# Modulhandbuch
# Masterstudiengang Physik
# Studienordnung 2020

20. Oktober 2020

# Inhaltsverzeichnis

**1 Pflichtmodule des Masterstudiengangs 4**
1.1 Praktika und Seminare . . . 4
1.2 Fachliche Spezialisierung und Masterarbeit . . . 7

**2 Zusätzliche Pflichtmodule des Masterstudiengangs mit Schwerpunkt *Computational Physics* 10**
2.1 Teilimportmodule . . . 11

**3 Wahlpflichtmodule des Masterstudiengangs I) Jährlich angebotene Module 12**
3.1 Fachgebietsübergreifende Module . . . 12
3.2 Astrophysik und Kosmologie . . . 20
3.3 Kern- und Elementarteilchenphysik . . . 34
3.4 Festkörperphysik . . . 58
3.5 Optik, Laser- und Atomphysik . . . 71
3.6 Beschleuniger-, Plasma- und angewandte Physik . . . 79
3.7 Biophysik . . . 95
3.8 Neurowissenschaften . . . 103

**4 Wahlpflichtmodule des Masterstudiengangs: II) Zweijährlich oder unregelmäßig angebotene Module 107**
4.1 Fachgebietsübergreifende Module . . . 107
4.2 Astrophysik und Kosmologie . . . 125
4.3 Kern- und Elementarteilchenphysik . . . 130
4.4 Festkörperphysik . . . 143
4.5 Atomphysik und Quantenoptik . . . 157
4.6 Plasmaphysik . . . 161
4.7 Neurowissenschaften . . . 163

**5 Zusätzliche Wahlpflichtmodule des Masterstudiengangs mit Schwerpunkt *Computational Physics* 165**

**6 Schlüsselqualifikationsmodule 166**

**7 Nebenfachmodule 170**
7.1 Nebenfach Astronomie . . . 170
7.2 Nebenfach Elektronik . . . 174
7.3 Nebenfach Didaktik der Physik . . . 178

**Index 1: Modulkürzel 182**

**Index 2: Modultitel 183**

# Erläuterungen zu den Modulbeschreibungen:

- Unterscheidung Pflicht/Wahlpflichtmodul und Pflicht/Wahlpflichtlehrveranstaltung:
  - Es gibt Pflicht- und Wahlpflichtmodule, wobei erstere als Module absolviert werden müssen, auch wenn sie sich ihrerseits aus Wahlpflichtlehrveranstaltungen aufbauen. Pflicht- und Wahlpflichtmodule sind im Modulhandbuch in unterschiedlichen Abschnitten aufgeführt. Innnerhalb eines Moduls kann es — unabhängig vom Charakter des Moduls selbst — Pflicht- und Wahlpflichtlehrveranstaltungen geben, wobei im Fall von Modulen aus einer einzigen Lehrveranstaltung diese notwendigerweise Pflicht sein muss. Pflicht- und Wahlpflichtlehrveranstaltungen eines Moduls sind im Modulhandbuch durch den Eintrag "Pf/WP" charakterisiert.
- SWS-Angaben:
  - SWS-Angaben beziehen sich stets auf das gesamte Semester, weswegen bei untersemestrigen Lehrveranstaltungen die wöchentliche Angabe mit dem Verhältnis aus der Zahl der Wochen, in der die Lehrveranstaltung tatsächlich abgehalten wird, und der Normwochenzahl eines Semesters (15 sowohl für Winter- als auch für Sommersemester) multipliziert wird. Die resultierende Zahl wird dann auf die nächstliegende ganze Zahl gerundet.
- Verwendbarkeit:
  - Die Verwendbarkeit eines Moduls für einen Studiengang bezieht sich auf die vorliegende Zulassung des Moduls für einen Studiengang, nicht auf seine thematische Verwendbarkeit in einem Studiengang.
- Semesterzuordnung:
  - Die Zuordnung einer Lehrveranstaltung zu einem Fachsemester bezieht sich auf Studierende, die das Studium im Wintersemester aufnehmen und gemäß Studienverlaufsplan in der Regelstudienzeit durchlaufen. Die Fachsemester 1,3,5 implizieren daher stets das Angebot der entsprechenden Lehrveranstaltung im WS, die Fachsemester 2,4,6 das Angebot im SoSe.
  - Falls eine Lehrveranstaltung in unterschiedlichen Fachsemestern besucht werden kann, ist dies in der Semesterzuordnungstabelle mit Kreuzen bei mehreren Semestern charakterisiert. Falls der Besuch in einem dieser Fachsemester nicht dem offiziellen Studienverlaufsplan entspricht, ist das entsprechende Kreuz eingeklammert.
- Unterrichtssprache:
  - Deutsch oder Englisch = Modul wird grundsätzlich auf Deutsch abgehalten, auf Wunsch der Studierenden wird zur Unterrichtssprache Englisch übergegangen
  - Englisch oder Deutsch = Modul wird grundsätzlich auf Englisch abgehalten, auf Wunsch der Studierenden wird zur Unterrichtssprache Deutsch übergegangen
  - Englisch und Deutsch = innerhalb des Moduls werden einzelne Lehrveranstaltungen auf Englisch abgehalten, andere auf Deutsch

# 1 Pflichtmodule des Masterstudiengangs

## 1.1 Praktika und Seminare

| **PEXFL** | **Forschungs- und Laborpraktikum** (Research Lab Class) | Pflichtmodul | 12 CP (insg.) = 360 h | | 8 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 8 SWS / 120 h | Selbststudium 240 h | |

**Inhalte**

Praktikumsversuche aus allen experimentellen Instituten des Fachbereiches, sowie Versuche an Forschungsgeräten der einzelnen Arbeitsgruppen. Zusätzlich können auch Computerexperimente in der theoretischen Physik durchgeführt werden.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Das Modul soll an Beispielen eine Einführung in die Arbeitsweisen der modernen experimentellen und theoretischen Physik geben. In Zweiergruppen üben die Studierenden Experimente im Labor bzw. Computersimulationen nach Anleitung durchzuführen und zu protokollieren. Es wird das Erstellen von kurzen schriftlichen Berichten ("Protokollen") geübt.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

keine

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jedes Semester |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Blume |
| **Studiennachweise** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme am Praktikum |
| **Leistungsnachweise** | Abgabe und Bestehen von Praktikumsprotokollen, Seminarvortrag (weitere Details werden in der Praktikumsordnung festgelegt) |
| **Lehr- / Lernformen** | Praktikum |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch (das Modul wird gleichzeitig in beiden Sprachen durchgeführt) |

**Modulprüfung**

keine

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Forschungs- und Laborpraktikum (Research Lab Class) | P | 8 | 12 | Pf | X | X | | |
| Summe | | 8 | 12 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **SMSC** | **Masterseminare**<br><br>(Master's Seminars) | Pflichtmodul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
| | | | Kontaktstudium<br>4 SWS / 60 h | Selbststudium<br>120 h | |

**Inhalte**

*Proseminar*: In jedem Semester können verschiedene Veranstaltungen als Proseminar angeboten werden, die beliebigen Themen der Physik gewidmet sind. Der Prüfungsausschuss prüft die Eignung der angebotenen Themen und die Gestaltung der Seminare und entscheidet über ihre Zulassung als Proseminar. Die Studierenden können eines dieser Angebote auswählen.
Das Proseminar kann zum Beispiel als "Journal Club" gestaltet werden, in dem Studierende ausgewählte Artikel aus aktuellen physikalischen Zeitschriften vorstellen und die Hintergründe erläutern. Eine andere Möglichkeit ist ein Seminar, in dem ein physikalisches Gebiet gemeinsam erarbeitet wird, indem verschiedene Themen zu Teilaspekten von den Studierenden vorgetragen werden. Arbeitsgruppenseminare sind nicht als Proseminare zulässig.

*Arbeitsgruppenseminar*: Themen aus einem aktuellen Gebiet der Forschung

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Studierenden sind in der Lage, sich physikalische Sachverhalte, die nicht in ihrem engeren Spezialisierungsgebiet liegen, aus der Literatur zu erschließen und anderen zu erklären. Die Studierenden haben einen vertieften Einblick in dasjenige Forschungsgebiet, auf dem sie ihre Masterarbeit anfertigen. Die Studierenden sind in der Lage, ihre wissenschaftlichen Ergebnisse und Projekte einem Fachpublikum in einem Vortrag vorzustellen.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

*Proseminar*: abhängig vom gewählten Proseminar

*Arbeitsgruppenseminar*: Inhalt der im jeweiligen Spezialgebiet angebotenen, fortgeschrittenen Lehrveranstaltungen

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jedes Semester |
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Studiendekan Physik |
| **Studiennachweise** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an beiden Seminaren |
| **Leistungsnachweise** | Seminarvortrag über ein Thema aus der aktuellen Literatur in der Lehrveranstaltung *Proseminar* (unbenotet), Seminarvortrag über die eigenen Forschungsergebnisse im Rahmen der Masterarbeit in der Lehrveranstaltung *Arbeitsgruppenseminar* (unbenotet) |
| **Lehr- / Lernformen** | Proseminar, Seminar |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch je nach gewähltem Seminar bzw. gewählter Arbeitsgruppe |

| **Modulprüfung** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| keine | | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Proseminar | S | 2 | 3 | Pf | X | X | X | |
| Arbeitsgruppenseminar (Research Group Seminar) | S | 2 | 3 | Pf | | X | X | X |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

## 1.2 Fachliche Spezialisierung und Masterarbeit

| FS | **Fachliche Spezialisierung**<br>(Preparation for Master's Project I) | Pflichtmodul | 15 CP (insg.) = 450 h<br>Kontaktstudium 0 SWS / 0 h | Selbststudium 450 h | 0 SWS |
|---|---|---|---|---|---|

**Inhalte**

Einführung in das wissenschaftliche Arbeiten und die fachlichen und methodischen Grundlagen an einem Beispiel aus einem Forschungsgebiet. Eigenständige Literaturrecherche zum Stand der Forschung.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Das Modul vermittelt die fachlichen und methodischen Grundlagen für die eigenständige Bearbeitung eines Forschungsprojektes und führt damit auf die Masterarbeit hin. Diese Hinführung erfolgt durch die selbstständige Erarbeitung von Hintergrundwissen sowie die selbstständige Einarbeitung in das Spezialgebiet, auf dem die Masterarbeit geplant ist, angeleitet durch den vorgesehenen Betreuer der Masterarbeit. Durch die Einbindung in eine Arbeitsgruppe wird gleichzeitig die Arbeit in einem Forschungsteam und das optimale Nutzen informellen Wissens im Nahfeld gelernt.
Die Betreuung erfolgt dabei in Form von Betreuungsgesprächen im wöchentlichen Rhythmus.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der im jeweiligen Spezialgebiet angebotenen, fortgeschrittenen Lehrveranstaltungen

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | permanent |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Studiendekan Physik |
| **Studiennachweise** | |
| **Teilnahmenachweise** | keine |
| **Leistungsnachweise** | Vortrag über das für die Masterarbeit ausgewählte Spezialgebiet, unbenotet |
| **Lehr- / Lernformen** | Praktikum |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch je nach gewählter Arbeitsgruppe |

**Modulprüfung**

keine

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Fachliche Spezialisierung (Preparation for Master's Project I) | P | | 15 | Pf | | | X | |
| Summe | | | 15 | | | | | |

| EP | **Erarbeiten eines Projekts** (Preparation for Master's Project II) | Pflichtmodul | 15 CP (insg.) = 450 h | | 0 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 0 SWS / 0 h | Selbststudium 450 h | |

**Inhalte**

Schriftliche Ausarbeitung einer Projektskizze auf einem aktuellen Gebiet der Forschung.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Nach der allgemeinen Beschäftigung mit dem Forschungsgebiet, in dem die Masterarbeit angefertigt werden soll, im Rahmen des Moduls FS, führt dieses Modul unmittelbar auf die Masterarbeit hin. Studierende erarbeiten selbstständig ein wissenschaftlichen Projekt, das als Ausgangspunkt für die geplante Masterarbeit dienen kann (angeleitet durch den Betreuer bzww. die Betreuerin der Masterarbeit). Das Modul mündet in der schriftlichen Darlegung der wissenschaftlichen Grundlagen des Themas der Masterarbeit und der Formulierung der gewählten Fragestellung und der Methoden, mittels derer die Bearbeitung angegangen werden soll.
Die Betreuung erfolgt dabei in Form von Betreuungsgesprächen im wöchentlichen Rhythmus.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der im jeweiligen Spezialgebiet angebotenen, fortgeschrittenen Lehrveranstaltungen

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | permanent |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Studiendekan Physik |
| **Studiennachweise** | |
| **Teilnahmenachweise** | keine |
| **Leistungsnachweise** | schriftliche Ausarbeitung einer Projektskizze, unbenotet |
| **Lehr- / Lernformen** | Praktikum |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch je nach gewählter Arbeitsgruppe |

**Modulprüfung**

keine

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Erarbeiten eines Projektes (Preparation for Master's Project II) | P | | 15 | Pf | | | X | |
| Summe | | | 15 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **MA** | **Masterarbeit**<br><br>(Master's Project) | Pflichtmodul | 30 CP (insg.) = 900 h | | 0 SWS |
| | | | Kontaktstudium<br>0 SWS / 0 h | Selbststudium<br>900 h | |

**Inhalte**

Eigenständige wissenschaftliche Arbeit zu einem mit dem Betreuer bzw. der Betreuerin vereinbarten aktuellen Problem der Forschung, unter Anleitung durch den Betreuer bzw die Betreuerin

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Masterarbeit dient der wissenschaftlichen Ausbildung. In ihr zeigt die oder der Studierende, dass sie oder er in der Lage ist, eine definierte Aufgabenstellung selbstständig mittels wissenschaftlicher Methoden zu bearbeiten. In der für das Masterprojekt gewählten Fachrichtung bearbeitet der oder die Studierende unter Anleitung einer Betreuerin oder eines Betreuers eine aktuelle wissenschaftliche Fragestellung.
Im Fall von Studierenden mit dem Schwerpunkt *Physik der Informationstechnologie* ist das Thema der Arbeit entsprechend §13 Abs. 2 der Studienordnung zu wählen. Im Fall von Studierenden mit dem Schwerpunkt *Computational Physics* ist das Thema der Arbeit entsprechend §14 Abs. 3 der Studienordnung zu wählen.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

Zulassungsvoraussetzungen gemäß §41 Abs.4.

**Empfohlene Vorkenntnisse**

keine

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Physik, MSc Biophysik |
| **Häufigkeit des Angebots** | permanent |
| **Dauer** | 6 Monate (Vollzeit) |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Studiendekan Physik |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | keine |
| **Leistungsnachweise** | keine |
| **Prüfungsvorleistungen** | keine |
| **Lehr- / Lernformen** | angeleitete wissenschaftliche Projektarbeit |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch je nach gewählter Arbeitsgruppe |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | ausführliche, schriftliche Darstellung des Masterprojekts und seiner Ergebnisse in Form einer Masterarbeit |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Masterarbeit (Master's Project) | | | 30 | Pf | | | | X |
| Summe | | | 30 | | | | | |

# 2 Zusätzliche Pflichtmodule des Masterstudiengangs mit Schwerpunkt *Computational Physics*

Das Absolvieren der Import- bzw. Teilimportmodule

- *Numerische Mathematik*
  (Modul BAM-NM des BSc Mathematik),
- *Hochleistungsrechnerarchitektur*
  (Modul M-HL des MSc Informatik)
- *Praktikum Hochleistungsrechnen*
  (Modul PHL — Modulbeschreibung im Anschluss)

ist Pflicht. Für die Teilnahme an diesen Import- bzw. Teilimportmodulen gelten die Regelungen des jeweiligen Herkunftsstudiengangs. Darüber hinaus muss mindestens eines der (Teil)Module

- *Computational Physics and Simulations in Matlab*
  (Modul VCPSM aus dem Wahlpflichtangebot des MSc Physik — Dieses Modul ist nur dann zulässig, falls es nicht im Bachelorstudium als Ersatz für das Modul VPROG verwendet wurde)
- *Numerische Methoden der Physik*
  (Modul VNUMP aus dem Wahlpflichtangebot des MSc Physik)
- *Advanced General Relativity*
  (Modul VAGR aus dem Wahlpflichtangebot des MSc Physik)
- *Reinforcement Learning*
  (Modul VRLEARN aus dem Wahlpflichtangebot des MSc Physik)
- *Advanced Introduction to C++, Scientific Computing and Machine Learning*
  (Modul VCPPML aus dem Wahlpflichtangebot des MSc Physik — Dieses Modul ist nur dann zulässig, falls es nicht im Bachelorstudium als Ersatz für das Modul VPROG verwendet wurde)
- *Numerische Methoden (für Differentialgleichungen der Geophysikalischen Strömungsmechanik)*
  (Lehrveranstaltung aus dem Modul SPV2 des MSc Meteorologie — für die Teilnahme an diesem Teilimportmodul gelten die Regelungen des Herkunftsstudiengangs)
- *Quantum Molecular Dynamics*
  (Modul VQMD aus dem Wahlpflichtangebot des MSc Physik)

absolviert werden. Modulbeschreibungen der vom FB Physik angebotenen Module sind in den Abschnitten “Wahlpflichtmodule des Masterstudiengangs I/II” zu finden. Für das Modul SPV2 siehe das Modulhandbuch des MSc Meteorologie.

## 2.1 Teilimportmodule

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **PHL** | **Praktikum Hochleistungsrechnen**<br>(Lab Class High Performance Computing) | Pflichtmodul | 8 CP (insg.) = 240 h<br>Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 180 h | 4 SWS |

**Inhalte**

Programmierung von SMP Maschinen, MPP Clustern und GPGPUs. Praktischer Umgang mit verschiedenen Programmierbibliotheken wie Vektor Klassen, OpenMP, MPI, CUDA oder OpenCL. Entwicklung eigener paralleler Algorithmen, und Untersuchung derer Skalierbarkeit. Für die praktischen Übungen stehen verschiedene Parallelrechner des Frankfurter CSC, einschließlich der LOEWE-CSC Hochleistungsrechner für ausgewählte Übungen zur Verfügung.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Praktische Erfahrung und Routine in der parallelen Programmierung. Verständnis des Zusammenspiels von Algorithmus, Cache und Netzwerk. Praktische Erfahrung mit Nebenläufigkeitsproblemen, Synchronisation und der Fehlersuche in parallelen Algorithmen.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Kenntnisse aus den Bereichen Programmieren, Datenstrukturen.

