der Physik
Lehrform	Ganztägig betreute Forschungsarbeit
Arbeitsaufwand	450 h
Leistungspunkte	15
Inhaltliche Voraussetzungen	keine
Lernziele	Im Vorbereitungsprojekt werden vorbereitende Aufgabenstellungen bearbeitet. Damit sollen die Studierenden zeigen, daß sie sich die speziellen fachlichen Kenntnisse und Methoden soweit angeeignet haben, daß sie sie zur Bearbeitung von Fragestellungen aus dem Gebiet, dem das Thema der Masterarbeit entstammen soll, erfolgreich anwenden können.
Inhalt	Themenstellung je nach Ausrichtung der Arbeit
Studien- /Prüfungsleistungen	Mündlicher Nachweis der Vorbereitung
Medienformen	Angeleitetes Selbststudium
Literatur	Abhängig vom gewählten Themengebiet

Modulbezeichnung	Einarbeitungsprojekt
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-AE
LSF-Signatur	
Sprache	Deutsch / Englisch
Moduldauer	1/2 Semester
Modulverantwortliche(r)	Dozent(in) der Physik
Lehrform	Ganztägig betreute Einarbeitung
Arbeitsaufwand	450 h
Leistungspunkte	15
Inhaltliche Voraussetzungen	M-AV
Lernziele	Das Einarbeitungsprojekt dient dem vertieften Studium und dem Erwerb der Kenntniss der wissenschaftlichen Literatur und des aktuellen Standes des Spezialgebietes, dem das Thema der Masterarbeit entstammen soll. Spezielle experimentelle Meßverfahren und Auswertemethoden oder theoretische Modelle und Berechnungsverfahren sollen erarbeitet und an einfachen Beispielen nachvollzogen werden.
Inhalt	Themenstellung je nach Ausrichtung der Arbeit
Studien- /Prüfungsleistungen	Mündlicher Nachweis der Einarbeitung
Medienformen	Angeleitetes Selbststudium
Literatur	Abhängig vom gewählten Themengebiet

Modulbezeichnung	Masterarbeit
ggf. Untertitel	
Kürzel	M-A
Sprache	Deutsch / Englisch
Moduldauer	1 Semester
Modulverantwortliche(r)	Dozent(in) der Physik
Lehrform	Ganztägig betreute Forschungsarbeit
Arbeitsaufwand	900 h
Leistungspunkte	30
Inhaltliche Voraussetzungen	M-AV, M-AE
Lernziele	Die Studierenden führen unter Anleitung eine wissenschaftliche Arbeit an der vordersten Front der Forschung durch. Dabei erlernen sie Techniken zur Durchführung dieser Forschung. Die Anfertigung der Abschlußarbeit schult die Fertigkeit, die eigenen Forschungsarbeiten für andere verständlich aufzuarbeiten.
Inhalt	Themenstellung je nach Ausrichtung der Arbeit
Studien- /Prüfungsleistungen	Benotete schriftliche Arbeit
Medienformen	Angeleitete Forschungsarbeit
Literatur	Abhängig vom gewählten Themengebiet

## 6 Beispielcurricula

Die Wahlmöglichkeiten im Wahlpflicht- und im Wahlbereich des Masterstudiengangs ermöglichen eine individuelle Schwerpunktsetzung in den Forschungsgebieten des Departments Physik. Bei der Ausgestaltung eines individuellen Studienplans gilt es zu beachten, dass im Wahlpflichtbereich und Wahlbereich zusammengenommen Module im Umfang von wenigstens 9 LP aus den Fachgebieten der Experimentalphysik und von wenigstens 9 LP aus den Fachgebieten der theoretischen Physik belegt werden müssen. Im Anschluss sind exemplarisch einige Beispielcurricula aufgeführt.