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Informatik / FB Informatik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jedes Semester |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Kisel |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme am Praktikum |
| **Leistungsnachweise** | termingerechte Abgabe der Praktikumsaufgaben, Vorstellung und Demonstration der Ergebnisse |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Praktikum |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | Abschlusskolloquium (ca. 20 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Praktikum Hochleistungsrechnen (Lab Class High Performance Computing) | P | 4 | 8 | Pf | | X | | |
| Summe | | 4 | 8 | | | | | |

# 3 Wahlpflichtmodule des Masterstudiengangs I) Jährlich angebotene Module

## 3.1 Fachgebietsübergreifende Module

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VHQM** | **Höhere Quantenmechanik**<br>(Advanced Quantum Mechanics) | Wahlpflicht-modul | 8 CP (insg.) = 240 h<br>Kontaktstudium 6 SWS / 90 h | Selbststudium 150 h | 6 SWS |

**Inhalte**

Grundlagen der relativistischen Quantenmechanik, Klein-Gordon-Gleichung, Dirac-Gleichung, Symmetrien in der Quantenmechanik, Vielteilchentheorien im Fock-Raum, Näherungsmethoden für wechselwirkende Quantenvielteilchensysteme, elementare Streutheorie.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Dieses Modul behandelt ausgewählte höhere Methoden der Quantenmechanik, wie sie für die moderne Physik grundlegend sind, insbesondere relativistische Quantenmechanik, Vielteilchentheorie, Symmetrien in der Quantenmechanik und Streutheorie. Damit werden die Studierenden befähigt, in ihren Abschlussarbeiten theoretische Probleme auf modernem Niveau anzugehen. Auf diese Weise werden insbesondere auch die Grundlagen für die Erweiterung der Quantenmechanik zur Quantenfeldtheorie gelegt.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–2*, *Theoretische Physik 1–5*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik, BSc Biophysik, MSc Biophysik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Rischke |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Höhere Quantenmechanik (Advanced Quantum Mechanics) | V+Ü | 4+2 | 8 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 6 | 8 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VHEX** | **Höhere Experimentalphysik**<br>(Advanced Experimental Physics) | Wahlpflicht-modul | 8 CP (insg.) = 240 h<br>Kontaktstudium 6 SWS / 90 h | Selbststudium 150 h | 6 SWS |

**Inhalte**

*Höhere Experimentalphysik 1*: Freie Elektronen und Ionen: Erzeugung freier Ladungsträger, Bewegung freier Ladungsträger in zeitabhängigen Feldern, Gasentladung, Plasmen, Plasmawellen
Festkörperphysik: Metalle, klassisches Elektronengas, Fermi-Gas, Energiebänder, Wärmeleitung, Supraleitung, HF-Supraleitung, nichtlineare Dynamik und Stabilität

*Höhere Experimentalphysik 2*: Theorie und Experimente zur Elektrodynamik: Energiedichte und Energieströmung, zeitabhängige und statische magnetische und elektrische Felder, Elektromagnetische Wellen, Wellenleiter und Resonatoren, Hochfrequenzdiagnose
Thermodynamik: Thermodynamische Systeme und Zustandsgrößen, Hauptsätze, kinetische Gastheorie, ideales Gas, Entropie und Gleichgewichtszustände, Aggregatzustände und Phasen

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

In diesem Modul sollen die Grundlagen der Elektrodynamik, Thermodynamik, Plasmaphysik und Festkörperphysik hauptsächlich durch Experimente veranschaulicht werden.
Ziel dieses Moduls ist es, den Studierenden einen Zugang zu den unterschiedlichen physikalischen Systemen schwerpunktmäßig durch experimentelle Veranschaulichung zu geben.
Durch das Vorführen und die Beteiligung an den Experimenten, die deutlich über dem Niveau der Grundvorlesungen liegen, sollen abstrakte Inhalte verständlicher und wichtige, elementare Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Bereichen der Physik hergestellt werden. Dadurch versteht sich die Vorlesung als Bindeglied zwischen den Basisvorlesungen im Grundstudium und den Spezialvorlesungen im Masterstudiengang.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen des Bachelorstudiums

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Podlech |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen, Übungen |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Höhere Experimentalphysik 1 (Advanced Experimental Physics 1) | V+Ü | 2+1 | 4 | Pf | X | | (X) | |
| Höhere Experimentalphysik 2 (Advanced Experimental Physics 2) | V+Ü | 2+1 | 4 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 6 | 8 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VPSOC** | **Physik sozio-ökonomischer Systeme mit dem Computer**<br>(Physics of Socio-Economic Systems on the Computer) | Wahlpflicht-modul | 5 CP (insg.) = 150 h<br>Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 90 h | 4 SWS |

**Inhalte**

Dieses Modul gibt eine Einführung in das interdisziplinäre Forschungsfeld der Physik sozio-ökonomischer Systeme. In sozio-ökonomischen Systemen, wie z.B. bei Finanzmärkten, sozialen Netzwerken, Verkehrssystemen oder wissenschaftliche Kooperationsnetzwerken, sind die dem System zugrunde liegenden Akteure ständigen Entscheidungssituationen ausgesetzt, wobei der Erfolg und die Auswirkung der individuell gewählten Strategie von den Entscheidungen der anderen beteiligten Akteuren abhängt. Die (evolutionäre) Spieltheorie und die Physik komplexer Netzwerke stellen die beiden Grundsäulen der theoretischen Beschreibung und mathematischen Formulierung solcher Systeme dar. Im ersten Teil des Kurses werden die grundlegenden Konzepte der Spieltheorie thematisiert und die Studierenden erlernen, unter Verwendung von Computeralgebra-Systemen (Maple und Mathematica), deren Anwendung auf diverse Spielklassen. Neben den endlichen Zweipersonen-Spielen und N-Personen-Spielen wird auch auf die evolutionäre Entwicklung ganzer Spieler-Populationen eingegangen (evolutionäre Spieltheorie). Die zeitliche Entwicklung der Entscheidungen der Spieler wird zusätzlich durch die zugrunde liegende Struktur des sozio-ökonomischen Netzwerks der Spielergruppen bestimmt. Der zweite Teil des Kurses befasst sich deshalb mit der Theorie sozio-ökonomischer Netzwerke und deren mathematischen Beschreibung mittels graphentheoretischer Konzepte. Hierbei wird zusätzlich auf die computerbasierte Simulation unterschiedlicher Netzwerkstrukturen eingegangen und ein Programm, welches das Barabasi-Albert Modell eines skalenfreien Netzwerks numerisch simuliert, gemeinsam mit dem Betreuer erstellt. Der dritte Teil gibt einen Einblick in die aktuelle Forschung und behandelt neuere Entwicklungen dieses Forschungsfeldes. Es wird hierbei einerseits speziell auf die evolutionäre Spieltheorie auf komplexen Netzwerken und die Quanten-Spieltheorie eingegangen, andererseits wird ein breiter Überblick der diversen Anwendungsfelder sozio-ökonomischer Systeme vermittelt.
Im speziellen werden die folgenden Themen behandelt: Grundlagen der Spieltheorie, Definition eines Spiels, Strategienmenge der Spieler, reine und gemischte Strategie, dominante Strategie und Nash-Gleichgewicht, Zweipersonen Spiele, N-Personen–M-Strategien Spiel, Koordinationsspiele, Anti-Koordinationsspiele und dominante Spiele, evolutionäre Spieltheorie und Replikatorgleichung, Theorie der komlexen Netzwerke, skalenfreie, exponentielle, zufällige und kleine Welt Netzwerke, Anwendungsfelder und Beispiele real existierender sozio-ökonomischer und biologischer Netzwerke, Einführung in die Quanten-Spieltheorie, Programmieren und Visualisieren in Maple, Mathematica. Bei Bedarf: Python/Matplotlib, C/C++ bzw. Java.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Nach Abschluss des Moduls verstehen die Studierenden die Grundlagen der Spieltheorie und die Theorie der komplexen Netzwerke und haben diese in mehreren Anwendungsbeispielen mittels numerischer Rechnungen angewendet. Die Studierenden sind nach Abschluss des Moduls in der Lage, die evolutionäre Entwicklung von Populationen in einem sich zeitlich wiederholenden Spiel zu beschreiben und dilemma-artige Konstellationen zu analysieren. Des weiteren beherrschen die Studierenden nach Abschluss des Moduls die Grundlagen der Programmierumgebungen bzw. Programmiersprachen Maple und Python/Matplotlib.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Mathematische Grundlagen (Analysis, lineare Algebra, Differentialgleichungen), Grundlagen der Quantentheorie. Programmierkenntnisse sind nicht erforderlich aber von Vorteil (Grundlagen werden in der Vorlesung gemeinsam erarbeitet).

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik | | | | | | | |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik | | | | | | | |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich | | | | | | | |
| **Dauer** | einsemestrig | | | | | | | |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Triesch | | | | | | | |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | | | | | | | | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen | | | | | | | |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Durchführung einer Projektarbeit | | | | | | | |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise | | | | | | | |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung | | | | | | | |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch | | | | | | | |
| **Modulprüfung** | | | | | | | | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | | | | | | | | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Physik sozio-ökonomischer Systeme mit dem Computer (Physics of Socio-Economic Systems on the Computer) | V+Ü | 2.5+1.5 | 5 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 4 | 5 | | | | | |

| **VNLQM** | **Quantum Theory from a Nonlinear Perspective** | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

*Is Quantum Theory Intrinsically Nonlinear?*: Nichtlinearitäten in konventioneller Quantenmechanik; Welle-Teilchen Aspekte bei Wellenpaketlösungen der zeitabhängigen Schrödingergleichung; dynamische Invariante; Zusammenhänge mit zeitabhängiger Green Funktion, Wigner Funktion, Supersymmetrie, verallgemeinerten Erzeugungs-/Vernichtungsoperatoren und Kohärenten Zuständen; entsprechende Beziehungen bei zeitunabhängiger Quantenmechanik, Bose-Einstein-Kondensaten, Nichtlinearer Dynamik, statistischer Thermodynamik, Kosmologie u.s.w..

*Nonlinearities and Dissipation in Classical and Quantum Physics*: Konventionelle Methoden zur Beschreibung offener dissipativer Systeme, z.B. Langevin- und Fokker-Planck Gleichungen, verallgemeinerte Mastergleichung; alternative Wellenpaketansätze; nichtlineare Schrödingergleichungen, modifizierte Lagrange-/Hamilton-Formalismen, nichtunitäre Transformationen zwischen formalen und physikalischen Beschreibungsebenen.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Studierenden sollen nach Absolvieren des Moduls verstehen, dass die Ergebnisse der konventionellen Formulierung der zeitabhängigen Quantenmechanik nicht nur mittels zeitabhängiger Schrödingergleichung, sondern auch mittels einer komplexen nichtlinearen Riccati-Gleichung erhältlich sind. Dabei hat die nichtlineare Formulierung den Vorteil, dass sie nicht nur die Sensibilität bezüglich gewählter Anfangsbedingungen deutlich herausstellt, sondern auch die Verknüpfungen zwischen verschiedenen anderen Formulierungen von Quantendynamik klar aufzeigt. Es soll erkannt werden, dass die Ausnahmestellung der Riccati-Gleichung auf ihrer Linearisierbarkeit basiert, was letztlich erlaubt, Quantendynamik als komplexe klassische Mechanik zu formulieren. Das Verständnis dieser Zusammenhänge soll dann die Übertragung dieser Konzepte auf zeitunabhängige Quantensysteme, z.B. in deren supersymmetrischer Formulierung, aber auch auf völlig andere Bereiche der Physik, über statistische Thermodynamik, Soliton-Theorie bis hin zur Kosmologie ermöglichen. Schließlich soll offensichtlich werden, dass sich der nichtlineare Formalismus zwanglos auch auf offene Quantensysteme mit dissipativer, irreversibler Dynamik verallgemeinern lässt.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Module *Theoretische Physik 1–4*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Rischke |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | keine |
| **Leistungsnachweise** | Fachgespräch (ca. 30 Min.) zum Inhalt der Lehrveranstaltung *Nonlinearities and Dissipation in Classical and Quantum Physics* |
| **Prüfungsvorleistungen** | keine |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen | | | | | | | |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Englisch oder Deutsch | | | | | | | |
| **Modulprüfung** | | | | | | | | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | | | | | | | | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (30 Min.) zum Inhalt der Lehrveranstaltung *Is Quantum Theory Intrinsically Nonlinear?* | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Is Quantum Theory Intrinsically Nonlinear? | V | 2 | 3 | Pf | X | | (X) | |
| Nonlinearities and Dissipation in Classical and Quantum Physics | V | 2 | 3 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

## 3.2 Astrophysik und Kosmologie

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VART** | **Allgemeine Relativitätstheorie** (General Relativity) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 5 SWS |
| | | | Kontaktstudium 5 SWS / 75 h | Selbststudium 105 h | |

**Inhalte**

Riemannsche Geometrie, Bewegungsgleichung, Ricci- und Einstein-Tensor, Einsteinsche Feldgleichung, experimentelle Tests, Schwarzschild-Lösung, schwarze Löcher, Gravitationswellen, Tolman-Oppenheimer-Volkov-Gleichung und Sternstruktur.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Das Modul soll die Grundlagen für das moderne Verständnis der Rolle der Gravitation in der Natur vermitteln. Dazu werden die notwendigen mathematischen Hilfsmittel bereitgestellt (Tensorrechung im gekrümmten Riemannschen Raum) und auf verschiedene Beispielprobleme angewandt. Die im Modul vermittelten Kenntnisse sollen den Teilnehmern den Zugang zu aktuellen Fragestellungen der Astrophysik ermöglichen und dienen auch als Grundlage für die Beschäftigung mit der Kosmologie.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–2*, *Theoretische Physik 1–2*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Greiner |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Allgemeine Relativitätstheorie (General Relativity) | V+Ü | 3+2 | 6 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 5 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VAGR** | **Advanced General Relativity** | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

The 3+1 decomposition of spacetime. Formulations of the Einstein equations. Lagrangian formulations. The ADM formulation. Conformal traceless formulations. Gauge conditions in 3+1 formulations. Constraint equations. initial data and constrained evolution. Hyperbolic systems of partial differential equations. Quasi-linear formulation. Conservative formulation. Characteristic equations for linear systems. Riemann invariants. Characteristics and caustics. Domain of determinacy. region of influence. Linear hydrodynamic waves. Sound waves. Nonlinear hydrodynamic waves. Rarefaction waves. Shock waves. Contact discontinuities. The Riemann problem. Solution of the one-dimensional Riemann problem. Formulations of the hydrodynamic equations. The Wilson formulation. The importance of conservative formulations. The "Valencia" formulation. Finite-Difference Methods. The discretisation process. Numerical errors. Consistency. convergence and stability. The upwind scheme. The FTCS scheme. The Lax-Friedrichs scheme. The leapfrog scheme. The Lax-Wendroff scheme Kreiss-Oliger dissipation. Artificial-viscosity approaches. HRSC Methods and Conservative schemes. Rankine-Hugoniot conditions. Finite-volume conservative numerical schemes. Finite-difference conservative numerical schemes. Upwind methods. Monotone methods. Total variation diminishing methods. Godunov methods. Reconstruction techniques. Slope-limiter methods Approximate Riemann solvers. HLLE. Roe Riemann solvers. The method of lines. Explicit Runge-Kutta methods. Implicit-explicit Runge-Kutta methods.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

At the end of the course the students will have been exposed to many of the most active areas of research in general relativity and relativistic astrophysics. Furthermore, with the discussion of the mathematical and computational techniques employed in numerical relativity, the students will be able to carry out quantitative studies of relativistic compact objects. Overall, the material in the course will provide all the necessary background for a successful research work in relativistic astrophysics.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltung *Allgemeine Relativitätstheorie*, mindestens eine Programmiersprache

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Rezzolla |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Englisch |

| **Modulprüfung**<br>**Modulabschlussprüfung, benotet**<br>**bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Advanced General Relativity | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VARTC** | **Allgemeine Relativitätstheorie mit dem Computer**<br>(General Theory of Relativity on the Computer) | Wahlpflicht-modul | 5 CP (insg.) = 150 h | | 4 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 90 h | |

**Inhalte**

In diesem Modul werden die mathematisch anspruchsvollen Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) in diversen Programmierumgebungen analysiert. Im ersten Teil des Kurses erlernen die Studierenden die Verwendung von Computeralgebra-Systemen (Maple und Mathematica). Die oft komplizierten und zeitaufwendigen Berechnungen der tensoriellen Gleichungen der ART können mit Hilfe dieser Programme erleichtert werden. Diverse Anwendungen der Einstein- und Geodätengleichung werden in Maple implementiert, quasi analytische Berechnungen durchgeführt und entsprechende Lösungen berechnet und visualisiert. Der zweite Teil des Kurses befasst sich mit der numerischen Berechnung von Neutronensternen und Weißen Zwergen mittels eines C/C++ Programms. Nach einer kurzen Auffrischung der grundlegenden Programmierkenntnisse, erstellen die Studierenden, gemeinsam mit dem Betreuer, ein Programm, das die Tolman-Oppenheimer-Volkov-Gleichung numerisch löst und visualisieren die Ergebnisse. Zusätzlich wird hierbei in die Grundkonzepte der parallelen Programmierung eingeführt und eine MPI- und OpenMP-Version des C/C++ Programms erstellt. Im ditten Teil des Kurses werden zeitabhängige numerische Simulationen der ART mittels des Einstein Toolkit durchgeführt und deren Ergebnisse mittels Python/Matplotlib visualisiert. Inhaltlich wird hierbei ebenfalls auf den, dem Programm zugrunde liegenden (3+1)-Split der ART eingegangen und, abhängig von den Vorkenntnissen der Studierenden, mehrere fortgeschrittene, astrophysikalisch relevante Probleme simuliert. Mögliche Themen dieses abschließenden Teils könnten die folgenden Systeme darstellen: Oszillationen eines Neutronensterns, Kollaps eines Neutronenstern zu einem Schwarzen Loch oder die Kollision zweier Neutronensterne unter Berücksichtigung der Aussendung von Gravitationswellen. Der Schwerpunkt der gesamten Veranstaltung liegt sowohl auf der Allgemeine Relativitätstheorie als auch auf der Vermittlung spezieller Programmierkenntnisse.
Im speziellen werden die folgenden Themen behandelt: Kovariante Ableitung, Ricci- und Einstein-Tensor, Einsteinsche Feldgleichung, Geodätengleichung, Schwarzschild- und Kerr-Lösung, Raumzeitdiagramme in Schwarzschild und Eddington-Finkelstein Koordinaten, Penrose-Diagramme, Bewegung eines Teilchens um ein rotierendes schwarzes Loch, Herleitung der Tolman-Oppenheimer-Volkov-Gleichung, Weiße Zwerge, Neutronen- und Quarksterne, (3+1)-Split der ART, (Optional: Oppenheimer-Snyder-Collapse einer Staubwolke zu einem schwarzen Loch), Programmieren und Visualisieren in Maple, Mathematica und Python/Matplotlib, Programmieren in C/C++, paralleles Programmieren mit MPI und OpenMP, Grundlagen des Einstein Toolkit, numerische Simulationen auf dem Linux-basierte Rechen-Cluster FUCHS.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Nach Abschluss des Moduls verstehen die Studierenden die Allgemeine Relativitätstheorie besser, da sie in mehreren Anwendungsbeispielen die Eigenschaften der Raumzeitkrümmung und die Bewegung von Probekörpern und Licht in gekrümmter Raumzeit selbst mittels numerischer Rechnungen simuliert haben. Unter anderem können sie die Einsteinsche Feldgleichung und die Geodätengleichung auf nichtrotierende und rotierende schwarze Löcher anwenden, Raumzeitverformungen in kompakten Objekten analysieren und sie verstehen die aktuell in der Literatur diskutierten Gravitationswellendetektionen von Neutronenstern und schwarze Loch Kollisionen. Des weiteren beherrschen die Studierenden die Grundlagen der Programmierumgebungen bzw. Programmiersprachen Maple, Python/Matplotlib, C/C++, MPI, OpenMP und Einstein Toolkit.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie, Programmierkenntnisse in einer numerischen Sprache, etwa Fortran, Java, C, C++

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik | | | | | | | |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik | | | | | | | |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich | | | | | | | |
| **Dauer** | einsemestrig | | | | | | | |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Rezzolla | | | | | | | |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | | | | | | | | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen | | | | | | | |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Durchführung einer Projektarbeit | | | | | | | |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise | | | | | | | |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung | | | | | | | |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch | | | | | | | |
| **Modulprüfung** | | | | | | | | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | | | | | | | | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Allgemeine Relativitätstheorie mit dem Computer (General Theory of Relativity on the Computer) | V+Ü | 2.5+1.5 | 5 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 4 | 5 | | | | | |

| **VKOSMO** | **Kosmologie**<br><br>(Cosmology) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

Beobachtungstatsachen, kosmologisches Prinzip, Rotverschiebung, Hubble-Expansion und Hintergrundstrahlung, Robertson-Walker-Metrik, Friedman-LeMaître-Gleichungen, kosmologische Konstante, Friedman-Lösungen, Big Bang, Nukleosynthese, inflationäres Universum, dunkle Energie und dunkle Materie

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Ziel des Moduls ist die Vermittlung des aktuellen naturwissenschaftlichen Weltbilds zur Beschreibung von Aufbau und Dynamik des Universums. Auf der Basis der Allgemeinen Relativitätstheorie einerseits und der astronomischen Beobachtungen andererseits werden die Erkentnisse des kosmologischen Standardmodells vermittelt. Die Teilnehmer des Moduls werden in die Lage versetzt, den aktuellen Forschungsstand der Kosmologie zu verfolgen (z.B. Urknall, dunkle Materie, dunkle Energie).

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–2*, *Theoretische Physik 1–5*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Greiner |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Kosmologie (Cosmology) | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VKT-HASTM** | **Spezielle Themen der theoretischen Astrophysik für MSc-Studierende**<br>(Special Topics in Theoretical Astrophysics for MSc Students) | Wahlpflicht-modul | 5–12 CP (insg.) = 150–360 h<br>Kontaktstudium 3–10 SWS / 45–150 h | Selbststudium 105–210 h | 3–10 SWS |

**Inhalte**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Theoretische Astrophysik*: Theoretische Grundlagen der Physik, Strahlung, Hydrodynamik, Plasmaphysik, Magnetohydrodynamik, Stellare Dynamik

*Fortgeschrittene Kosmologie*: Korrelationsfunktionen und Leistungsspektrum in der Kosmologie, kosmologische Störungstheorie, kosmische Hintergrundstrahlung, Beobachtete Evidenzen für Dunkle Energie, Modelle für Dunkle Energie, Quintessenz und kosmische Skalarfelder, kosmologische Strukturbildung

*Astroteilchenphysik*: Elemente des Standardmodells der Teilchenphysik, Grundlagen der Thermodynamik der Quantengase, die Zustandsgleichung der Materie bei extremen Dichten (Wigner-Seitz und Thomas-Fermi Modelle) Hydrostatisches Gleichgewicht in Newtonscher Theorie, Chandrasekhar-Masse für Weiße Zwerge, Kühlung der Weißen Zwerge, die Dichtefunktionaltheorie der Kernmaterie, Hypernukleare Materie, Struktur der Sterne in der ART, Oppenheimer-Volkoff-Gleichungen, Kühlung der Neutronensterne, Suprafluidität und Supraleitung in Neutronensternen, Kosmologische Modelle, Teilchenphysik des frühen Universums.

*Quantum Field Theory in Curved Spacetime*: basis of quantum fields in curved spacetimes, quantum fields in expanding universes, Unruh effect, quantum fluctuations and inflation, quantum perturbations in the early universe, particle creation by black holes, Hawking radiation, black hole thermodynamics

*Struktur und Dynamik Extragalaktischer Systeme*: Innere Struktur und Physik extragalaktischer Systeme (Galaxien, Galaxienhaufen, Intergalaktische Materie) sowie ihre räumliche Verteilung und Dynamik. Großräumige Struktur und Entwicklung des Kosmos. Relevante Beobachtungen und Modelle.

*AGN physics*: Signatures of AGN activity, AGN classification, relativistic effects around supermassive black holes, models for the extreme X-ray variability, Narrow-Line Seyfert 1 Galaxies as the extreme of Seyfert activity, origin of the soft X-ray excess and the power law component, relativistic Fe K$\alpha$ studies, Accretion and Planck luminosity derivation, AGN unification through physical processes, gravitational wave physics, light bending and flux boosting effects, the standard accretion disc and deviations, advection dominated accretion flows and accretion above the Eddington limit, the efficiency limit, black hole growth, the light bending model in the Kerr black hole space time, X-ray periodicity and the Bardeen-Petterson effect, Comptonization effects, standard theory of General Relativity and its pseudo-complex extension.

*Verteilungsfunktionen in der Astrophysik*: Definition thermodynamisches Gleichgewicht, Erläuterung der Verteilungsfunktion $dNp = (dgp)/(exp(-n + E/kT) \pm 1)$ und verständliche mathematische Ableitung der Maxwell-, Boltzmann, Saha-Verteilung und der Planckfunktion, anschauliche Beispiele für die Besetzungszahlen verschiedener Energiezustände für die Boltzmann- und Saha-Verteilung, Ableitung des Stefan-Boltzmann Gesetzes aus dem Planck'schen Strahlungsgesetz, Rayleigh-Jeans und Wien-Näherungen des Planck'schen Strahlungsgesetzes, Beispiele für Entartung in der Astrophysik, Unterschiede zwischen dem thermodynamischen Gleichgewicht und dem lokalen thermodynamischen Gleichgewicht, Erläuterung der Lösung der Strahlungstransportgleichung in der Astrophysik und verständliche mathematische Ableitung von vier grundlegenden elektromagnetischen spektralen Energieverteilungen in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und der optischen Tiefe der Materie im Universum.

*Dynamik des Planetensystems*: Stern- und Planetenentstehung, die Frühphase des Planetensystems, Komponenten und Vermessung des Planetensystems, Dynamik des Planetensystems, Ableitung der drei Kepler'schen Gesetze und astrophysikalisch relevante Anwendungen.

*Astrophysikalische Beschreibung von Strahlung und Materie*: Beschreibung elektromagnetischer Strahlung, atomare Strahlungsprozesse, Streuprozesse in der Astrophysik, Absorption von Strahlung und Materie, Strahlungstransportgleichung und deren Lösung, Thermodynamisches Gleichgewicht und Strahlung, astronomische Helligkeits- und Farbsysteme.

Die Studierenden müssen mindestens zwei und können maximal drei Lehrveranstaltungen absolvieren. Dabei müssen mindestens 5 CP erreicht werden. Ansonsten kann frei aus den verfügbaren Lehrveranstaltungen ausgewählt werden.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Dieses Modul bereitet die Studierenden auf eine Abschlussarbeit im Bereich Astronomie/Astrophysik vor. Nach Absolvieren des Moduls sind die Studierenden in dem von ihnen gewählten Vertiefungsbereich in der Lage, sich selbstständig in die aktuelle astrophysikalische Forschung einzuarbeiten bzw. direkt zu ihr beizutragen:

- Die Studierenden können aktuelle astrophysikalische Fachbegriffe verstehen.
- Die Studierenden besitzen die vertiefenden Grundlagen, die diversen astrophysikalische Systeme basierend auf verschiedenen theoretischen Ansätzen einzuordnen.
- Die Studierenden gewinnen ein umgreifendes Konzept für astronomische Größenordnungen.
- Die Studierenden können Verknüpfungen zwischen Mikro- und Makrokosmos erstellen.
- Die Studenten können aktuelle Fragestellungen der modernen Astrophysik wissenschaftlich untersuchen.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Theoretische Astrophysik*: Grundkenntnisse in Astronomie und Inhalt der Veranstaltungen *Theoretische Physik 1–5*

*Fortgeschrittene Kosmologie*: Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–2*, *Theoretische Physik 1–5*, Kosmologie

*Astroteilchenphysik*: Erforderliche Vorkenntnisse sind abgeschlossene Studien der Quantenmechanik und Statistische Physik

*Quantum Field Theory in Curved Spacetime*: quantum field theory

*Struktur und Dynamik Extragalaktischer Systeme*: Inhalt der Module Astronomie I und II

*AGN physics*: Grundkenntnisse der Physik

*Verteilungsfunktionen in der Astrophysik*: Grundkenntnisse der Physik

*Dynamik des Planetensystems*: Grundkenntnisse der Physik

*Astrophysikalische Beschreibung von Strahlung und Materie*: Grundkenntnisse der Physik

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Schaffner-Bielich |

| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
|---|---|
| **Teilnahmenachweise** | abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Theoretische Astrophysik*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Fortgeschrittene Kosmologie*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Astroteilchenphysik*: keine<br>*Quantum Field Theory in Curved Spacetime*: keine<br>*Struktur und Dynamik Extragalaktischer Systeme*: keine<br>*AGN physics*: keine<br>*Verteilungsfunktionen in der Astrophysik*: keine<br>*Dynamik des Planetensystems*: keine<br>*Astrophysikalische Beschreibung von Strahlung und Materie*: keine |
| **Leistungsnachweise** | abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Theoretische Astrophysik*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben<br>*Fortgeschrittene Kosmologie*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben<br>*Astroteilchenphysik*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Quantum Field Theory in Curved Spacetime*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Vortrag<br>*Struktur und Dynamik Extragalaktischer Systeme*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Vortrag<br>*AGN physics*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Verteilungsfunktionen in der Astrophysik*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Dynamik des Planetensystems*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Astrophysikalische Beschreibung von Strahlung und Materie*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise in der Lehrveranstaltung, zu der die lehrveranstaltungsbezogene Modulprüfung stattfinden soll |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen, Übungen |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch und/oder Englisch je nach den gewählten Lehrveranstaltungen |

| **Modulprüfung** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | Die Modulprüfung zu diesem Modul erfolgt lehrveranstaltungsbezogen: In einer Lehrveranstaltung des Moduls nach Wahl der oder des Studierenden werden sowohl die konkreten Inhalte der jeweiligen Lehrveranstaltung als auch die übergeordneten Lernziele des Moduls abgeprüft. Alle anderen von der oder dem Studierenden in diesem Modul absolvierten Lehrveranstaltungen werden mit den oben aufgeführten Leistungsnachweisen abgeschlossen. | | | | | | | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Theoretische Astrophysik (Theoretical Astrophysics) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | X | X | (X) | (X) |
| Fortgeschrittene Kosmologie (Advanced Cosmology) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | X | | (X) | |
| Astroteilchenphysik (Astro Particle Physics) | V | 2 | 3 | WP | | X | | (X) |
| Quantum Field Theory in Curved Spacetime | V | 2 | 3 | WP | X | X | (X) | (X) |
| Struktur und Dynamik Extragalaktischer Systeme (Structure and Dynamics of Extragalatic Systems) | V | 2 | 3 | WP | X | X | (X) | (X) |
| AGN physics (AGN Physics) (Blockveranstaltung, 5 Tage V3) | V | 1 | 2 | WP | X | | (X) | |
| Verteilungsfunktionen in der Astrophysik (AGN distribution functions) (Blockveranstaltung, 5 Tage V3) | V | 1 | 2 | WP | | X | | (X) |
| Dynamik des Planetensystems (Dynamics of planetary system) (Blockveranstaltung, 5 Tage V3) | V | 1 | 2 | WP | | X | | (X) |
| Astrophysikalische Beschreibung von Strahlung und Materie (Radiation and matter in astrophysics) (Blockveranstaltung, 5 Tage V3) | V | 1 | 2 | WP | | X | | (X) |
| Summe | | 3–10 | 5–12 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VKEXASTM** | **Spezielle Themen der experimentellen Astrophysik für MSc-Studierende** | Wahlpflicht-modul | 6–10 CP (insg.) = 180–300 h | | 4–8 SWS |
| | (Special Topics in Experimental Astrophysics for MSc Students) | | Kontaktstudium 4–8 SWS / 60–120 h | Selbststudium 120–180 h | |

**Inhalte**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Thermodynamik im Alltag*: Die Vorlesung beleuchtet eine Reihe von alltäglichen Phänomenen und Konstrukten unter thermodynamischen Gesichtspunkten, z.B.: Wärmebilanz von Lebewesen, Temperatur der Atmosphäre, Kältemaschinen, Verbrennungsmotoren, Wärmetauscher, Kochen, Sterne, Planeten

*Stern- und Planetenentstehung*: Physikalische Prozesse in sternbildenden Wolken, gravitative Instabilität, Strahlungstransport, Sternentstehung auf verschiedenen Skalen, Entstehung von interstellaren Wolken deren Entwicklung, Fragmentation und Kollaps, Vor-Hauptreihenentwicklung, Scheibenbildung, Planetenentstehung

*Experimentelle Tests der Relativitätstheorie*: Grundlagen der speziellen Relativitätstheorie, Experimente zur speziellen Relativitätstherorie, Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie, Experimente zur allgemeinen Relativitätstherorie

*Experimente zur nuklearen Astrophysik*: Messung von Reaktionen mit geladenen Teilchen, Messung von photoneninduzierten Reaktionen, Messung von neutroneninduzierten Reaktionen

*Physik und Chemie des Interstellaren Mediums*: Dynamik des interstellaren Gases, hydrodynamische Instabilitäten, Turbulenz. Entstehung und Strahlung des interstellaren Gases, Staubs, PAHs (Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe). Energiegleichgewicht des ISM, Phasen des ISM, chemische Phasenübergänge. Chemische Prozesse, Bildung und Zerstörung von Atomen und Molekülen im ISM, Wechselwirkung Physik und Chemie. Spezielle interstellare Regionen: HII Regionen, diffuse Galaktische Wolken, Molekülwolken, Photonendominierte Regionen, X-Ray Dominierte Regionen, interstellare Schocks und Supernova-Überreste, Planetare Nebel.
The dynamics of the interstellar gas, hydrodynamic instabilities, turbulence. Formation of and radiation from interstellar gas, dust and polycyclic aromatic hydrocarbons. The energy balance of the ISM, phases of the ISM and chemical phase transitions. Chemical processes, formation and destructions of atoms and molecules in the ISM, Interaction physics-chemistry. Special interstellar regions: HII regions, diffuse Galactic clouds, molecular clouds, photon-dominated regions and X-ray dominated regions, interstellar shocks and supernova remnants, planetary nebulae.

*Datenanalyse in Physik und Astronomie*: In der Vorlesung werden die Grundlagen der Datenanalyse sowie die Anwendung statistischer Methoden auf Daten aus der Astronomie und anderen Gebieten vorgestellt. Der Kurs behandelt folgende Themen: Deskriptive Statistik, Fehler und Unsicherheiten, Fehlerfortpflanzung, Wahrscheinlichkeit, Wahrscheinlichkeitsverteilungen, mathematische Statistik (induktive Statistik bzw. Inferenzstatistik), Datenglättung, Interpolationsverfahren, Regressionsanalyse, Multivariate Verfahren, Methode der kleinsten Quadrate, Korrelationsanalyse, Hypothesentests und Anpassungstests. Praktische Aspekte, wie Datenvisualisierung, Datenformate sowie die Arbeit mit realen Daten spielen eine wichtige Rolle. Bei ausreichend Zeit werden zusätzliche Themen wie Bildbearbeitung, astronomische Datenreduktion und andere vorgestellt.
Vorlesungsinhalte werden oft anhand realer, astronomischer Daten vorgestellt. Die Inhalte der Vorlesung sind aber auf alle wissenschaftlichen Gebiete anwendbar.

The lecture introduces the basic aspects of data analysis and the application of statistical methods to data in astronomy and other sciences.
The course covers the following topics: Descriptive statistics, uncertainties and errors, error propagation, probability distributions, statistical inference, data smoothing, interpolation, regression, multivariate analysis, least-squares fitting, correlation analysis, hypothesis testing, correlation and testing fits. We will also cover practical aspects, such as plotting and presenting data, data formats, and work with real data. If time allows additional topics like image processing, astronomical data reduction, and others will ne introduced.
The course will often use real astronomical data or applications from astronomy, but the contents of the course are of course applicable to all physical sciences.

*Kernphysikalische Methoden in Forschung und Industrie*:

- Einführung und Kernpysikalische Grundlagen: Grundbegriffe, Kernreaktionen, Radioaktiver Zerfall
- Industrielle Anwendungen in Materialentwicklung und Analyse: Historische Anwendungen, Materialforschung, Sterilisation und Mutations Anwendungen, Tiefbohrungsanalyse
- Kernenergie und erneuerbare Energien: Fusion und Spaltung, Reaktoren, Reaktorgefahren und Speicher, Fusionsreaktoren, Erneuerbare Energien;
- Medizinische Anwendungen in Diagnostik and Behandlung: Radiographie, Bildgebende Verfahren, Bestrahlungsmethoden und Techniken;
- Isotopenanalyse und Iso-scapes: Isotopenverteilung und Fraktionierungsprozesse, Iso-Scapes, Klimaanalyse mit 18O, Forensische und biologische Anwendungen
- Anwendung in Kunst und Archäologie: Radiologie, XRF und PIXE, Raman Spektroskopie, Radiokarbon Methode, Thermolumineszenz
- Der Bombenpeak: Ursprung des Bombenpeaks, Anwendungen des Bombenpeaks
- Gesellschaftliche Ängste: Zukunftshoffnungen mit und Zukunftsängste vor neuen Techniken

Die Studierenden müssen mindestens zwei und können maximal drei Lehrveranstaltungen absolvieren. Dabei kann frei aus den verfügbaren Lehrveranstaltungen ausgewählt werden.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Ziel des Moduls ist es, experimentelle Methoden kennen zu lernen, die im großen Rahmen der Astrophysik angewandt werden. Den Studierenden werden die grundlegende Herangehensweise der beobachtungsorientierten Modellbildung und der daraus resultierenden Notwendigkeit für experimentelle Belege an Beispielen dargelegt. Mit dem Abschluss des Moduls sollen die Studierenden in der Lage sein, Experimente zu konzipieren sowie deren Signifikanz und systematische Unsicherheiten zu diskutieren.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

| **Empfohlene Vorkenntnisse** | |
|---|---|
| abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Thermodynamik im Alltag*: Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1: Mechanik, Thermodynamik*<br>*Stern- und Planetenentstehung*: Inhalt der Module Astronomie I und II<br>*Experimentelle Tests der Relativitätstheorie*: Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1*, *Theoretische Physik 1–2*<br>*Experimente zur nuklearen Astrophysik*: Inhalt der Veranstaltungen *Einführung in die Astronomie 1–2*, *Experimentalphysik 4a: Kerne und Elementarteilchen*<br>*Physik und Chemie des Interstellaren Mediums*: Inhalt der Module Astronomie I und II<br>*Datenanalyse in Physik und Astronomie*: Mathematik für Studierende der Physik, Einführung in die Programmierung für Studierende der Physik, Grundlagen der Astronomie<br>Die Übungen erfordern Zugang zu und sicheren Umgang mit Computern sowie Grundverständnis in einer Datenverarbeitungssoftware Ihrer Wahl (Origin, Excel, Matlab, Mathematica, R, ...) oder in einer Programmiersprache wie Python, Fortran, C, ...<br>*Kernphysikalische Methoden in Forschung und Industrie*: keine | |
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Reifarth |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Thermodynamik im Alltag*: keine<br>*Stern- und Planetenentstehung*: keine<br>*Experimentelle Tests der Relativitätstheorie*: keine<br>*Experimente zur nuklearen Astrophysik*: keine<br>*Physik und Chemie des Interstellaren Mediums*: keine<br>*Datenanalyse in Physik und Astronomie*: keine<br>*Kernphysikalische Methoden in Forschung und Industrie*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Thermodynamik im Alltag*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Stern- und Planetenentstehung*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Experimentelle Tests der Relativitätstheorie*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Experimente zur nuklearen Astrophysik*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Physik und Chemie des Interstellaren Mediums*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Datenanalyse in Physik und Astronomie*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test |

| | |
|---|---|
| **Prüfungsvorleistungen** | *Kernphysikalische Methoden in Forschung und Industrie*: aktive Mitarbeit in den Übungen<br>keine |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) zu den Inhalten aller von dem oder der Studierenden besuchten Lehrveranstaltungen des Moduls |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Thermodynamik im Alltag (Thermodynamics in everday life) | V | 2 | 3 | WP | | X | | (X) |
| Stern- und Planetenentstehung (Star and Planet Formation) | V | 2 | 3 | WP | | X | | (X) |
| Experimentelle Tests der Relativitätstheorie (Experimental tests of special and general relativity) | V | 2 | 3 | WP | | X | | (X) |
| Experimente zur nuklearen Astrophysik (Experiments of nuclear astrophysics) | V | 2 | 3 | WP | X | | (X) | |
| Physik und Chemie des Interstellaren Mediums (Physics and chemistry of the interstellar medium) | V | 2 | 3 | WP | X | | (X) | |
| Datenanalyse in Physik und Astronomie (Data Analysis in Physics and Astronomy) | V | 2 | 3 | WP | X | X | (X) | (X) |
| Kernphysikalische Methoden in Forschung und Industrie (Nuclear physics methods in research and industry)<br>(Blockveranstaltung, 8 Tage V4 + 2 Tage Ü4) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | X | | (X) | |
| Summe | | 4–8 | 6–10 | | | | | |

## 3.3 Kern- und Elementarteilchenphysik

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VTHKP1** | **Einführung in die Theoretische Kern- und Elementarteilchenphysik I**<br>(Introduction to Theoretical Nuclear and Elementary Particle Physics I) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h<br>Kontaktstudium 5 SWS / 75 h | Selbststudium 105 h | 5 SWS |

**Inhalte**

- Nuclear models: liquid drop model, Fermi-Gas Model, Shell Model, Deform Shell Model
- Collective Nuclear Models
- Nucleon-Nucleon Interaction
- Hartree-Fock Theory
- The Klein-Gordon equation
- Covariant electrodynamics
- The Dirac equation
- Quantum chromodynamics
- Symmetries of QCD

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Nach Absolvieren des Moduls sind die Studierenden im Bereich der elementaren Kernphysik und relativistischen Quantenmechanik in der Lage, sich selbstständig in die aktuelle Forschung einzuarbeiten. Die Studierenden kennen alle wesentlichen Konzepte und Fachbegriffe und verstehen deren inhaltliche Zusammenhänge. Die Studierenden können forschungsnahe Problemstellungen thematisch einordnen und mit den vermittelten Methoden analysieren. Die Studierenden können weiterführende Informationen zu einer gegebenen Fragestellung in Fachliteratur und Internet recherchieren. Die Studierenden können aktuelle wissenschaftliche Publikationen verstehen und wiedergeben. Die Studierenden besitzen das theoretische Rüstzeug, um eine gegebene wissenschaftliche Fragestellung selbst quantitativ zu untersuchen und zu beantworten.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–4*, *Theoretische Physik 1–4*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Bleicher |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | | | | | | | | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen | | | | | | | |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben | | | | | | | |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise | | | | | | | |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung | | | | | | | |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch | | | | | | | |
| **Modulprüfung** | | | | | | | | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | | | | | | | | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Einführung in die Theoretische Kern- und Elementarteilchenphysik I (Introduction to Theoretical Nuclear and Elementary Particle Physics I) | V+Ü | 3+2 | 6 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 5 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VTHKP2** | **Einführung in die Theoretische Kern- und Elementarteilchenphysik II**<br>(Introduction to Theoretical Nuclear and Elementary Particle Physics II) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h<br>Kontaktstudium 5 SWS / 75 h | Selbststudium 105 h | 5 SWS |

**Inhalte**

- Introduction to Quantum Chromodynamics (QCD): The constituent quark model, basic hadrons in the quark model; Non-abelian gauge field theory – QCD; SU(N) symmetry; Approximate symmetries of QCD – chiral symmetry; Feynman diagrams
- Effective Models: Thermodynamic models; String model; Non-equilibrium models and transport approaches to strongly interacting systems
- Heavy Ion Interactions: relativistic heavy-ion collisions at GSI, FAIR, CERN, LHC; Quark-Gluon-Plasma (QGP), Observables for the QGP