### Schwerpunkt Experimentelle Quantenoptik und Quanteninformationsverarbeitung

1. Semester	2. Semester	3. Semester	4. Semester
<b>Wahlbereich</b> Laserspektroskopie 2V/2Ü (6)	<b>Fachkurs</b> Exp. Quantenoptik 4V/2Ü (9)	<b>Prüfung</b> Exp. Quantenoptik (-)	
	<b>Fachkurs</b> Quanteninformationstheorie 4V/2Ü (9)		
<b>Wahlbereich</b> Exp. Methoden der QO/NO 2V/2Ü (6)	<b>Wahlbereich</b> Nano-Optik 2V/2Ü (6)		
<b>Wahlbereich</b> Datenanalyse 3V/3Ü (9)			
<b>Masterpraktikum</b> 4P (9)	<b>Hauptseminar</b> Quantenoptik 2S (6)	<b>Vorb.+Einarbeitung</b> für Masterarbeit (15+15)	<b>Masterarbeit</b> Exp. Quantenoptik (30)
<b>(30)</b>	<b>(30)</b>	<b>(30)</b>	<b>(30)</b>

### Schwerpunkt Experimentelle Teilchen- und Astroteilchenphysik

1. Semester	2. Semester	3. Semester	4. Semester
<b>Fachkurs</b> Exp. Teilchenphysik 4V/2Ü (9)	<b>Wahlbereich</b> Detektorphysik 2V/2Ü (6)	<b>Prüfung</b> Exp. Teilchenphysik (-)	
<b>Fachkurs</b> Theo. Teilchenphysik I 4V/2Ü (9)			
<b>Wahlbereich</b> Physik am LHC 2V/2Ü (6)	<b>Wahlbereich</b> Datenanalyse 3V/3Ü (9)		
	<b>Wahlbereich</b> Astroteilchenphysik 2V/2Ü (6)		
<b>Hauptseminar</b> Teilchenphysik 2S (6)	<b>Masterpraktikum</b> 4P (9)	<b>Vorb.+Einarbeitung</b> für Masterarbeit (15+15)	<b>Masterarbeit</b> Exp. Teilchenphysik (30)
<b>(30)</b>	<b>(30)</b>	<b>(30)</b>	<b>(30)</b>

**Schwerpunkt Experimentelle Festkörperphysik**

1. Semester	2. Semester	3. Semester	4. Semester
Fachkurs Exp. Festkörperphysik 4V/2Ü (9)	Wahlbereich FKP der Nanostrukturen 2V/2Ü (6)	<b>Prüfung</b> Exp. Festkörperphysik (-)	
	Fachkurs Quanteninformationstheorie 4V/2Ü (9)		
Wahlbereich Röntgenphysik 2V/2Ü (6)	Wahlbereich Theorie der kond. Materie 2V/2Ü (6)		
Wahlbereich Nano-Optik 2V/2Ü (6)	Wahlbereich Beschleunigerphysik II 1V/1Ü (3)		
Masterpraktikum 4P (9)	Hauptseminar Festkörperphysik 2S (6)	Vorb.+Einarbeitung für Masterarbeit (15+15)	<b>Masterarbeit</b> Exp. Festkörperphysik (30)
(30)	(30)	(30)	(30)

**Schwerpunkt Experimentalphysik**

1. Semester	2. Semester	3. Semester	4. Semester
Fachkurs Exp. Quantenoptik 4V/2Ü (9)	Wahlbereich Exp. Methoden der QO/NO 2V/2Ü (6)	<b>Prüfung</b> Exp. Quantenoptik (-)	
	Fachkurs Exp. Festkörperphysik 4V/2Ü (9)		
Fachkurs Exp. Teilchenphysik 4V/2Ü (9)	Fachkurs Theo. Teilchenphysik I 4V/2Ü (9)		
Wahlbereich Beschleunigerphysik II 1V/1Ü (3)			
Hauptseminar Experimentalphysik 2S (6)	Masterpraktikum 4P (9)	Vorb.+Einarbeitung für Masterarbeit (15+15)	<b>Masterarbeit</b> Exp. Quantenoptik (30)
(27)	(33)	(30)	(30)

**Schwerpunkt Theoretische Quantenoptik**

Hinweis: Einer der Fachkurse „Quanteninformationstheorie“ (M-T1) und „Grundlagenprobleme der Quantenmechanik“ (M-T2) kann bereits im 6. Semester des Bachelorstudiums belegt werden.