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Nach Absolvieren des Moduls sind die Studierenden im Bereich der modernen Schwerionen- und Teilchenphysik in der Lage, sich selbstständig in die aktuelle Forschung einzuarbeiten. Die Studierenden kennen alle wesentlichen Konzepte und Fachbegriffe und verstehen deren inhaltliche Zusammenhänge. Die Studierenden können forschungsnahe Problemstellungen thematisch einordnen und mit den vermittelten Methoden analysieren. Die Studierenden können weiterführende Informationen zu einer gegebenen Fragestellung in Fachliteratur und Internet recherchieren. Die Studierenden können aktuelle wissenschaftliche Publikationen verstehen und wiedergeben. Die Studierenden besitzen das theoretische Rüstzeug, um eine gegebene wissenschaftliche Fragestellung selbst quantitativ zu untersuchen und zu beantworten.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–4*, *Theoretische Physik 1–5*, *Einführung in die Theoretische Kern- und Elementarteilchenphysik I*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Bleicher |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |

| **Modulprüfung**<br>**Modulabschlussprüfung, benotet**<br>**bestehend aus:** | | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Einführung in die Theoretische Kern- und Elementarteilchenphysik II (Introduction to Theoretical Nuclear and Elementary Particle Physics II) | V+Ü | 3+2 | 6 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 5 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VQFT1** | **Einführung in die Quantenfeldtheorie und das Standardmodell der Teilchenphysik**<br>(Introduction to Quantum Field Theory and Standard Model of Particle Physics) | Wahlpflicht-modul | 8 CP (insg.) = 240 h<br>Kontaktstudium 6 SWS / 90 h | Selbststudium 150 h | 6 SWS |

| | |
|---|---|
| **Inhalte** | |
| Relativistische Wellengleichungen, klassische Feldtheorie im Lagrangeformalismus, Symmetrien und Noethersches Theorem; Einführung Quantenfeldtheorie: kanonische Quantisierung für Skalar-, Spinor- und Vektorfelder, Störungstheorie, Feynman-Diagramme; Abelsche und nichtabelsche Eichfelder, Quantenelektrodynamik und Quantenchromodynamik, Berechnung einfacher Prozesse, die schwache Wechselwirkung, vereinigte Beschreibung der Wechselwirkungen im Standardmodell. | |
| **Lernergebnisse/Kompetenzziele** | |
| Das Modul befähigt Studierende zur Behandlung von relativistischen Quantensystemen mit unendlich vielen Freiheitsgraden. Sie können den allgemeinen Formalismus auf die fundamentalen Wechselwirkungen des Standardmodells der Teilchenphysik anwenden und sind in der Lage, Streuquerschnitte für alle elementaren Prozesse in führender Näherung zu berechnen. Nach Abschluss des Moduls können Studierende Bachelor- oder Masterarbeiten in der theoretischen Teilchenphysik bearbeiten. | |
| **Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls** | |
| keine | |
| **Empfohlene Vorkenntnisse** | |
| Analytische Mechanik mit Lagrange- und Hamiltonformalismus, Feldtheorie und Wellengleichungen der klassischen Elektrodynamik, kanonische Quantisierung, Schrödingergleichung, quantenmechanische Störungstheorie (i.e. Theoretische Physik 1-4) | |
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Philipsen |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Einführung in die Quantenfeldtheorie und das Standardmodell der Teilchenphysik (Introduction to Quantum Field Theory and Standard Model of Particle Physics) | V+Ü | 4+2 | 8 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 6 | 8 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VQFT2** | **Fortgeschrittene Quantenfeldtheorie und Quantenchromodynamik** | Wahlpflicht-modul | 8 CP (insg.) = 240 h | | 6 SWS |
| | (Advanced Quantum Field Theory and Quantum Chromodynamics) | | Kontaktstudium 6 SWS / 90 h | Selbststudium 150 h | |

**Inhalte**

Feldquantisierung im Pfadintegralformalismus, Feynmanregeln der QCD und perturbative Auswertung, Renormierung und Renormierungsgruppe, asymptotische Freiheit und nichtperturbative Physik, Einführung in die Gittereichtheorie

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Einführung sehr allgemeiner theoretischer Konzepte (Pfadintegrale, Renormierungstheorie) und ihre Anwendung auf konkrete, beobachtbare Systeme. Erkennen der Analogien zwischen statistischen und quantenfeldtheoretischen Systemen. Erlernen nichtperturbativer Techniken zur Evaluation von Feldtheorien.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Siehe VQFT1 sowie Grundlagen der statistischen Physik (Zustandssummen, Boltzmanngewichte, Spinmodelle), skalare Feldtheorien, abelsche Feldtheorien

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Philipsen |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Fortgeschrittene Quantenfeldtheorie und Quantenchromodynamik (Advanced Quantum Field Theory and Quantum Chromodynamics) | V+Ü | 4+2 | 8 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 6 | 8 | | | | | |

| **VKT1** | **Quarkstruktur der Materie**<br>(Quark Structure of Matter) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

Elastische und inelastische Elektron- und Neutrinostreuung, Formfaktoren des Protons, Strukturfunktionen, Partonstruktur, Phänomenologie der Quantenchormodynamik, Farben, Gluonen, laufende Kopplung, Quarkonia, Baryonen und leichte Mesonen

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Das Modul vermittelt Kenntnisse über die elementare Struktur der Materie auf der Ebene von Quarks und Gluonen und gibt einen Einblick in die Phänomenologie der elementaren starken Wechselwirkung. Ziel der Vorlesung ist insbesondere die Vermittlung des Konzeptes des Streuexperimentes. Es soll herausgearbeitet werden, wie aus den ermittelten Streudaten die jeweilige Information zur Struktur der Materie gezogen werden kann.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–3*, *Theoretische Physik 1–3*, *Anfängerpraktikum 1–2*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Appelshäuser |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Die Quarkstruktur der Materie (Quark Structure of Matter) | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VKT2** | **Schwache Wechselwirkung und fundamentale Symmetrien**<br>(Weak Interaction and Fundamental Symmetries) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h<br>Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | 4 SWS |

| | |
|---|---|
| **Inhalte** | |
| Schwache Wechselwirkung: Leptonen, Quarkmischungen, Neutrinooszillationen, Paritätsverletzung, Vektor-Axialvektor Kopplung, Neutrale Kaonen, CP-Verletzung, elektroschwache Vereinheitlichung. | |
| **Lernergebnisse/Kompetenzziele** | |
| Die Vorlesung behandelt die Eigenschaften der schwachen Wechselwirkung, anhand derer die wichtigsten Merkmale des Standardmodells und seine freien Parameter diskutiert werden. Wichtige Konzepte der modernen Teilchenphysik wie Mischung und Oszillation werden behandelt. Die Vorlesung endet mit einem Ausblick auf die aktuellen offenen Fragen des Feldes wie der elektroschwachen Symmetriebrechung und Physik jenseits des Standardmodells.<br>Die ausführliche Diskussion von Schlüsselexperimenten soll die Fähigkeit schärfen, eine Verknüpfung zwischen experimenteller Beobachtung und physikalischem Sachverhalt herzustellen. | |
| **Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls** | |
| keine | |
| **Empfohlene Vorkenntnisse** | |
| Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–3*, *Theoretische Physik 1–3*, *Anfängerpraktikum 1–2* | |
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Appelshäuser |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Schwache Wechselwirkung und fundamentale Symmetrien (Weak Interaction and Fundamental Symmetries) | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VKT3** | **Starke Kernkraft und Kernmodelle**<br>(Strong Interaction and Nuclear Models) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h<br>Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | 4 SWS |

**Inhalte**

Starke Kernkraft, Deuteron, Streuexperimente, Streulänge, Fermigasmodell und Schalenmodell, Transferreaktionen, Elektromagnetische Kernübergänge, Kollektive Kernanregungen

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Dieses weiterführende Modul richtet sich an Studierende, die sich auf eine Abschlussarbeit im Bereich Kern- und Teilchenphysik vorbereiten. In ihm werden vorhandene Kenntnisse der Kernphysik vertieft und mit aktuellen Forschungsthemen verknüpft. Die Studierenden werden in die Lage versetzt,

- forschungsnahe Problemstellungen thematisch einzuordnen und mit den vermittelten Methoden zu bearbeiten;
- die Grenzen der Gültigkeit verschiedener kernphysikalischer Konzepte zu erkennen und geeignete Ansätze zu benennen;
- Aufbau und Konzept aktueller kernphysikalischer Experimente zu beurteilen und zu deren Optimierung beizutragen;
- Themen der aktuellen kernphysikalischen Forschung eigenständig in der Fachliteratur zu recherchieren und wiederzugeben.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–4*, *Theoretische Physik 1–4*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Appelshäuser |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Starke Kernkraft und Kernmodelle (Strong Interaction and Nuclear Models) | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VKT4M** | **Kern- und Teilchenphysik 4 für MSc-Studierende**<br>(Nuclear and Particle Physics 4 for MSc Students) | Wahlpflicht-modul | 5 CP (insg.) = 150 h | | 3 SWS |
| | | | Kontaktstudium 3 SWS / 45 h | Selbststudium 105 h | |

**Inhalte**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Kern- und Teilchenphysik 4a: Elektromagnetische Sonden der subatomaren Materie*: Photonselbstenergie, Elekronenstreuung, Paarvernichtung, zeitartige/raumartige Photonen, Parton-Verteilungsfunktionen, elektro-magnetische Formfaktoren, Dalitz-Zerfälle, Übergangsformfaktoren von Hadronen, In-Medium Spektralfunktionen von Hadronen, thermische Photonen, Di-Leptonen.

*Kern- und Teilchenphysik 4b: Physik des Quark-Gluon Plasmas*: Das Phasendiagramm der Quanten-Chromo Dynamik, Experimente der ultra-relativistischen Schwerionenphysik, Reaktionsdynamik und globale Observablen, Sonden des Quark-Gluon Plasmas: Seltsame Teilchen, Jets, Photonen und J/$\psi$

*Kern- und Teilchenphysik 4c: Resonanzphysik der Hadronen*: QCD-Bindungszustände (klassische, angeregte und exotische Systeme); Reaktionsmechanismen (Produktion und Zerfall von Hadronen); Statisches Quarkmodell und SU(3) und die Konsequenzen; Realistische Quarkmodelle; Analysemethoden und Systematik (sehr ausführlich); Experimente zur Hadronenspektroskopie (gestern, heute und morgen)

*Kern- und Teilchenphysik 4d: Physik schwerer Quarks und Quarkonia*: Produktionsprozesse schwerer Quarks (pQCD), Hadronen mit schweren Quarks (D/B Mesonen, Baryonen und Quarkonia), Verteilungsfunktion, Flavoroszillationen, nicht-relativistische Schrödingergleichung, Zerfälle, experimentelle Messungen, theoretische Modelle (FONLL,CSM,CEM,NRQCD) und Simulationen (PYTHIA,POWHEG) in Nukleon-Nukleon Kollisionen, Energieverlust und Thermalisierung schwerer Quarks im QGP, Unterdrückung und Regeneration von Quarkonia im QGP.

*Kern- und Teilchenphysik 4e: Strangeness in Schwerionenkollisionen*: Strangeness als Signatur für das Quark-Gluon-Plasma, schwache Zerfälle, Identifikation von Teilchen, Hadronenproduktion im statistischen-thermischen Modell, Strangeness-Enhancement bzw. Alternativen (Energie- und Multiplizitätsabhängigkeit), Kaon-Nukleon-Potential, Kaonen in Kernen und kaonische Atome, Hyperkerne, Transportmodelle, Kaonische Cluster, Strangeness-Produktion unterhalb der Schwelle.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Studierenden erwerben vertiefte Kenntnisse in einem Spezialgebiet der Hochenergie-Kernphysik. Dazu stehen vier Lehrveranstaltungen zur Auswahl, von denen eine absolviert werden muss. In diesen wird eine Übersicht über den aktuellen Stand und die Methoden des jeweiligen Spezialgebietes gegeben. Das erworbene Fachwissen ist bei der Anfertigung von Bachelor- und Master-Arbeiten in diesem Fachgebiet von Wichtigkeit.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Grundkenntnisse der Kern- und Teilchenphysik: Kernmodelle, Kernkräfte, Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung, relativistische Kinematik, Quark-Modell, Formfaktoren des Protons, Strukturfunktionen, Partonstruktur, QCD-Phänomenologie, Farbfreiheitsgrade, Gluonen, laufende Kopplung, Quarkonia, Baryonen und leichte Mesonen.

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Dauer** | einsemestrig | | | | | | | |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Blume | | | | | | | |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | | | | | | | | |
| **Teilnahmenachweise** | keine | | | | | | | |
| **Leistungsnachweise** | keine | | | | | | | |
| **Prüfungsvorleistungen** | keine | | | | | | | |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung | | | | | | | |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch | | | | | | | |
| **Modulprüfung** | | | | | | | | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | | | | | | | | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) in der von dem oder der Studierenden gewählten Vorlesung | | | | | | | |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Kern- und Teilchenphysik 4a: Elektromagnetische Sonden der subatomaren Materie (Nuclear and Particle Physics 4a: Electromagentic Probes of Sub-atomic Matter) | V | 3 | 5 | WP | | X | | (X) |
| Kern- und Teilchenphysik 4b: Physik des Quark-Gluon Plasmas (Nuclear and Particle Physics 4b: Physics of the Quark-Gluon-Plasma) | V | 3 | 5 | WP | | X | | (X) |
| Kern- und Teilchenphysik 4c: Resonanzphysik der Hadronen (Nuclear and Particle Physics 4c: Hadronic Resonances) | V | 3 | 5 | WP | | X | | (X) |
| Kern- und Teilchenphysik 4d: Physik schwerer Quarks und Quarkonia (Nuclear and Particle Physics 4d: Physics of Heavy Quarks and Quarkonia) | V | 3 | 5 | WP | | X | | (X) |
| Kern- und Teilchenphysik 4e: Strangeness in Schwerionenkollisionen (Nuclear and Particle Physics 4e: Strangeness in Heavy-Ion Collisions) | V | 3 | 5 | WP | | X | | (X) |
| Summe | | 3 | 5 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VDP** | **Physik der Teilchendetektoren**<br>(Physics of Particle Detectors) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h<br>Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 180 h | 4 SWS |

**Inhalte**

Das Modul dient der fachlichen Spezialisierung auf dem Gebiet der experimentellen Kern- und Teilchenphysik. Die Vorlesung dient als Ergänzung zu den Modulen VEX4A und VKT1–4 und ist eine Vorbereitung auf das Fortgeschrittenenpraktikum und eine BA/MA-Arbeit in diesem Spezialgebiet. Es werden die physikalischen Grundlagen zum Nachweis von Teilchenstrahlung vermittelt. Neben der Diskussion der Wechselwirkungen von Strahlung mit Materie werden die wichtigsten Detektortypen und ihre Anwendungen in aktuellen und geplanten Experimenten der Kern- und Teilchenphysik vorgestellt. Erworbenes Wissen kann auf andere Bereiche der experimentellen Physik angewendet werden.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Aufgrund seiner inhaltlichen Verbindung der Gründe und Techniken für den Teilchennachweis, den Grundlagen der elementaren Wechselwirkung von Teilchen mit Materie und Engineering-Aspekten sind die Studierenden auf die Konzeption und den Umgang mit modernen Teilchendetektoren vorbereitet. Die Studierenden kennen die wesentlichen Techniken des Teilchennachweises. Den Studierenden sind die grundlegenden Konzepte und technologischen Randbedingungen geläufig. Die Studierenden kennen komplexe moderne Detektorarrangements.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–3*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Stroth |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Physik der Teilchendetektoren (Physics of Particle Detectors) | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VANAHEP** | **Analysemethoden der Experimentellen Hochenergiephysik**<br>(Analysis Methods in Experimental High-Energy Physics) | Wahlpflicht-modul | 5 CP (insg.) = 150 h | | 3 SWS |
| | | | Kontaktstudium 3 SWS / 45 h | Selbststudium 105 h | |

**Inhalte**

Concepts of Data Analysis in High-Energy Physics, Modular Programming, Control Stuctures, Basic Variables, Functions, Objects, Encapsulation, Histograms, Trees and NTuples, Monte-Carlo Techniques and Random Number Generators, Analysis of Experimental Data (Exemplary Data Analysis, Acceptance & Efficiency Corrections)

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Einführung in die Datenanalyse von Hochenergieexperimenten mit C++ und ROOT. Neben einer Einführung in die Grundlagen der Programmierung werden grundlegende Techniken in der Datenanalyse exemplarisch erarbeitet.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–3*, *Theoretische Physik 1–3*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Stroth |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | keine |
| **Leistungsnachweise** | keine |
| **Prüfungsvorleistungen** | keine |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Analysemethoden der Experimentellen Hochenergiephysik (Analysis Methods in Experimental High-Energy Physics) | V | 3 | 5 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 3 | 5 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VANAHEP2** | **Fortgeschrittene Analysemethoden der Experimentellen Hochenergiephysik**<br>(Advanced Analysis Methods in Experimental High-Energy Physics) | Wahlpflicht-modul | 5 CP (insg.) = 150 h<br>Kontaktstudium 3 SWS / 45 h | Selbststudium 105 h | 3 SWS |

**Inhalte**

- Signal- und Systemtheorie: Analyse von Systemen, Fourier- und Laplace-Transformation, Signalformung, Abtasttheorem, Digitalisierung, Rauschen, DFT, FFT
- Moderne Multi-Level Triggersysteme, Bestimmung von Triggereffizienzen durch Monte-Carlo Simulationen, Moderne Datennahmesysteme
- Methoden und Algorithmen zur Rekonstruktion von Kollisionspunkt und Teilchenspuren (Vertexing und Tracking)
- Clusterfindungsalgorithmen und Jetrekonstruktion (Jet-Finding algorithms)
- Spezielle Statistische Methoden: Bestimmung von Signifikanz-Intervallen und oberen Schranken, p-Value, Likelihood, Bayesian Analysis, Unfolding
- Multivariative Analysemethoden (MVAM) und Machine Learning
- Debugging-Werkzeuge und Skriptsprachen
- ROOT und Interfaces zu speziellen Softwarepaketen

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Studierenden beherrschen im Detail verschiedene Analysemethoden, die in der aktuellen Forschung im Bereich der experimentellen Hochenergiephysik angewandt werden und in der Basislehrveranstaltung *Analysemethoden der Experimentellen Hochenergiephysik* nur kurz andiskutiert werden können.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–3*, *Theoretische Physik 1–3*, *Analysemethoden der Experimentellen Hochenergiephysik*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Büsching |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | keine |
| **Leistungsnachweise** | keine |
| **Prüfungsvorleistungen** | keine |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung |

| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Modulprüfung**<br>**Modulabschlussprüfung, benotet**<br>**bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Fortgeschrittene Analysemethoden der Experimentellen Hochenergiephysik (Advanced Analysis Methods in Experimental High-Energy Physics) | V | 3 | 5 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 3 | 5 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VKHEPM** | **Spezielle Themen der Kern- und Elementarteilchenphysik für MSc-Studierende** | Wahlpflicht-modul | 6–12 CP (insg.) = 180–360 h | | 4–9 SWS |
| | (Special Topics in Nuclear and Elementary Particle Physics for MSc Students) | | Kontaktstudium 4–9 SWS / 60–135 h | Selbststudium 120–225 h | |

**Inhalte**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Gittereichtheorie*: Gitterdiskretisierung von skalaren Feldern, fermionischen Feldern und Eichfeldern; Kontinuumslimes; grundlegende Monte-Carlo-Simulationsalgorithmen (Metropolis, Heatbath, HMC); Berechnung typischer QCD-Observablen (Wilson-Loops und das statische Quark-Antiquark-Potential, Hadronmassen, Zerfallskonstanten); Hopping-Parameter-Expansion; Gitterstörungstheorie; Verbesserung von Gitterwirkungen und -operatoren.

*Transporttheorie*: Verteilungsfunktionen, Boltzmannsche kinetische Gleichung, Relaxationszeitnäherung, Transportkoeffizienten, kinetische Prozesse in externen Felder, Virial-Entwicklung, kinetische Theorie der Plasmen, Landau Dämpfung, Lorentz-Plasma, kinetische Koeffizienten in starken Magnetfeldern, elektromagnetische Wellen, Fermi-Flüssigkeiten, thermische Leitfähigkeit und Viskosität der Fermi-Flüssigkeiten, Schalldämpfung in Fermi-Flüssigkeiten, kinetische Gleichung für Bose Teilchen, Nichtgleichgewichts-Greensfunktionen, Fluktuations-Dissipations Theorem, statistischer Operator im Nichtgleichgewicht, Variationsrechnungen für Transportkoeffizienten, Anwendungen der Kubo Formel.

*Thermische Quantenfeldtheorie*: Pfadintegral und thermische Zustandssumme, „imaginary-time“ Formalismus, Störungstheorie, Feynmandiagramme und Temperatur, Skalar-, Dirac- und Eichfelder bei endlichen Temperaturen, Anwendungen im Standardmodell (QED, QCD), Phasenübergänge.
Optional: endliche Dichte, magnetische Hintergrundfelder, effektive Theorien; „real-time“ Formalismus, Resummation und Grenzen der Störungstheorie, Linear Response.

*Erweiterter Hamilton-Lagrange Formalismus in Punktmechanik und Feldtheorie 1*: Rückblick gewöhnlicher Hamilton-Lagrange-Formalismus, Erweiterung, so dass die Zeit von einem Parameter zu einer dynamischen Variablen wird, erweiterte, kanonische Transformation, Beispiele: Lorentz-Transformation. verallgemeinertes Noether Theorem,
Anwendung: relativistisches Pfadintegral,
Hamilton-Lagrange Formalismus in der Feldtheorie: kanonische Transformationen, Poisson-Klammern, Liouville-Theorem,
Anwendung: Noether Theorem in der Feldtheorie, Eichtheorien, Feynman Formalismus,
Ausblick: Erweiterte kanonische Transformationen in der Feldtheorie (dynamische Raumzeit)

*Erweiterter Hamilton-Lagrange Formalismus in Punktmechanik und Feldtheorie 2*: Rückblick Erweiterter Hamilton-Lagrange-Formalismus der Punktmechanik, erweiterte, kanonische Transformation, Beispiele: Lorentz-Transformation. verallgemeinertes Noether Theorem. Anwendung: relativistisches Pfadintegral, Hamilton-Lagrange Formalismus in der Feldtheorie: kanonische Transformationen, Poisson-Klammern, Liouville-Theorem, Anwendung: Noether Theorem in der Feldtheorie, Eichtheorien Erweiterte kanonische Transformationen in der Feldtheorie (dynamische Raumzeit)

*Spezielle Relativitätstheorie*:

- Vierer-Vektoren, relativistische Kinematik, Anwendungsbeispiele
- Lorentz-Transformation, Poincare-Gruppe, Noether-Theorem
- Relativistische Formulierung der Elektrodynamik und Hydrodynamik
- Einführung in relativistische Wellengleichungen

*Konzepte der modernen theoretischen Physik*: Darstellung übergreifender Zusammenhänge in der Physik an Beispielen aus der Mechanik, Elektrodynamik, und Quantenmechanik. Grundlegende Einführung und Vertiefung der Begriffe der speziellen Relativitätstheorie und in Symmetrien und Gruppen am Beispiel der Rotationsgruppe und der Lie-Gruppen. Formulierung der Theorien im (relativistischen) Lagrangeformalismus.

*Renormierung in der Quantenfeldtheorie*: Nach einer kurzen Rekapitulation der Formulierung relativistischer Quantenfeldtheorien im Pfadintegralformalismus und die Herleitung der Feynman-Diagrammregeln für die Störungstheorie wird in die grundlegenden Techniken der Renormierung divergenter "Schleifenintegrale" eingeführt. Es werden sowohl die dimensionale Regularisierung und die "minimal subtraction"-Renormierungsschemata als auch die BPHZ-Renormierung zunächst am Beispiel einer einfachen skalaren Feldtheorie besprochen. Diese Techniken werden dann auf Eichtheorien (QED und QCD) angewendet und deren Renormierbarkeit in der "Background-Field Gauge" bewiesen. Danach werden die Renormierungsgruppengleichungen und die asymptotische Freiheit nichtabelscher Eichtheorien (insbesondere der QCD) besprochen. Die Vorlesung schließt mit einer Behandlung von Anomalien, d.h. Symmetrien der klassischen Feldtheorie, die durch die Quantisierung explizit gebrochen werden.

Die Studierenden müssen mindestens zwei und können maximal drei Lehrveranstaltungen absolvieren. Dabei kann frei aus den verfügbaren Lehrveranstaltungen ausgewählt werden.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Dieses Modul bereitet die Studierenden auf eine Abschlussarbeit im Bereich Kern- und Elementarteilchenphysik vor. Nach Absolvieren des Moduls sind die Studierenden in dem von ihnen gewählten Vertiefungsbereich in der Lage, sich selbstständig in die aktuelle Forschung einzuarbeiten bzw. direkt zu ihr beizutragen:

- Die Studierenden kennen alle wesentlichen Konzepte und Fachbegriffe und verstehen deren inhaltliche Zusammenhänge.
- Die Studierenden können forschungsnahe Problemstellungen thematisch einordnen und mit den vermittelten Methoden analysieren.
- Die Studierenden können weiterführende Informationen zu einer gegebenen Fragestellung in Fachliteratur und Internet recherchieren.
- Die Studierenden können aktuelle wissenschaftliche Publikationen verstehen und wiedergeben.
- Die Studierenden besitzen das experimentelle oder theoretische Rüstzeug, um eine gegebene wissenschaftliche Fragestellung selbst quantitativ zu untersuchen und zu beantworten.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Gittereichtheorie*: Siehe VQFT1 und VQFT2 sowie Pfadintegrale, Theorie der starken Wechselwirkungen (QCD), elementare Programmierkenntnisse.

*Transporttheorie*: Statistische Mechanik

*Thermische Quantenfeldtheorie*: Quantentheorie I, Theoretische Physik 5, wünschenswert: Einführung in die Quantenfeldtheorie und das Standardmodell der Teilchenphysik

*Erweiterter Hamilton-Lagrange Formalismus in Punktmechanik und Feldtheorie 1*: Grundlagen des klassischen Lagrange- und Hamiltonformalismus, Vektoranalysis, Lineare Algebra, Basiswissen Tensoranalysis

*Erweiterter Hamilton-Lagrange Formalismus in Punktmechanik und Feldtheorie 2*: Grundlagen des klassischen Lagrange- und Hamiltonformalismus, Vektoranalysis, Lineare Algebra, Basiswissen Tensoranalysis

| | |
|---|---|
| *Spezielle Relativitätstheorie*: Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–2*, *Theoretische Physik 1–2*<br>*Konzepte der modernen theoretischen Physik*: Grundlagen der Mechanik, Elektrodynamik, Quantenmechanik. Grundkenntnisse der speziellen Relativitätstheorie.<br>*Renormierung in der Quantenfeldtheorie*: Inhalt der Veranstaltungen *Theoretische Physik 4*, *Quantenfeldtheorie 1* | |
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Philipsen |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Gittereichtheorie*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Transporttheorie*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Thermische Quantenfeldtheorie*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Erweiterter Hamilton-Lagrange Formalismus in Punktmechanik und Feldtheorie 1*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Erweiterter Hamilton-Lagrange Formalismus in Punktmechanik und Feldtheorie 2*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Spezielle Relativitätstheorie*: keine<br>*Konzepte der modernen theoretischen Physik*: keine<br>*Renormierung in der Quantenfeldtheorie*: keine |
| **Leistungsnachweise** | abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Gittereichtheorie*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben<br>*Transporttheorie*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben<br>*Thermische Quantenfeldtheorie*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben<br>*Erweiterter Hamilton-Lagrange Formalismus in Punktmechanik und Feldtheorie 1*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben<br>*Erweiterter Hamilton-Lagrange Formalismus in Punktmechanik und Feldtheorie 2*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben<br>*Spezielle Relativitätstheorie*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Konzepte der modernen theoretischen Physik*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Renormierung in der Quantenfeldtheorie*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test |

| | |
|---|---|
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise in der Lehrveranstaltung, zu der die lehrveranstaltungsbezogene Modulprüfung stattfinden soll |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen, Übungen |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | Die Modulprüfung zu diesem Modul erfolgt lehrveranstaltungsbezogen: In einer Lehrveranstaltung des Moduls nach Wahl der oder des Studierenden werden sowohl die konkreten Inhalte der jeweiligen Lehrveranstaltung als auch die übergeordneten Lernziele des Moduls abgeprüft. Alle anderen von der oder dem Studierenden in diesem Modul absolvierten Lehrveranstaltungen werden mit den oben aufgeführten Leistungsnachweisen abgeschlossen. |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Gittereichtheorie (Lattice gauge theory) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | | X | | (X) |
| Transporttheorie (Transport Theory) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | | X | | (X) |
| Thermische Quantenfeldtheorie (Thermal quantum field theory) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | | X | | (X) |
| Erweiterter Hamilton-Lagrange Formalismus in Punktmechanik und Feldtheorie 1 (Extended Hamilton-Lagrange Formalism in Point Mechanics and Field Theory 1) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | X | | (X) | |
| Erweiterter Hamilton-Lagrange Formalismus in Punktmechanik und Feldtheorie 2 (Extended Hamilton-Lagrange Formalism in Point Mechanics and Field Theory 2) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | | X | | (X) |
| Spezielle Relativitätstheorie (Special Relativity) | V | 2 | 3 | WP | | X | | (X) |
| Konzepte der modernen theoretischen Physik (Concepts of modern theoretical physics) | V | 2 | 3 | WP | X | X | (X) | (X) |
| Renormierung in der Quantenfeldtheorie (Renormalization in Quantum Field Theory) | V | 2 | 3 | WP | X | | (X) | |
| Summe | | 4–9 | 6–12 | | | | | |

## 3.4 Festkörperphysik

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VEXFP1** | **Experimentelle Festkörperphysik 1**<br>(Experimental Solid State Physics 1) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

Auswahl aus folgenden Themen: Struktur und Strukturbestimmung, Grundlagen der Beugungstheorie, reziprokes Gitter, Gitterdynamik (Phononen), thermische Eigenschaften (spezifische Wärme, thermische Ausdehnung, Wärmeleitfähigkeit), elektronische Bandstruktur, Fermi-Flächen und deren experimentelle Bestimmung, Transportphänomene, dielektrische und optische Eigenschaften, Magnetismus. Es werden Beispiele aus der aktuellen Forschung diskutiert.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Studierenden können eine Bewegungsgleichung für die gekoppelte Bewegung aller Atome im Festkörper aufstellen und Näherungsverfahren entwickeln, um sie zu lösen. Sie können außerdem die Schwierigkeiten identifizieren, die die Beschreibung vieler (insbesondere wechselwirkender) Teilchen (Elektronen) in einem periodischen Potential, z.B. des Kristallgitters, mit sich bringt und ein Konzept zur Lösung des Problems erarbeiten. Die gewonnenen Erkenntnisse können sie kritisch bewerten und deren Gültigkeitsbereich im Vergleich mit experimentellen Beobachtungen, gewonnen durch moderne physikalische Messmethoden, verifizieren. Die Studierenden lernen dabei, sich die Grundlagen für die weitere Beschäftigung mit speziellen Themen wie Supraleitung, Magnetismus und Halbleiterphysik, sowie der technischen Anwendung von Festkörpermaterialien, auf breiter Basis zu erarbeiten. Das Modul bereitet Studierende auf eine Bachelor- oder Masterarbeit in experimenteller Festkörperphysik vor.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Die Vorlesung baut auf die in der „Einführung in die Festkörperphysik“(VEX4B) vermittelten Grundlagen zum atomaren Aufbau und zur elektronischen Struktur von Festkörpern auf. Es werden außerdem einfache Methoden der Quantenmechanik verwendet.

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Müller |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |

| **Modulprüfung** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | | | | | | | | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Experimentelle Festkörperphysik 1 (Experimental Solid State Physics 1) | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VEXFP2** | **Experimentelle Festkörperphysik 2**<br>(Experimental Solid State Physics 2) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

Auswahl aus folgenden Themen: Struktur und Strukturbestimmung, Grundlagen der Beugungstheorie, reziprokes Gitter, Gitterdynamik (Phononen), thermische Eigenschaften (spezifische Wärme, thermische Ausdehnung, Wärmeleitfähigkeit), elektronische Bandstruktur, Fermi-Flächen und deren experimentelle Bestimmung, Transportphänomene, dielektrische und optische Eigenschaften, Magnetismus. Es werden Beispiele aus der aktuellen Forschung diskutiert.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Nach erfolgreicher Beendigung des Moduls sind die Studierenden sehr gut mit komplexeren festkörperphysikalischen Eigenschaften, die sich aus der Fermi-Statistik und der elektronischen Bandstruktur ergeben, vertraut. Sie sind in der Lage, eine grundlegende Integro-Differentialgleichung, wie die Boltzmannsche Transportgleichung, aufzustellen und mittels eines Näherungsverfahrens zu lösen. Sie können selbständig die relevanten Fragestellungen identifizieren, die mit der Wechselwirkung von Ladungsträgern mit elektromagnetischer Strahlung oder mit kollektiven elektrischen und magnetischen Ordnungsphänomenen zusammenhängen, und Lösungswege aufzeigen. Insbesondere sind sie in der Lage, experimentelle Ansätze zu ermitteln und deren Ergebnisse zu interpretieren, um diese theoretischen Beschreibungen zu überprüfen. Die Studierenden lernen dabei, sich die Grundlagen für die weitere Beschäftigung mit speziellen Themen wie Supraleitung, Magnetismus und Halbleiterphysik, sowie der technischen Anwendung von Festkörpermaterialien, auf breiter Basis zu erarbeiten. Das Modul bereitet Studierende auf eine Bachelor- oder Masterarbeit in experimenteller Festkörperphysik vor.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Die Vorlesung baut auf den in VEX4B und VEXFP1 vermittelten Grundlagen zum atomaren Aufbau und zur elektronischen Struktur von Festkörpern auf. Es werden außerdem einfache Methoden der Quantenmechanik verwendet.

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Müller |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |

| **Modulprüfung**<br>**Modulabschlussprüfung, benotet**<br>**bestehend aus:** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Experimentelle Festkörperphysik 2<br>(Experimental Solid State Physics 2) | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VKRISZ** | **Grundlagen der Kristallzüchtung**<br>(Basics of Crystal Growth) | Wahlpflicht-modul | 5 CP (insg.) = 150 h | | 4 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 90 h | |

**Inhalte**

*Grundlagen der Kristallzüchtung*: Charakteristika des kristallinen Zustands der Materie;
Physikalische Grundlagen der Kristallzüchtung: Phasendiagramme, Keimbildung, Segregation, Hydrodynamik;
Methoden zur Kristallzüchtung aus verschiedenen ungeordneten Ausgangsphasen;
Kristallzüchtung ausgewählter Systeme aus der Festkörperforschung;
Verfahren zur Material- und Kristallcharakterisierung: Differentielle Thermoanalyse, Röntgendiffraktometrie, Optische und Elektronenmikroskopie.

*Praktikum Grundlagen der Kristallzüchtung*: Im Rahmen des Laborpraktikums werden die in der Vorlesung gelernten Züchtungs- und Charakterisierungsmethoden konkret auf ein System angewendet.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Das Modul vermittelt die erforderlichen Grundlagen zur erfolgreichen Mitarbeit in einem experimentellen Projekt zur Kristallzüchtung. Die Studierenden besitzen dann die

- Fähigkeit, den hier angestebten kristallinen Zustand von anderen Erscheinungsformen fester Materie abgrenzen zu können.
- Fähigkeit zur Beurteilung der Machbarkeit von Kristallzüchtungsvorhaben auf Grundlage von Phasendiagrammen.
- Kenntnis der experimentellen Vorgehensweise zur Bestimmung von Phasendiagrammen.
- Kenntnis der Mechanismen der Keimselektion und Einsicht in die Bedingungen unter denen eine erfolgreiche Keimbildungskontrolle möglich ist.
- Kenntnis der typischen Grenzschichten während des Kristallwachstums und Einsicht in die hierdurch vermittelten Einwirkungen hydrodynamischer Instabilitäten auf die Materialeigenschaften.
- Kenntnis typischer Kristallzüchtungsmethoden und Fähigkeit, diese nach spezifischen Schwierigkeiten und Realisierungsaufwand zu beurteilen.
- Fähigkeit, kristalline Proben über Mikroskopie und Röntgenmethoden so zu charakterisieren, dass sie erfolgreich in die Festkörperforschung eingebracht werden können.
- Kenntnis der Kristallzüchtungsmethoden in der Festkörperphysik

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Breites Grundlagenwissen aus den Veranstaltungen Experimentalphysik 1, 2, und 3a) sowie den Anfängerpraktika 1 und 2, insbesondere betreffend: Beschreibung von Bewegungsvorgängen, Hydrodynamik und Hydrostatik, Umgang mit thermodynamischen Potentialen, elektrische Meßtechnik, Induktionsvorgänge, Beugung und Interferenz, Erzeugung von Röntgenlicht, Aufbau und Funktion von Mikroskopen.

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Dauer** | einsemestrig | | | | | | | |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Krellner | | | | | | | |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | | | | | | | | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen und am Praktikum | | | | | | | |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben | | | | | | | |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise | | | | | | | |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung, Praktikum | | | | | | | |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch | | | | | | | |
| **Modulprüfung** | | | | | | | | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | | | | | | | | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (60 Min.) | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Grundlagen der Kristallzüchtung (Basics of Crystal Growth) | V+Ü | 2+1 | 4 | Pf | X | | (X) | |
| Praktikum Grundlagen der Kristallzüchtung (Lab Class Basics of Crystal Growth) | P | 1 | 1 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 4 | 5 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VTHFP1** | **Einführung in die Theoretische Festkörperphysik**<br>(Introduction to Theoretical Solid State Physics) | Wahlpflicht-modul | 8 CP (insg.) = 240 h | | 6 SWS |
| | | | Kontaktstudium 6 SWS / 90 h | Selbststudium 150 h | |

**Inhalte**

Struktur von Festkörpern, Born-Oppenheimer Näherung, Gitterschwingungen, nichtwechselwirkende Elektronen, Bloch Theorem, Bandstruktur, Halbleiter, elektronischer Transport, Elektron-Elektron-Wechselwirkung, Modelle für wechselwirkende Elektronen

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Studierenen haben einen Überblick über die grundlegenden Konzepte der theoretischen Festkörperphysik. Sie kennen die kristalline Struktur von Festkörpern, wissen um die Existenz unterschiedlicher kondensierter Phasen und sind mit den elektronischen und thermodynamischen Eigenschaften von Festkörpern sowie den elementaren Anregungen in ihnen vertraut. Sie beherrschen die heute gebräuchlichen fortschrittlichen Methoden zur theoretischen Beschreibung dieser Phänomene.
Die Studierenden lernen insbesondere, wie physikalische Beobachtungen in der Festkörperphysik mit mathematischen Gleichungen dargestellt werden können. Außerdem fördert die Behandlung der Gleichungen die Kreativität der Studierenden bei ihren Überlegungen, wie sie zu lösen sind.
Dieses Modul bereitet die Studierenden auf eine Abschlussarbeit im Bereich der theoretischen Festkörperphysik vor. Nach Absolvieren des Moduls sind sie in dem von ihnen gewählten Vertiefungsbereich in der Lage, sich selbstständig in die aktuelle Forschung in der theoretischen Festkörperphysik einzuarbeiten bzw. direkt zu ihr beizutragen.
Das Modul kann ergänzend zur experimentellen Festkörperphysik (Module VEXFP1 & 2) absolviert werden.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–4*, *Theoretische Physik 1–4*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Valenti |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Einführung in die Theoretische Festkörperphysik (Introduction to Theoretical Solid State Physics) | V+Ü | 4+2 | 8 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 6 | 8 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VTHFP2** | **Theorie des Magnetismus, der Supraleitung und der elektronischen Korrelationen** | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 5 SWS |
| | (Theory of magnetism, superconductivity and electron-electron correlation) | | Kontaktstudium 5 SWS / 75 h | Selbststudium 105 h | |

**Inhalte**

Wechselwirkende Elektronen, Hartree-Fock Theorie, Magnetismus, Supraleitung, Fermi-Flüssigkeitstheorie und Quasi-Teilchen-Konzept, Quanten-Hall-Effekt

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Studierenden sind im Detail mit dem quantenmechanischen Hintergrund des Magnetismus vertraut. Sie wissen um die Existenz kollektiver Phänomene in Festkörpern wie der Supraleitung und können diese von 1-Teilchen-Quanteneffekten abgrenzen. Sie beherrschen die in der modernen theoretischen Festkörperphysik üblicherweise verwendeten Vielteilchenmethoden, insbesondere die Dichtefunktional-Theorie, aber auch Zugänge zur Beschreibung hochkorrelierter Zustände. Im Zusammenspiel der behandelten physikalischen Probleme mit den verschiedenen für die Beschreibung wechselwirkender Vielteilchensysteme eingesetzten Methoden gewinnen die Studierenden ein tiefes Verständnis für die fundamental nicht-klassischen Phänomene in Festkörpern. Die Studierenden können auf dieser Basis physikalische Fragestellungen in abstrakte mathematische Gleichungen übersetzen und sind in der Lage, mit den resultierenden, zunehmend komplexeren mathematischen Methoden auch praktisch umzugehen.
Dieses Modul bereitet die Studierenden auf eine Masterarbeit in der theoretischen Festkörperphysik vor. Nach Absolvieren des Moduls sind sie in der Lage, sich selbstständig in die aktuelle Forschung in der theoretischen Festkörperphysik einzuarbeiten bzw. direkt zu ihr beizutragen.
Das Modul kann ergänzend zur experimentellen Festkörperphysik (Module VEXFP1 & 2) absolviert werden.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–4*, *Theoretische Physik 1–5*, *Einführung in die Theoretische Festkörperphysik*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Valenti |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |

| **Modulprüfung** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | | | | | | | | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Theorie des Magnetismus, der Supraleitung und der elektronischen Korrelationen (Theory of magnetism, superconductivity and electron-electron correlation) | V+Ü | 3+2 | 6 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 5 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VKEXFPM** | **Spezielle Themen der experimentellen Festkörperphysik für MSc-Studierende**<br>(Special Topics in Experimental Condensed Matter Physics for MSc Students) | Wahlpflicht-modul | 6–10 CP (insg.) = 180–300 h | | 4–7 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4–7 SWS / 60–105 h | Selbststudium 120–195 h | |

**Inhalte**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Magnetismus — Grundlagen, Methoden, Materialien*: Auswahl aus folgenden Themen: Historischer Überblick, Magnetostatik, Magnetismus lokalisierter Elektronen, Ferromagnetismus und Austauschwechselwirkung, Molekularfeldtheorie, Antiferromagnetismus und andere Arten magnetischer Ordnung (z.B. Skyrmionen), magnetische Domänen, Magnetisierungsdynamik, Magnetismus von Nanostrukturen, moderne Messmethoden aus der aktuellen Forschung, magnetische Materialien für technische Anwendungen.