1. Semester	2. Semester	3. Semester	4. Semester
<b>Wahlbereich</b> Quantentheorie des Lichts 2V/2Ü (6)	<b>Fachkurs</b> Quanteninformationstheorie 4V/2Ü (9)	<b>Prüfung</b> Theo. Quantenoptik (-)	
	<b>Fachkurs</b> Exp. Quantenoptik 4V/2Ü (9)		
<b>Wahlbereich</b> Laserspektroskopie 2V/2Ü (6)	<b>Wahlbereich</b> Kosmologie 2V/2Ü (6)		
<b>Wahlbereich</b> Theorie der kond. Materie 2V/2Ü (6)	<b>Wahlbereich</b> Mathematik der QM 1V/1Ü (3)		
<b>Masterpraktikum</b> 4P (9)	<b>Hauptseminar</b> Quantenoptik 2S (6)	<b>Vorb.+Einarbeitung</b> für Masterarbeit (15+15)	<b>Masterarbeit</b> Theo. Quantenoptik (30)
(27)	(33)	(30)	(30)

**Schwerpunkt Theoretische Teilchenphysik**

Hinweis: Der Fachkurs „Theoretische Teilchenphysik I“ (M-T3) kann bereits im 6. Semester des Bachelorstudiums belegt werden.

1. Semester	2. Semester	3. Semester	4. Semester
<b>Fachkurs</b> Theo. Teilchenphysik II 4V/2Ü (9)	<b>Wahlbereich</b> Flavourphysik 2V/2Ü (6)	<b>Prüfung</b> Theo. Teilchenphysik (-)	
	<b>Fachkurs</b> Exp. Teilchenphysik 4V/2Ü (9)		
<b>Wahlbereich</b> Hadronenphysik 2V/2Ü (6)	<b>Wahlbereich</b> Physik am LHC 2V/2Ü (6)		
<b>Wahlbereich</b> Detektorphysik 2V/2Ü (6)	<b>Wahlbereich</b> Spezielle Kapitel der QFT 1V/1Ü (3)		
<b>Masterpraktikum</b> 4P (9)	<b>Hauptseminar</b> Teilchenphysik 2S (6)	<b>Vorb.+Einarbeitung</b> für Masterarbeit (15+15)	<b>Masterarbeit</b> Theo. Teilchenphysik (30)
(30)	(30)	(30)	(30)

**Schwerpunkt Theoretische Physik**

1. Semester	2. Semester	3. Semester	4. Semester
Fachkurs Theo. Teilchenphysik II 4V/2Ü (9)	Wahlbereich Colliderphysik 2V/2Ü (6)	<b>Prüfung</b> Theo. Teilchenphysik (-)	
	Fachkurs Quanteninformationstheorie 4V/2Ü (9)		
Wahlbereich Higgsphysik 2V/2Ü (6)	Fachkurs Exp. Teilchenphysik 4V/2Ü (9)		
Wahlbereich Erweiterungen des SM 2V/2Ü (6)			
Masterpraktikum 4P (9)	Hauptseminar Theoretische Physik 2S (6)	Vorb.+Einarbeitung für Masterarbeit (15+15)	<b>Masterarbeit</b> Theo. Teilchenphysik (30)
(30)	(30)	(30)	(30)

**Schwerpunkt Mathematische Physik**

1. Semester	2. Semester	3. Semester	4. Semester
Wahlbereich Quantentheorie des Lichts 2V/2Ü (6)	Fachkurs Grundlagenprob. der QM 4V/2Ü (9)	<b>Prüfung</b> Theo. Quantenoptik (-)	
	Fachkurs Exp. Quantenoptik 4V/2Ü (9)		
Wahlbereich Mathematik der QM 1V/1Ü (3)	Wahlbereich Funktionalanalysis II 4V/2Ü (9)		
Wahlbereich Funktionalanalysis I 4V/2Ü (9)			
Masterpraktikum 4P (9)	Hauptseminar Theoretische Physik 2S (6)	Vorb.+Einarbeitung für Masterarbeit (15+15)	<b>Masterarbeit</b> Theo. Quantenoptik (30)
(27)	(33)	(30)	(30)