*Einführung in die Supraleitung*: Auswahl aus folgenden Themen: Grundlegende supraleitende Eigenschaften, Phänomenologie und Thermodynamik, phänomenologische Modelle: London- und Ginzburg-Landau-Theorie, Typ-I- und Typ-II-Supraleiter, Quanteninterferenzphänomene (Josephson-Effekte), Grundzüge der BCS-Theorie, Konsequenzen der BCS-Theorie, Bose-Einstein-Kondensation, Anwendungen der Supraleitung (z.B. Quanten-Computing), neue supraleitende Materialien, konventionelle und unkonventionelle Supraleiter.

*Experimentelle Tieftemperaturphysik*: Auswahl aus folgenden Themen: Temperaturskalen, Thermometrie, Quantenflüssigkeiten $^4$He/$^3$He: Phasendiagramme, Superfluidität, Kühltechniken im Kelvin- sowie Subkelvin- und Submillikelvin-Bereich.

*Ausgewählte Methoden der experimentellen Festkörperphysik*: Tieftemperaturphysik/Kryotechnik, Probenherstellung, Streuexperimente/Spektroskopie (Neutronen, optische Methoden, Photoemission), thermodynamische Methoden (z.B. spezifische Wärme, thermische Ausdehnung), magnetische Messungen (auf der Makro-, Mikro- und Nanoskala), elektrischer und thermischer Transport (auch zeitaufgelöst) und dielektrische Messungen, Rastersondenmethoden (Elektronenmikroskopie, Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskopie), etc. Beispiele aus folgenden Forschungsbereichen: stark korrelierte Elektronensysteme, Metall-Isolator-Übergänge, Physik der Gläser, Magnetismus, Supraleitung, Nanoelektronik, (magnetische) Halbleiter, Spintronics, u.a.

*Elektronische Eigenschaften von Nanostrukturen*: Ausgewählte Kapitel der Quantentheorie (Sub-Bänder und niedrig-dimensionale Systeme, Quantenbox, Quantenpunkt, Quantenreflexion/Transmission/Tunneln, etc.), Materialien (Halbleiter-Heterostrukturen, Organische Halbleiter, Kohlenstoff-Nanoröhren und Fullerene, Graphen, Granulare Systeme, etc.), Fabrikations- und Charakterisierungstechniken (Dünnschichttechniken, Nanostrukturierung, Selbstorganisation, Rasterkraftmikroskopie, etc.), Elektronischer Transport in Nanostrukturen (Streulängen, Diffusion, Dephasierung, Landauer-Formel, etc.), Einzelelektronentunneln und Bauelemente (Coulomb-Blockade, Einzelelektronentransistor, Coulomb-Oszillationen, etc.).

*Halbleiter- und Bauelementephysik*: Einführung der festkörperphysikalischen Besonderheiten von Halbleitern (Materialeigenschaften, Bandstruktur, Exzitonen, Dotierung, DC-Leitfähigkeit); Übergänge und Kontakte (p-n-Übergang, Schottky-Kontakt, Ohmscher Kontakt, Heterostruktur-Übergang); Feldeffekt, Tunneleffekt; Halbleiterbauelemente (Diode, Bipolartransistor, Feldeffekttransistor, Leuchtdiode, etc); Hochfrequenzeigenschaften und -bauelemente (Gunn-Effekt, Schottkydiode), Quantisierungseffekte und ihre Nutzung (Resonante Tunneldiode, HEMT-Transistor, HBT-Transistor, etc.); Bauelementemodellierung und Schaltungsentwurf; Bauelemente auf Nicht-Standardhalbleitern (Graphen, Kohlenstoffröhren).

Die Studierenden müssen mindestens zwei und können maximal drei Lehrveranstaltungen absolvieren. Dabei kann frei aus den verfügbaren Lehrveranstaltungen ausgewählt werden.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Dieses Modul bereitet die Studierenden auf eine Abschlussarbeit im Bereich Festkörperphysik vor. Nach Absolvieren des Moduls sind die Studierenden in dem von ihnen gewählten Vertiefungsbereich in der Lage, sich selbstständig in die aktuelle Forschung einzuarbeiten bzw. direkt zu ihr beizutragen:

- Die Studierenden kennen alle wesentlichen Konzepte und Fachbegriffe und verstehen deren inhaltliche Zusammenhänge.
- Die Studierenden können forschungsnahe Problemstellungen thematisch einordnen und mit den vermittelten Methoden analysieren.
- Die Studierenden können weiterführende Informationen zu einer gegebenen Fragestellung in Fachliteratur und Internet recherchieren.
- Die Studierenden können aktuelle wissenschaftliche Publikationen verstehen und wiedergeben.
- Die Studierenden besitzen das experimentelle oder theoretische Rüstzeug, um eine gegebene wissenschaftliche Fragestellung selbst quantitativ zu untersuchen und zu beantworten.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Generell für alle Lehrveranstaltungen: Grundlegende Konzepte der Festkörperphysik aus *Einführung in die Festkörperphysik* (VEX4B). Außerdem die grundlegenden Vorlesungen zur *Experimentalphysik 1–3* und *Theoretische Physik 1–4*, insbesondere Grundkenntnisse in Quantenmechanik. Nützlich sind grundlegende Konzepte der Thermodynamik und Statistischen Mechanik, wie in *Theoretische Physik 5* vermittelt (kann auch parallel gehört werden). Empfehlenswert: *Experimentelle Festkörperphysik 1* (VEXFP1), kann auch parallel gehört werden.

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Müller |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | im Fall aller Lehrveranstaltungen ohne Übung: keine<br>*Halbleiter- und Bauelementephysik*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | im Fall aller Lehrveranstaltungen ohne Übung: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Halbleiter- und Bauelementephysik*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise in der Lehrveranstaltung, zu der die lehrveranstaltungsbezogene Modulprüfung stattfinden soll |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch für jede Lehrveranstaltung des Moduls |

| **Modulprüfung** | |
|---|---|
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | Die Modulprüfung zu diesem Modul erfolgt lehrveranstaltungsbezogen: In einer Lehrveranstaltung des Moduls nach Wahl der oder des Studierenden werden sowohl die konkreten Inhalte der jeweiligen Lehrveranstaltung als auch die übergeordneten Lernziele des Moduls abgeprüft. Alle anderen von der oder dem Studierenden in diesem Modul absolvierten Lehrveranstaltungen werden mit den oben aufgeführten Leistungsnachweisen abgeschlossen. |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Magnetismus — Grundlagen, Methoden, Materialien (Magnetism — Foundations, Methods, Materials) | V | 2 | 3 | WP | X | | (X) | |
| Einführung in die Supraleitung (Introduction to Superconductivity) | V | 2 | 3 | WP | X | | (X) | |
| Experimentelle Tieftemperaturphysik (Experimental Low Temperature Physics) | V | 2 | 3 | WP | X | | (X) | |
| Ausgewählte Methoden der experimentellen Festkörperphysik (Selected Methods of Experimental Solid State Physics) | V | 2 | 3 | WP | X | | (X) | |
| Elektronische Eigenschaften von Nanostrukturen (Electronic Properties of Nanostructures) | V | 2 | 3 | WP | | X | | (X) |
| Halbleiter- und Bauelementephysik (Physics of Semiconductors and Electronic Devices) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | | X | | (X) |
| Summe | | 4–7 | 6–10 | | | | | |

## 3.5 Optik, Laser- und Atomphysik

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VKATOM** | **Spezielle Themen der Atomphysik für MSc-Studierende**<br>(Special Topics in Atomic Physics for MSc Students) | Wahlpflicht-modul | 6–9 CP (insg.) = 180–270 h | | 4–6 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4–6 SWS / 60–90 h | Selbststudium 120–180 h | |

**Inhalte**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Atomphysik 1*: Atome als quantenmechanische Teilchen: Quantenoptik mit Atomen, Doppelspalt mit Materiewellen, Dekohärenz, Verschränkung, Quantenkryptography, Quantenradierer. Wechselwirkung von Atomen und Molekülen mit einzelnen Photonen, Photoeffekt, Wirkungsquerschnitt, Drehimpulse, Wechselwirkung von Atomen mit starken Laserfeldern

*Atomphysik 2*: Moleküle: quantenmechanische Beschreibung, Superposition von atomaren Zuständen (LCAO), Born/Oppenheimer-Näherung, Beschreibung molekularer Potentiale, Franck/Condon-Prinzip, Photoionisation von Molekülen, zeitlicher Ablauf und Wigner-Phase, Emissionswinkelverteilung im molekularen Bezugssystem, Auger-Zerfall in Atomen und Molekülen, Post Collision Interaction, nicht-lokale molekulare Zerfallsprozesse, Interatomic Coulombic Decay und verwandte Prozesse, stationäre Zustände und "Bewegungïn der Quantenmechanik

*Abbildungsmethoden der modernen Atomphysik*: Vor- und Nachteile verschiedener typischer Messsonden (geladene Teilchen, kurze intensive Laser Pulse, Synchrotronstrahlung). Targets: insbes. effusive Gastargets, Atom- und Molekularstrahlen, Überschallgasjets. Detektoren: u. a. Channeltrons, MCPs, Phosphorschirme, CCDs, Delaylineanoden. Aktuelle Techniken: Impulsspektroskopie, velocity map imaging, magnetische Flasche, Coulomb Explosion Imaging, Flugzeitspektrometer, dispers. Elektronenspektrometer, Röntgenbeugung, PEEM, Photoelectron diffraction

*Laser- und Optoelektronik*: Mathematische Beschreibung elektromagnetischer Felder, Fourier-Transformationen, zeitliche und räumliche Wellenausbreitung, Gauß-Strahlen, geometrische Optik, optische Resonatoren, Wellendispersion. Lasergrundlagen: Strahlende Übergänge, spektrale Verbreiterung, Verstärkungssättigung, Dauerstrich- und gepulster Laserbetrieb, Modenkopplung, verschiedene Lasertypen (Gas, Festkörper, Farbstoff), Halbleiterlaser. Nichtlineare Optik: Oberwellenerzeugung, Phasenanpassung, elektrooptische Modulation, Selbstphasenmodulation, Messung optischer Pulse, Detektion optischer Strahlung.

*Grundlagen der Analytik und Oberflächenmodifizierung mit Ionenstrahlen*: Modelle für niederenergetische Kernreaktionen; niederenergetische Teilchenbeschleuniger; Detektoren für den Nachweis von Ionen, Röntgen- und Gammastrahlung; Bremsvermögen von Ionen in Materie; Grundlagen der Ionenimplantation; Berechnung von Implantationsprofilen; Beispiele für die Oberflächenmodifizierung mittels Ionenimplantation; Überblick über die Verfahren der Ionenstrahlanalytik (RBS, PIXE, PIGE, NRA, Channeling); Tiefenprofilierung leichter Elemente mittels PIGE; Anwendung der Oberflächenmodifizierung in der Materialforschung und Medizin.

*Kurzpulslasertechnologie und Starkfeldionisation von Atomen und Molekülen*: Kurzpulse, Propagation, Erzeugung, Verstärkung (CPA); Strahl- und Pulsparameter (Strahlprofil, Polarisation, Fokussierbarkeit, CEP); Optik (Linsen, Spiegel, AR-Beschichtung: dielektrische Spiegel, Strahlteiler und Dünnschichtpolarisatoren, Wellenplaten, Teleskope), Aberrationen; Nichtlineare Optik: Frequenzverdoppelung, Weißlichterzeugung, Optisch-parametrische Verstärkung (TOPAS), Pulskompression; Strahl- und Pulscharakterisierung (Strahlprofil-Analyse, Autokorrelator, SPIDER, FROG, $M^2$); Optische Feldsynthese: Puls-Shaper, Zwei-Farben- und OAM-Felder; Pump-Probe Technik; Tunnel- und Multiphotonenionisation, Elektronen Impulsverteilungen, ADK Theorie, Semi-klassische Simulation, Nichtadiabatische Effekte, Elektronenspin, Photonenimpuls, MO-ADK; Anwendungen der Starkfeldionisation: Messung der Laserfeldintensität, Coulomb-Explosion Imaging, Erzeugung der hohen Harmonischen, Laser-Induced Electron Diffraction, Photoelectron Circular Dichroism

Die Studierenden müssen mindestens zwei und können maximal drei Lehrveranstaltungen absolvieren. Dabei kann frei aus den verfügbaren Lehrveranstaltungen ausgewählt werden.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Dieses Modul bereitet die Studierenden auf eine Abschlussarbeit im Bereich Atomphysik vor. Nach Absolvieren des Moduls sind die Studierenden in dem von ihnen gewählten Vertiefungsbereich in der Lage, sich selbstständig in die aktuelle Forschung einzuarbeiten bzw. direkt zu ihr beizutragen:

- Die Studierenden kennen alle wesentlichen Konzepte und Fachbegriffe und verstehen deren inhaltliche Zusammenhänge.
- Die Studierenden können forschungsnahe Problemstellungen thematisch einordnen und mit den vermittelten Methoden analysieren.
- Die Studierenden können weiterführende Informationen zu einer gegebenen Fragestellung in Fachliteratur und Internet recherchieren.
- Die Studierenden können aktuelle wissenschaftliche Publikationen verstehen und wiedergeben.
- Die Studierenden besitzen das experimentelle oder theoretische Rüstzeug, um eine gegebene wissenschaftliche Fragestellung selbst quantitativ zu untersuchen und zu beantworten.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Atomphysik 1*: Inhalt der Module Experimentalphysik 1–3

*Atomphysik 2*: Inhalt der Module Experimentalphysik 1–3, Vorlesung Atomphysik 1

*Abbildungsmethoden der modernen Atomphysik*: Inhalt der Vorlesung Atomphysik 1

*Laser- und Optoelektronik*: Inhalt der Module *Experimentalphysik 1–4*, *Theoretische Physik 1–4*, *Anfängerpraktikum 1–2*

*Grundlagen der Analytik und Oberflächenmodifizierung mit Ionenstrahlen*: Inhalt der Module VEX1 (Mechanik, Thermodynamik), VEX2 (Elektrodynamik), VEX3 (Optik, Atome und Quanten)

*Kurzpulslasertechnologie und Starkfeldionisation von Atomen und Molekülen*: Experimentalphysik 3a und 3b

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |

| | |
|---|---|
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Dörner |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | keine |
| **Leistungsnachweise** | abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Atomphysik 1*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Atomphysik 2*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Abbildungsmethoden der modernen Atomphysik*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Laser- und Optoelektronik*: Präsentation oder schriftlich zu beantwortende Quizfragen (Übungsaufgaben) oder Fachgespräch (ca. 30 Min.)<br>*Grundlagen der Analytik und Oberflächenmodifizierung mit Ionenstrahlen*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Kurzpulslasertechnologie und Starkfeldionisation von Atomen und Molekülen*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise in der Lehrveranstaltung, zu der die lehrveranstaltungsbezogene Modulprüfung stattfinden soll |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | Die Modulprüfung zu diesem Modul erfolgt lehrveranstaltungsbezogen: In einer Lehrveranstaltung des Moduls nach Wahl der oder des Studierenden werden sowohl die konkreten Inhalte der jeweiligen Lehrveranstaltung als auch die übergeordneten Lernziele des Moduls abgeprüft. Alle anderen von der oder dem Studierenden in diesem Modul absolvierten Lehrveranstaltungen werden mit den oben aufgeführten Leistungsnachweisen abgeschlossen. |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Atomphysik 1 (Atomic Physics 1) | V | 2 | 3 | WP | | X | | |
| Atomphysik 2 (Atomic Physics 2) | V | 2 | 3 | WP | X | | (X) | |
| Abbildungsmethoden der modernen Atomphysik (Imaging Techniques in Atomic Physics) | V | 2 | 3 | WP | X | | (X) | |
| Laser- und Optoelektronik (Laser and Optoelectronics) | V | 2 | 3 | WP | X | | (X) | |
| Grundlagen der Analytik und Oberflächenmodifizierung mit Ionenstrahlen (Principles of Analytics and Surface Modification with Ion Beams) | V | 2 | 3 | WP | X | | (X) | |
| Kurzpulslasertechnologie und Starkfeldionisation von Atomen und Molekülen (Short pulse laser technology and strong field ionization of atoms and molecules) | V | 2 | 3 | WP | | X | | (X) |
| Summe | | 4–6 | 6–9 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VKPHSM** | **Photonik und Spektroskopie für MSc-Studierende**<br>(Photonics and Spectroscopy for MSc Students) | Wahlpflicht-modul | 6–9 CP (insg.) = 180–270 h | | 4–6 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4–6 SWS / 60–90 h | Selbststudium 120–180 h | |

**Inhalte**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Nano-Optik und Kohärente Optik*: Optische Abbildung im Wellenbild; Abbildung und Fourier-Transformation; nichtkonventionelle linsenfreie Abbildungsmethoden (Nahfeldverfahren, Synthetische Apertur); Holographie; Kohärenz und Korrelation, Eigenschaften von Laserlicht; Tomographie; Kristall-Optik; negativer Brechungsindex; Metamaterialien; Transformationsoptik; “Tarnkappe” aus Metamaterial; Nichtlineare Optik

*Laser- und Optoelektronik*: Mathematische Beschreibung elektromagnetischer Felder, Fourier-Transformationen, zeitliche und räumliche Wellenausbreitung, Gauß-Strahlen, geometrische Optik, optische Resonatoren, Wellendispersion. Lasergrundlagen: Strahlende Übergänge, spektrale Verbreiterung, Verstärkungssättigung, Dauerstrich- und gepulster Laserbetrieb, Modenkopplung, verschiedene Lasertypen (Gas, Festkörper, Farbstoff), Halbleiterlaser. Nichtlineare Optik: Oberwellenerzeugung, Phasenanpassung, elektrooptische Modulation, Selbstphasenmodulation, Messung optischer Pulse, Detektion optischer Strahlung.

*Einführung in die Terahertz-Spektroskopie*: Optoelectronic generation and detection of THz pulses, spectroscopic quantities (refractive index, complex dielectric function, optical conductivity) and their extraction from THz transmission measurements, probing the high-frequency conductivity in semiconductors and nano-materials, fundamentals of the physics of charge carriers in semiconductors (effective mass, optical transitions, carrier transport in the band picture, carrier relaxation), optical-pump/THz-probe spectroscopy, Gunn effect; basics of superconductivity, high-frequency conductivity of superconductors, Cooperpair breaking and reformation, Rothwarf-Taylor model; semiconductor quantum-well structures, intra-subband transitions, semiconductor superlattices, Bloch oscillations, THz-emission spectroscopy; non-linear THz spectroscopy, phenomena at high THz fields/intensities for the example of graphene and semiconductors.

*Terahertz-Elektronik*: Verfahren und Bauelemente der Terahertz Elektronik werden studiert und experimentelle Methoden in der Terahertz Elektronik untersucht. Folgende Themen werden vorgestellt: elektronische Bauelemente bei Terahertz Frequenzen; elektronische Signalerzeugung; elektronische Pulserzeugung: Verfahren und Grenzen; Terahertz-Signaldetektion mit elektronischen Bauelementen; Betriebsparameter; Komponenten und Verfahren der Terahertz-Elektronik in der Kommunikation, Bildgebung und Sensorik; elektronische Terahertz Systeme.

*(Bio-)molekulare Dynamik — Messmethoden und Anwendungen von Femtosekunden bis Sekunden*: Experimentelle Methoden werden vorgestellt aus den Bereichen: Ultrakurzzeitspektroskopie; nichtlineare Laserspektroskopie; Einzelmolekülspektroskopie; Einzelmolekülmikroskopie; Kraftmikroskopie; Optische Pinzetten; zeitaufgelöste NMR-Spektroskopie; Massenspektrometrie; zeitaufgelöste Röntgenbeugung, Kristallographie und Elektronenbeugung. Der Informationsgehalt der verschiedenen Experimente wird anhand wichtiger Beispiele erläutert. Diese umfassen unter anderem: Protonentransfer; Bruch und Bildung chemischer Bindungen; Katalysatoren; Bildung transienter Strukturen in Flüssigkeiten; Energietransfer in Molekülen; Proteinfaltung; Enzymfunktion; Photorezeptoren; Molekulare Motoren; Photosynthese.

Die Studierenden müssen mindestens zwei und können maximal drei Lehrveranstaltungen absolvieren. Dabei kann frei aus den verfügbaren Lehrveranstaltungen ausgewählt werden.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Dieses Modul bereitet Studierende auf ein Forschungsprojekt im Bereich der Photonik und Spektroskopie mit kohärenter Strahlung vor, das den Spektralbereich von Mikrowelle bis Ultraviolett abdeckt.

- Die Studierenden lernen, die Möglichkeiten und Grenzen herkömmlicher Methoden zur Erzeugung, Detektion und spektroskopischen Verwendung von Strahlung zu verstehen und wie moderne Techniken neue Potenziale für Forschung und Anwendungen eröffnen.
- Die Studierenden lernen, sowohl den Einsatz von Hochfrequenz-Elektronikbauteilen als auch quantenmechanische Mechanismen der Licht-Materie-Interaktion zu beschreiben und zu quantifizieren, einschließlich Aspekten der erreichbaren zeitlichen, spektralen und räumlichen Auflösung.
- Je nach Wahl der Lernveranstaltungen vertiefen die Studierenden ihre Kenntnisse in der Dynamik von Festkörpermaterialien (einschließlich nanoskaliger Bauelemente), chemischen und/oder biologischen Systemen.
- Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Realisierung von Versuchsgeräten, Diagnosegeräten und modernsten technologischen Geräten.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Nano-Optik und Kohärente Optik*: Grundlagenwissen aus den Veranstaltungen *Experimentalphysik 1, 2, und 3a)* sowie aus dem Physikalischen Anfängerpraktikum 1.

*Laser- und Optoelektronik*: Inhalt der Module *Experimentalphysik 1–4*, *Theoretische Physik 1–4*, *Anfängerpraktikum 1–2*

*Einführung in die Terahertz-Spektroskopie*: Basic physics as taught in the lectures *Experimentalphysik VEX1* to *VEX3* and in the *Anfängerpraktika*. Beyond that, basic knowledge of the band model of electrons in semiconductors, of the concept of phonons in the reciprocal lattice, and of superconductivity, all on the level as taught in the lecture *Experimentalphysik 4b: Festkörper*.
Die gleichzeitige Teilnahme am "Seminar on Terahertz Electronics and Spectroscopy" wird empfohlen.

*Terahertz-Elektronik*: keine

*(Bio-)molekulare Dynamik — Messmethoden und Anwendungen von Femtosekunden bis Sekunden*: keine

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Roskos |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Nano-Optik und Kohärente Optik*: keine<br>*Laser- und Optoelektronik*: keine<br>*Einführung in die Terahertz-Spektroskopie*: keine<br>*Terahertz-Elektronik*: keine |

| | |
|---|---|
| **Leistungsnachweise** | *(Bio-)molekulare Dynamik — Messmethoden und Anwendungen von Femtosekunden bis Sekunden*: keine<br>abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Nano-Optik und Kohärente Optik*: Präsentation oder schriftlich zu beantwortende Quizfragen (Übungsaufgaben) oder Fachgespräch (ca. 30 Min.)<br>*Laser- und Optoelektronik*: Präsentation oder schriftlich zu beantwortende Quizfragen (Übungsaufgaben) oder Fachgespräch (ca. 30 Min.)<br>*Einführung in die Terahertz-Spektroskopie*: Präsentation oder schriftlich zu beantwortende Quizfragen (Übungsaufgaben) oder Fachgespräch (ca. 30 Min.)<br>*Terahertz-Elektronik*: Präsentation einer eigenständigen Untersuchung im Rahmen eines Miniprojekts<br>*(Bio-)molekulare Dynamik — Messmethoden und Anwendungen von Femtosekunden bis Sekunden*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise in der Lehrveranstaltung, zu der die lehrveranstaltungsbezogene Modulprüfung stattfinden soll |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch und/oder Englisch je nach den gewählten Lehrveranstaltungen |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | Die Modulprüfung zu diesem Modul erfolgt lehrveranstaltungsbezogen: In einer Lehrveranstaltung des Moduls nach Wahl der oder des Studierenden werden sowohl die konkreten Inhalte der jeweiligen Lehrveranstaltung als auch die übergeordneten Lernziele des Moduls abgeprüft. Alle anderen von der oder dem Studierenden in diesem Modul absolvierten Lehrveranstaltungen werden mit den oben aufgeführten Leistungsnachweisen abgeschlossen. |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Nano-Optik und Kohärente Optik (Nano and Coherent Optics) | V | 2 | 3 | WP | | X | | (X) |
| Laser- und Optoelektronik (Laser and Optoelectronics) | V | 2 | 3 | WP | X | | (X) | |
| Einführung in die Terahertz-Spektroskopie (Introduction to Terahertz Spectroscopy) | V | 2 | 3 | WP | | X | | (X) |
| Terahertz-Elektronik (Terahertz Electronics) | V+S | 1+1 | 3 | WP | | X | | (X) |
| (Bio-)molekulare Dynamik — Messmethoden und Anwendungen von Femtosekunden bis Sekunden ((Bio-)molecular Dynamics — Measuring Methods and Applications from Femtoseconds to Seconds) | V | 2 | 3 | WP | | X | | (X) |
| Summe | | 4–6 | 6–9 | | | | | |

## 3.6 Beschleuniger-, Plasma- und angewandte Physik

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VVAK** | **Vakuumphysik**<br><br>(Vacuum Physics) | Wahlpflicht-modul | 8 CP (insg.) = 240 h | | 6 SWS |
| | | | Kontaktstudium 6 SWS / 90 h | Selbststudium 150 h | |

**Inhalte**

*Vakuumphysik I*: Kinetic theory of gases (pressure, velocity distribution, mean free path). Gas flow types: molecular, laminar and turbulent regimes. Compressible flow. Flow resistance (conductance), connection of resistances. Pumping speed. Choked flow. Transitional flow. Evaporation condensation. Pumping processes. Physics of vacuum pumps: Positive Displacement Pumps (liquid ring, rotary, roots). Multistage Pumps. Example of Pump down with Leak. Kinetic pumps (Molecular drag, Turbo Molecular, Diffusion Pump). Capture Pumps (Getter Pump + Example, Sputter-ion pump, Cryo-pump). Gauges: Short introductory to statistics of measurements (error-bars, Chi squared test), Liquid manometers (McLeod), Piston gauge, Capacitance Gauge.

*Vakuumphysik II*: Introduction of Kinetic theory of gases: Pressure and Temperature. Viscosity Gauges: Kinematic model of viscosity, Momentum transport, Effect of Boundary. Spinning Rotor Gauge. Thermal conductivity Gauges: Kinetic model of heat conductivity in gases, Effect of Boundary. Heat flux in a cylinder. Energy loss mechanisms (by radiation, by conduction, by gas transport). Pirani Gauge. Ionization Gauges: Hot Cathode Gauge, Bayard- Alpert Gauge. Cold Cathode Gauge: Penning Gauge. Inverted Magnetron Gauge. Partial Pressure Analysis: Quadrupole Mass Spectrometer, Magnetic Sector Analyzer, Time of Flight Mass Analyzer, Trochoidal Mass Analyzer, Omegatron. Leak Detection. Gas-Surface interactions and Diffusion: Adsorption, Absorption, Outgassing. Pressure Profile: equation of pressure evolution (x,t) and application to Accelerators. Beam collimation and Vacuum pressure. Vacuum instability.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Studierenden sind vertraut mit Berechnungsmethoden und Konzepten zur Auslegung von Vakuumkammern sowie zur Ausstattung mit Vakuumpumpen und Messgeräten. Die Studierenden sind nach Absolvieren dieses Moduls vorbereitet für diejenigen Bachelor- und Masterarbeiten in der experimentellen Physik, die mit Vakuumserzeugung verknüpft sind.
Methoden zur Analyse der Restgasverteilung werden vermittelt. Oberflächenprozesse allgemein sowie speziell Strahl-Wand-Wechselwirkungen bei intensiven Teilchenstrahlen werden vorgestellt.
Die Vorlesung ist für alle Themengebiete hiflreich, die mit Vakuumserzeugung verknüpft sind und ergänzend zum ertsen Teil. Bei vielen Bachelor- und Masterarbeiten in der experimentellen Physik werden die hier vermittelten Kenntnisse angewandt.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–2*, *Theoretische Physik 1–2*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Ratzinger |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Leistungsnachweise**<br>**Prüfungsvorleistungen** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben<br>Erbringen aller Leistungsnachweise | | | | | | | |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen, Übungen | | | | | | | |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch | | | | | | | |
| **Modulprüfung** | | | | | | | | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet**<br>**bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Vakuumphysik I (Vacuum Physics I) | V+Ü | 2+1 | 4 | Pf | | X | | |
| Vakuumphysik II (Vacuum Physics II) | V+Ü | 2+1 | 4 | Pf | | | (X) | |
| Summe | | 6 | 8 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VKBEP** | **Beschleunigerphysik**<br><br>(Accelerator Physics) | Wahlpflicht-modul | 8–12 CP (insg.) = 240–360 h | | 6–9 SWS |
| | | | Kontaktstudium 6–9 SWS / 90–135 h | Selbststudium 150–225 h | |

**Inhalte**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Einführung in die Beschleunigerphysik*: Beschleunigungsmechanismen, Linear- und Kreisbeschleuniger, Strahlerzeugung, Fokussierung, elektrostatische und hochfrequente Strukturen, HF-Erzeugung, Beschleunigeranwendungen

*Linearbeschleuniger*: Elektronen- und Ionenquellen, Separationstechniken, Strahltransportelemente, Überblick über vielzellige Resonatoren, hochfrequenzphysikalische Grundlagen, Strahllast, Liouvillescher Satz, Vlasov- und Fokker-Planck-Gleichungen, raumladungsdominierte Strahlen, Raumladungskompensation, Anwendungen

*Ringbeschleuniger und Speicherringe*: Kreisbeschleunigerkomponenten, Emittanz, Alternierende Gradienten Fokussierung, Strahltransport intensiver Strahlen, Strahlstabilität, Strahlkühlung, HF-Systeme, Ring-Strahldynamik (transversal, longitudinal), selbstkonsistente Teilchenverteilungen

Die Studierenden müssen mindestens zwei und können maximal drei Lehrveranstaltungen absolvieren. Dabei kann frei aus den verfügbaren Lehrveranstaltungen ausgewählt werden.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Dieses Modul bereitet die Studierenden auf eine Abschlussarbeit im Bereich Beschleinigerphysik vor. Nach Absolvieren des Moduls sind die Studierenden in dem von ihnen gewählten Vertiefungsbereich in der Lage, sich selbstständig in die aktuelle Forschung einzuarbeiten bzw. direkt zu ihr beizutragen:

- Die Studierenden kennen alle wesentlichen Konzepte und Fachbegriffe und verstehen deren inhaltliche Zusammenhänge.
- Die Studierenden können forschungsnahe Problemstellungen thematisch einordnen und mit den vermittelten Methoden analysieren.
- Die Studierenden können weiterführende Informationen zu einer gegebenen Fragestellung in Fachliteratur und Internet recherchieren.
- Die Studierenden können aktuelle wissenschaftliche Publikationen verstehen und wiedergeben.
- Die Studierenden besitzen das experimentelle oder theoretische Rüstzeug, um eine gegebene wissenschaftliche Fragestellung selbst quantitativ zu untersuchen und zu beantworten.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Einführung in die Beschleunigerphysik*: Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–3*, *Theoretische Physik 1–3*, *Atomphysik 1*, *Anfängerpraktikum 1–2*

*Linearbeschleuniger*: Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–4*, *Theoretische Physik 1–3*

*Ringbeschleuniger und Speicherringe*: Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–3*, *Theoretische Physik 1–3*, *Anfängerpraktikum 1–2*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Ratzinger |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen im Fall aller Lehrveranstaltungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben im Fall aller Lehrveranstaltungen |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise in der Lehrveranstaltung, zu der die lehrveranstaltungsbezogene Modulprüfung stattfinden soll |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen, Übungen |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | Die Modulprüfung zu diesem Modul erfolgt lehrveranstaltungsbezogen: In einer Lehrveranstaltung des Moduls nach Wahl der oder des Studierenden werden sowohl die konkreten Inhalte der jeweiligen Lehrveranstaltung als auch die übergeordneten Lernziele des Moduls abgeprüft. Alle anderen von der oder dem Studierenden in diesem Modul absolvierten Lehrveranstaltungen werden mit den oben aufgeführten Leistungsnachweisen abgeschlossen. |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Einführung in die Beschleunigerphysik (Introduction to accelerator physics) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | | X | | (X) |
| Linearbeschleuniger (Linear Accelerators) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | | X | | (X) |
| Ringbeschleuniger und Speicherringe (Synchrotrons and Storage Rings) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | | X | | (X) |
| Summe | | 6–9 | 8–12 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VKBEK** | **Beschleunigerkonzepte**<br><br>(Accelerator Design) | Wahlpflicht-modul | 6–9 CP (insg.) = 180–270 h | | 4–6 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4–6 SWS / 60–90 h | Selbststudium 120–180 h | |

**Inhalte**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Supraleitung in der Beschleuniger- und Fusionstechnologie*: Grundlagen und Phänomene der Supraleitung, wichtigste Verbindungen, Leiterherstellung, Spulenaufbau, Magnete, Hochfrequenzsupraleitung, supraleitende Resonatoren, Herstellung und Oberflächenpräparation, Tuning, Ankopplung, Messverfahren, aktuelle Forschungsprojekte

*Laseranwendungen in der Beschleunigerphysik*: The lecture focuses on laser applications in particle accelerators. The contents of the lecture are: Introduction to lasers with a focus on high power lasers in the TW and PW range; Laser-plasma interactions and laser-matter interactions with the special application laser ion source"; Different methods of particle acceleration with high power lasers such as TNSA (Target Normal Sheath Acceleration), LWFA (Laser Wakefield Acceleration), and Dielectric Laser Accelerators with an overview of current research activities; The potential of laser driven accelerator concepts for the design of future research facilities and the applications of laser-accelerated beams; Beam matching of laser-accelerated beams to conventional linac structures and laser based beam diagnostics;
Other topics of this lecture are free electron lasers (FELs) and their applications. Important mechanisms in FELs like undulators, self-amplified spontaneous emission, micro-bunching and seeding will be explained.

*Beschleuniger Strahlinstrumentierung und Diagnose*: Es werden folgende Themen behandelt: Aufgaben der Strahldiagnostik an Beschleunigern, Messgeräte zur Strahlstrom-Messung, Verfahren der transversalen Profilmessung, Methoden der Emittanzbestimmung, Physik und Technik der Beam Position Monitore, Messung longitudinaler Strahlparameter, Strahlverlust-Detektion. Die Herleitung der Funktionsprinzipien der Instrumente wird ausführlich behandelt. Weiterhin liegt ein Schwerpunkt auf der Durchführung von Messaufgaben mit praxis-relevanten Methoden als Teil der Übungen, d.h. mess-technischer Demonstrationen der Instrumente mit Oszilloskop, Spektrum- und Netzwerkanalysatoren.

*High Intensity Accelerators and their Applications*: Das Modul behandelt Hochintensitäts-Beschleuniger. Nach einer allgemeinen Einführung liegt der Schwerpunkt auf hohen Intensitäten und den assoziierten Effekten. Grundlagen der Strahldynamik, transversale und longitudinale Strahldynamik, Raumladungseffekte, spezielle Effekte in raumladungs-dominierten Beschleunigern, Hochstrom-Ionenquellen, HF-Parameter, RFQ-Strukturen, Driftröhrenstrukturen, supraleitende HF-Strukturen, FRANZ-Projekt, MYRRHA-Projekt, IFMIF, FRIB, ESS, FAIR, HBS.

Die Studierenden müssen mindestens zwei und können maximal drei Lehrveranstaltungen absolvieren. Dabei kann frei aus den verfügbaren Lehrveranstaltungen ausgewählt werden.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Dieses Modul bereitet die Studierenden auf eine Abschlussarbeit im Bereich Beschleinigerphysik vor. Nach Absolvieren des Moduls sind die Studierenden in dem von ihnen gewählten Vertiefungsbereich in der Lage, sich selbstständig in die aktuelle Forschung einzuarbeiten bzw. direkt zu ihr beizutragen:

- Die Studierenden kennen alle wesentlichen Konzepte und Fachbegriffe und verstehen deren inhaltliche Zusammenhänge.
- Die Studierenden können forschungsnahe Problemstellungen thematisch einordnen und mit den vermittelten Methoden analysieren.
- Die Studierenden können weiterführende Informationen zu einer gegebenen Fragestellung in Fachliteratur und Internet recherchieren.
- Die Studierenden können aktuelle wissenschaftliche Publikationen verstehen und wiedergeben.
- Die Studierenden besitzen das experimentelle oder theoretische Rüstzeug, um eine gegebene wissenschaftliche Fragestellung selbst quantitativ zu untersuchen und zu beantworten.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Supraleitung in der Beschleuniger- und Fusionstechnologie*: Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–4*, *Theoretische Physik 1–3*, *Anfängerpraktikum 1–2*

*Laseranwendungen in der Beschleunigerphysik*: Inhalt der Module VEX3 und VTH3 sowie der Lehrveranstaltung *Einführung in die Beschleunigerphysik*

*Beschleuniger Strahlinstrumentierung und Diagnose*: Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–4*, Anfängerpraktikum, Einführung in die Beschleunigerphysik (oder äquivalentes Wissen)

*High Intensity Accelerators and their Applications*: Inhalt der Lehrveranstaltungen *Anfängerpraktikum 1+2* und *Experimentalphysik 1–4*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Podlech |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Supraleitung in der Beschleuniger- und Fusionstechnologie*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Laseranwendungen in der Beschleunigerphysik*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Beschleuniger Strahlinstrumentierung und Diagnose*: keine<br>*High Intensity Accelerators and their Applications*: |

| | |
|---|---|
| **Leistungsnachweise** | abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Supraleitung in der Beschleuniger- und Fusionstechnologie*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Laseranwendungen in der Beschleunigerphysik*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Beschleuniger Strahlinstrumentierung und Diagnose*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*High Intensity Accelerators and their Applications*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise in der Lehrveranstaltung, zu der die lehrveranstaltungsbezogene Modulprüfung stattfinden soll |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | Die Modulprüfung zu diesem Modul erfolgt lehrveranstaltungsbezogen: In einer Lehrveranstaltung des Moduls nach Wahl der oder des Studierenden werden sowohl die konkreten Inhalte der jeweiligen Lehrveranstaltung als auch die übergeordneten Lernziele des Moduls abgeprüft. Alle anderen von der oder dem Studierenden in diesem Modul absolvierten Lehrveranstaltungen werden mit den oben aufgeführten Leistungsnachweisen abgeschlossen. |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Supraleitung in der Beschleuniger- und Fusionstechnologie (Superconductivity in accelerator and fusion technology) | V | 2 | 3 | WP | | X | | (X) |
| Laseranwendungen in der Beschleunigerphysik (Laser Applications in Accelerator Physics) | V | 2 | 3 | WP | X | | (X) | |
| Beschleuniger Strahlinstrumentierung und Diagnose (Accelerator beam instrumentation and diagnostics) | V | 2 | 3 | WP | X | | (X) | |
| High Intensity Accelerators and their Applications | V | 2 | 3 | WP | X | X | (X) | (X) |
| Summe | | 4–6 | 6–9 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VKPLAM** | **Spezielle Themen der Plasmaphysik für MSc-Studierende**<br>(Special Topics in Plasma Physics for MSc Students) | Wahlpflicht-modul | 8–12 CP (insg.) = 240–360 h | | 6–9 SWS |
| | | | Kontaktstudium 6–9 SWS / 90–135 h | Selbststudium 150–225 h | |

**Inhalte**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Plasmaphysik*: Plasmen im Universum und Labor, grundlegende Plasmaparameter, Plasmadichte und -temperatur, Ionisationsgrad, Plasmaerzeugung mit Hilfe von Entladungen, Ionen-oder Laserstrahlen, Einteilchenbewegung, Gyrationsradius, Driftbewegungen, magnetische Spiegel, Townsend-Koeffizienten einer Entladung, Paschenkurve, Debye-Länge, Plasmafrequenz, Landau-Länge, Gamma-Parameter, lokales und partielles thermodynamisches Gleichgewicht, Boltzmann-Verteilung, Saha-Gleichung, weltweiter Energiebedarf, Umweltaspekte der Energieerzeugung, Brennstoffvorrat, Fusion in der Sonne, magnetischer Einschluss, Trägheitseinschluss, Bindungsenergie von Atomkernen, Schwellenenergie und Energiefreisetzung verschiedener Fusionsreaktionen, Fusionswirkungsquerschnitte und Reaktionsrate, Energiebilanz eines Fusionsplasmas, Lawson- und rho*r-Kriterium für Fusion, Kompression und Energiegewinn, magnetische und hydrodynamische Instabilitäten, Anforderungen an Reaktorkonzepte.

*Physik und Anwendungen der Hochspannungstechnik*: Aufgaben und Anwendungen der Hochspannungstechnik, Perspektiven der Hochspannungstechnik, Wechsel- und Drehstromtechnik, Energieübertragung, Grundlagen elektrischer Felder, technische Beanspruchungen, statische, stationäre und quasistationäre Felder in homogenen Dielektrika, Gasentladungskennlinien, raumladungsfreie Entladung im homogenen Feld (nach Townsend und Paschen), raumladungsbeschwerte Entladung, Kanalentladung (Streamer-Mechanismus), Entladeverzug, Stoßkennlinien und Hochfrequenzdurchschlag, Entladungen im inhomogenen Feld, Oberflächenentladungen, Funken-, Bogen- und Blitzentladung, Entladungen in flüssigen und festen Dielektrika, Entladungen in festen Stoffen, Teilentladungen (TE), Vakuumdurchschlag, Isolierstoffe, Typische Isoliersysteme für Gleich-, Wechsel-, und Impulsspannungen, Prüfen, Messen, Diagnose, Hochspannungsprüfungen, Überspannungsableiter, Erzeugung hoher Spannungen, weitere Anwendungen, Blitzschutz, Sicherstellung der EMV, Hochleistungsimpulstechnik.

*Plasmen hoher Energiedichte und Röntgenstrahlung im Universum und Labor*: Grundlagen Plasmaphysik, hydrodynamische Gleichungen, Erzeugung und Eigenschaften von Plasmen hoher Energiedichte, Anwendung in Planetenmodellen, Erzeugung im Labor (Schockwellen, Röntgen- und Teilchenstrahlen), Lasererzeugte Plasmen, Hochenergielaser, Inertialfusion

*Plasmen hoher Energiedichte und Röntgenstrahlung im Universum und Labor II*: Strahlungsmechanismen, Diagnostiken, technische und astrophysikalische Anwendungen. Verschiedene Strahlungsmechanismen. Elementare Prozesse in Plasma. Röntgen-Spektren aus Plasmen - Informationsquelle über Plasmeneigenschaften. Methoden und Techniken von Röntgendiagnostiken. Anwendungen für Lasererzeugten Plasmen.

Die Studierenden müssen mindestens zwei und können maximal drei Lehrveranstaltungen absolvieren. Dabei kann frei aus den verfügbaren Lehrveranstaltungen ausgewählt werden.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Dieses Modul bereitet die Studierenden auf eine Abschlussarbeit im Bereich Plasmaphysik vor. Nach Absolvieren des Moduls sind die Studierenden in dem von ihnen gewählten Vertiefungsbereich in der Lage, sich selbstständig in die aktuelle Forschung einzuarbeiten bzw. direkt zu ihr beizutragen:

- Die Studierenden kennen alle wesentlichen Konzepte und Fachbegriffe und verstehen deren inhaltliche Zusammenhänge.
- Die Studierenden können forschungsnahe Problemstellungen thematisch einordnen und mit den vermittelten Methoden analysieren.
- Die Studierenden können weiterführende Informationen zu einer gegebenen Fragestellung in Fachliteratur und Internet recherchieren.
- Die Studierenden können aktuelle wissenschaftliche Publikationen verstehen und wiedergeben.
- Die Studierenden besitzen das experimentelle oder theoretische Rüstzeug, um eine gegebene wissenschaftliche Fragestellung selbst quantitativ zu untersuchen und zu beantworten.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Plasmaphysik*: Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–3*, *Theoretische Physik 1–2*, *Anfängerpraktikum 1–2*

*Physik und Anwendungen der Hochspannungstechnik*: Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–3*, *Theoretische Physik 1–2* und *Anfängerpraktikum 1–2*

*Plasmen hoher Energiedichte und Röntgenstrahlung im Universum und Labor*: Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–3*, Grundlagen der Atomphysik

*Plasmen hoher Energiedichte und Röntgenstrahlung im Universum und Labor II*: Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–3*, Grundlagen der Atomphysik

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Jacoby |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Plasmaphysik*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Physik und Anwendungen der Hochspannungstechnik*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Plasmen hoher Energiedichte und Röntgenstrahlung im Universum und Labor*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen |

| | |
|---|---|
| | *Plasmen hoher Energiedichte und Röntgenstrahlung im Universum und Labor II*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Plasmaphysik*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben sowie Vortrag über ein ausgegebenes Thema<br>*Physik und Anwendungen der Hochspannungstechnik*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben sowie Vortrag über ein ausgegebenes Thema<br>*Plasmen hoher Energiedichte und Röntgenstrahlung im Universum und Labor*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben sowie Vortrag über ein ausgegebenes Thema<br>*Plasmen hoher Energiedichte und Röntgenstrahlung im Universum und Labor II*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben sowie Vortrag über ein ausgegebenes Thema |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise in der Lehrveranstaltung, zu der die lehrveranstaltungsbezogene Modulprüfung stattfinden soll |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen, Übungen |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | Die Modulprüfung zu diesem Modul erfolgt lehrveranstaltungsbezogen: In einer Lehrveranstaltung des Moduls nach Wahl der oder des Studierenden werden sowohl die konkreten Inhalte der jeweiligen Lehrveranstaltung als auch die übergeordneten Lernziele des Moduls abgeprüft. Alle anderen von der oder dem Studierenden in diesem Modul absolvierten Lehrveranstaltungen werden mit den oben aufgeführten Leistungsnachweisen abgeschlossen. |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Plasmaphysik (Plasma Physics) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | | X | | (X) |
| Physik und Anwendungen der Hochspannungstechnik (Physics and Applications of High Voltage Technology) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | | X | | (X) |
| Plasmen hoher Energiedichte und Röntgenstrahlung im Universum und Labor (High Energy Density Plasmas: X-rays in the Universe and Laboratory I) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | X | | (X) | |
| Plasmen hoher Energiedichte und Röntgenstrahlung im Universum und Labor II (High Energy Density Plasmas: X-rays in the Universe and Laboratory II) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | | X | | (X) |
| Summe | | 6–9 | 8–12 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VKTECM** | **Spezielle Themen der angewandten und technischen Physik für MSc-Studierende** | Wahlpflicht-modul | 6–12 CP (insg.) = 180–360 h | | 4–9 SWS |
| | (Special Topics in Applied and Technical Physics for MSc Students) | | Kontaktstudium 4–9 SWS / 60–135 h | Selbststudium 120–225 h | |

**Inhalte**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Grundlagen der computergestützten Signalverarbeitung*: Einführung Signal- und Systemtheorie, Signalverarbeitungsmethoden im Zeitbereich, Frequenzbereich und Zeitfrequenzbereich (z.B. Waveletanalyse), statistische Signalverarbeitung, Mustererkennung

*Complex Renewable Energy Networks*: Physics of renewable energy generation (including weather-dependent modeling); stochastic modeling; physics of general complex networks; system design; power transmission; storage; physics of coupled networks; the role of energy in society.

*Physik der Energiegewinnung*: Sozioökonomische Zusammenhänge hinsichtlich Energieverbrauch, Wirtschaftsleistung usw., historische Entwicklung des Energieverbrauchs, Energie als physikalische Größe, Energieerntefaktor, fossile Energieträger (Entstehung, Vorkommen, Abbau), Treibhauseffekt, Kreisprozesse und Wärmekraftmaschinen (Motoren, Turbinen), Kraft-Wärme-Kopplung, Regenerative Energieformen (Photovoltaik, Photothermik, Wind, Wasser, Biomasse, Geothermik), Kernspaltung (Grundlagen, Reaktortypen, Neutronenbilanz, Aufarbeitung), Transmutation, Fusion, Risikobegriff, Speicherung von Energie, Transport von Energie

*Energietechnik*: Stationäre/instationäre Systeme, Euler-Lagrange-Transformation, Primär- und Sekundärenergieträger, Bilanzräume, techn. und chemische Thermodynamik, technische Kreisprozesse, Wärmepumpen und Kältemaschinen, Tieftemperaturprozesse, Elektrolyse und Brennstoffzellen, Transportvorgänge, Extremalprinzipien, Überschallströmungen, Energiespeicher, Brennstoffe, Pi - Theorem und Ähnlichkeit, Optimierung technischer Systeme.

*Maschinenlern-Verfahren und ihre Anwendung in Mustererkennung, KI und Suchmaschinen-Technik*: Grundbegriffe der Informationstheorie und der Wahrscheinlichkeitstheorie, Bayes-Methoden und statistisches Schließen, Einführung in die grundlegenden Fragestellungen beim Maschinenlernen, Modellwahl, -anpassung und -validierung, lineare Klassifikationsmethoden, nicht-parametrische Techniken (k-nächste Nachbarn), naive Bayes-Klassifikation und Erweiterungen, Bayes-Netze, Entscheidungsbäume, Ensemble-Lerner (Bagging und Boosting), (randomisierte) Entscheidungswälder, Support-Vektor-Maschinen, neuronale Netze.

*Maschinenlern-Verfahren II und ihr Einsatz in KI und Robotik*: Reinforcement-Learning, logisches und (statistisches) relationales Lernen, Cluster-Verfahren, Dimensionsreduktion, Independent-Component-Analysis und blinde Signaltrennung; Flankierende Grundlagenthemen: Heuristische Optimierungs- und Suchverfahren, Bayes-Methoden und statistisches Schließen, (algorithmische) Informationstheorie, Ähnlichkeitsmetriken

*Musterklassifikation und Signalschätzung*: Musterklassifikation mit Support-Vector-Machines, Musterklassifikation basierend auf Topologischen Merkmalskarten, mehrschichtigen Perzeptrons und Radial-Basis-Funktionen; Theoretische Grundlagen statistischer Musterklassifikation, Klassifikation dynamischer Muster mit Hidden-Markov-Modellen.

*Sprachakustik und Sprachsignalverarbeitung*: Akustische und artikulatorische Grundlagen der Sprachproduktion; phonetische Konzepte; Modellbeschreibungen der Spracherzeugung; Anwendungen der Sprachverarbeitung: Sprachsynthese, Spracherkennung, Sprachkodierung und Störgeräuschsunterdrückung; anwendungsbezogene Konzepte und Verfahren der Systemtheorie und statistischen Signalverarbeitung: Wellendigitalfilter, Lineare Prädiktion, MFCCs, DTW, Hidden Markov Modelle, Dynamische Programmierung, Unit Selection usw.; praxisrelevante Herausforderungen der Sprachtechnologien.

*Introduction to Machine and Deep Learning and applications in physics and beyond*: The theoretical part of the lecture includes an introduction to the basics of statistics, Bayes-Theorem and discrete as well as continuous probability distributions. From this, the mathematical foundations of (supervised) Machine-Learning algorithms like: Linear Models, Support Vector Machines, Decision trees, Ensemble Methods, The Perceptron and Artificial Neural Networks will be derived. The concept of statistical learning will be introduced. A particular emphasis will be here on the gradient descent and its relation to Newton's method. The theoretical basics of Deep learning and different neural net architectures (Deep fully connected Neural Networks, Convoluted Neural Networks, Recurrent Neural Networks) will be introduced and it will be shown how the relevant equations for the forward and (error) back-propagation within these networks can be derived. An applied lecture part is dedicated to:

- The numerical Implementation and programming of the discussed machine-learning methods with PYTHON and especially Tensor Flow.
- The application of codes to example problems.

Statistik, Wahrscheinlichkeitsverteilungen, Datenverarbeitung, Einführung in PYTHON, Lineare Modelle für Klassifikation und Regression, Entscheidungsbäume, Ensemble Methoden, Support-Vector-Machines, Überfitten, der Fluch der hohen Dimensionalität, Logistische Regression, Künstliche Neuronale Netzte, Tiefe Neuronale Netze, *Convolutional* Neuronale Netze, *Recurrent* Neuronale Netzte, Autoencoder, GANs

Die Studierenden müssen mindestens zwei und können maximal drei Lehrveranstaltungen absolvieren. Dabei kann frei aus den verfügbaren Lehrveranstaltungen ausgewählt werden.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Dieses Modul bereitet die Studierenden auf eine Abschlussarbeit im Bereich angewandte und technische Physik vor. Nach Absolvieren des Moduls sind die Studierenden in dem von ihnen gewählten Vertiefungsbereich in der Lage, sich selbstständig in die aktuelle Forschung einzuarbeiten bzw. direkt zu ihr beizutragen:

- Die Studierenden kennen alle wesentlichen Konzepte und Fachbegriffe und verstehen deren inhaltliche Zusammenhänge.
- Die Studierenden können forschungsnahe Problemstellungen thematisch einordnen und mit den vermittelten Methoden analysieren.
- Die Studierenden können weiterführende Informationen zu einer gegebenen Fragestellung in Fachliteratur und Internet recherchieren.
- Die Studierenden können aktuelle wissenschaftliche Publikationen verstehen und wiedergeben.
- Die Studierenden besitzen das experimentelle oder theoretische Rüstzeug, um eine gegebene wissenschaftliche Fragestellung selbst quantitativ zu untersuchen und zu beantworten.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Grundlagen der computergestützten Signalverarbeitung*: keine

*Complex Renewable Energy Networks*: Basic mathematics; courses on Fluid Dynamics and Networks are not required, but useful.

*Physik der Energiegewinnung*: Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–4*, *Anfängerpraktikum 1–2*

*Energietechnik*: Inhalt der Module VEX1, VEX2, VEX3, VEX4A/B, VTH1, VTH2, VTH3

*Maschinenlern-Verfahren und ihre Anwendung in Mustererkennung, KI und Suchmaschinen-Technik*: Differential- und Integralrechnung, Grundkenntnisse der Wahrscheinlichkeitsrechung/Statistik

*Maschinenlern-Verfahren II und ihr Einsatz in KI und Robotik*: Differential- und Integralrechnung, Matrizen- und Vektorrechnung, Grundkenntnisse der Wahrscheinlichkeitsrechung/Statistik (d.h. Standard-Mathematik-Vorlesung BSc Physik)

*Musterklassifikation und Signalschätzung*: Inhalt der Veranstaltungen *Mathematik für Studierende der Physik 1 - 3*

*Sprachakustik und Sprachsignalverarbeitung*: Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–2*, *Theoretische Physik 1–2*

*Introduction to Machine and Deep Learning and applications in physics and beyond*: Basic knowledge on differential calculus, statistics and programming (Grundkenntnisse in Statistik, Differentialrechnung und Programmieren)

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Podlech |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Grundlagen der computergestützten Signalverarbeitung*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Complex Renewable Energy Networks*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Physik der Energiegewinnung*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Energietechnik*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Maschinenlern-Verfahren und ihre Anwendung in Mustererkennung, KI und Suchmaschinen-Technik*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Maschinenlern-Verfahren II und ihr Einsatz in KI und Robotik*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Musterklassifikation und Signalschätzung*: keine<br>*Sprachakustik und Sprachsignalverarbeitung*: keine<br>*Introduction to Machine and Deep Learning and applications in physics and beyond*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Grundlagen der computergestützten Signalverarbeitung*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben<br>*Complex Renewable Energy Networks*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben<br>*Physik der Energiegewinnung*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben<br>*Energietechnik*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |

| | |
|---|---|
| | *Maschinenlern-Verfahren und ihre Anwendung in Mustererkennung, KI und Suchmaschinen-Technik*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben<br>*Maschinenlern-Verfahren II und ihr Einsatz in KI und Robotik*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben<br>*Musterklassifikation und Signalschätzung*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Sprachakustik und Sprachsignalverarbeitung*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Introduction to Machine and Deep Learning and applications in physics and beyond*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise in der Lehrveranstaltung, zu der die lehrveranstaltungsbezogene Modulprüfung stattfinden soll |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen, Übungen |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | Die Modulprüfung zu diesem Modul erfolgt lehrveranstaltungsbezogen: In einer Lehrveranstaltung des Moduls nach Wahl der oder des Studierenden werden sowohl die konkreten Inhalte der jeweiligen Lehrveranstaltung als auch die übergeordneten Lernziele des Moduls abgeprüft. Alle anderen von der oder dem Studierenden in diesem Modul absolvierten Lehrveranstaltungen werden mit den oben aufgeführten Leistungsnachweisen abgeschlossen. |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Grundlagen der computergestützten Signalverarbeitung (Basics of computer-aided signal processing) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | | X | | (X) |
| Complex Renewable Energy Networks | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | X | X | (X) | (X) |
| Physik der Energiegewinnung (Physics of Energy Production) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | X | | (X) | |
| Energietechnik (Physics of Energy Management) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | | X | | (X) |
| Maschinenlern-Verfahren und ihre Anwendung in Mustererkennung, KI und Suchmaschinen-Technik (Machine Learning and its Applications to Pattern Recognition, Artificial Intelligence and Search Engines) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | X | | (X) | |
| Maschinenlern-Verfahren II und ihr Einsatz in KI und Robotik (Machine Learning II and its Application to Artificial Intelligence and Robotics) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | X | | (X) | |
| Musterklassifikation und Signalschätzung (Pattern classification and signal estimation) | V | 2 | 3 | WP | | X | | (X) |
| Sprachakustik und Sprachsignalverarbeitung (Speech acoustics and speech signal processing) | V | 2 | 3 | WP | | X | | (X) |
| Introduction to Machine and Deep Learning and applications in physics and beyond (Einführung in Maschinelles Lernen und “Deep-learning” mit Anwendungen in der Physik und Technik) | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | | X | | (X) |
| Summe | | 4–9 | 6–12 | | | | | |

## 3.7 Biophysik

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VEBP** | **Einführung in die Biophysik**<br>(Introduction to Biophysics) | Wahlpflicht-modul | 5 CP (insg.) = 150 h | | 4 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 90 h | |

**Inhalte**

Struktur, Dynamik und Funktion von Proteinen und Nukleinsäuren, z.B. im Hinblick auf Molekulare Motoren, Informationsübertragung, Energiewandlung, Sensorik; Eigenschaften biologischer Membranen; Erregungsleitung; Reaktionsmechanismen; experimentelle Methoden zur Untersuchung von Struktur und Funktion biologischer Makromoleküle; theoretische Methoden zu ihrer Beschreibung.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Studierenden erlangen Kenntnisse von Struktur und Aufbau biologischer Makromoleküle und Membranen (z.B. im Hinblick auf Molekulare Motoren, Informationsübertragung, Energiewandlung, Sensorik), von Grundlagen der Dynamik dieser Systeme, Grundlagen der Funktionen von Proteinen, Grundlagen der Reaktionskinetik, Grundlagen der Bioenergetik, von spektroskopischen Techniken, bildgebenden Techniken und Beugungstechniken zur Untersuchung von Struktur und Dynamik biologischer Makromoleküle. Die Studierenden können biophysikalische Zusammenhänge verstehen, diskutieren und Modelle zur Lösung von biophysikalischen Problemen einsetzen.
Das Modul führt die Studierenden in die Biophysik ein und kann auf die Bachelorarbeit oder Masterarbeit vorbereiten.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Chemie Grundkenntnisse

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Bredenbeck |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Einführung in die Biophysik (Introduction to Biophysics) | V+Ü | 2.5+1.5 | 5 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 4 | 5 | | | | | |

| **BPH3N** | **Biophysik 3: Methoden**<br><br>(Biophysics 3: Methods) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

Mikroskopie: optische Mikroskopie, hochauflösende Mikroskopie, Elektronenmikroskopie; Einzelmolekültechniken: Fluoreszenzmethoden, Rastersondenmethoden, Patch-Clamp-Techniken, Optical Tweezer; Spektroskopie: UV/Vis-Spektroskopie, IR-Spektroskopie, NMR-Spektroskopie, EPR-Spektroskopie; Beugungsmethoden: Röntgenbeugung, Röntgenkristallstrukturanalyse, Elektronenbeugung, Neutronenbeugung, Röntgenkleinwinkelstreuung, statische und dynamische Lichtstreuung; Simulationsverfahren: Moleküldynamische Verfahren, quantenchemische Verfahren; Weitere: Massenspektroskopie, analytische Ultrazentrifugation

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Studierenden haben ein vertieftes Verständnis der biophysikalischen Methoden, insbesondere ihrer Funktionsprinzipien, Anwendungsbereiche und Limitationen. Sie sind in der Lage, für konkrete Fragestellungen ein sinnvolles Vorgehen zur Bearbeitung zu wählen und die die richtigen Methoden zu wählen. In Übungen wird der Stoff selbstständig vertieft.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt des Moduls VEX3; der Inhalt der Module BPH1N und BPH2N ist hilfreich, aber nicht notwendig

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Biophysik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Biophysik, BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Frangakis |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | Bearbeitung der Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Biophysik 3 (Biophysics 3: Methods) | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **ELMIK** | **Elektronenmikroskopie mit Bildverarbeitung**<br>(Electron Microscopy with Image Processing) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 6 SWS |
| | | | Kontaktstudium 6 SWS / 90 h | Selbststudium 90 h | |

**Inhalte**

*Elektronenmikroskopie mit Bildverarbeitung*: Elektronenmikroskopie, Kryo-Elektronenmikroskopie, Einzelpartikelanalyse, Kryo-Elektronentomographie, Zelluläre Kryo-Elektronentomographie, Korrelative Licht- und Elektronenmikroskopie, Bildgebende Verfahren, Methoden der Bildrekonstruktion, Methoden zur Vermeidung des Hintergrundrauschens, Methoden der Bildmanipulation, Fourier Transformation, Programmieren mit MATLAB, Programmieren mit C/C++
In der Übung wenden die Studierenden ihre theoretischen Kenntnisse an und erlernen moderne Programmiersprachen (z.B. MATLAB, C/C++) und moderne Software-Entwicklung. Es werden Hausaufgaben gestellt, die in der nächsten Stunde besprochen werden.

*Einführung in die biologische Elektronenmikroskopie mit Bildverarbeitung*: In der Blockveranstaltung werden nach jeweils 2-stündiger Einführungsvorlesung praktische Aspekte der biologischen Elektronenmikroskopie und Bildverarbeitung direkt an den Forschungsgeräten in Kleingruppen bearbeitet.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

In der Vorlesung *Elektronenmikroskopie mit Bildverarbeitung* lernen die Studierenden die theoretischen Grundlagen der biologischen Elektronenmikroskopie (insbesondere der Einzelpartikel Kryo-Elektronenmikroskopie und der zellulären Elektronentomographie). Begleitend werden die grundlegenden Algorithmen der Bildverarbeitung eingeführt und die Studierenden können anhand dieser Grundlagen selbst neue und fortgeschrittene Algorithmen entwerfen. Es werden die mathematischen Grundlagen und Anwendungen diskutiert. Ziel der Vorlesung ist es, fundiertes Hintergrundwissen der Elektronenmikroskopie zu vermitteln, wodurch die Studierenden ihre zukünftigen Elektronenmikroskopie-Projekte erfolgreich verfolgen können.
In den zugehörigen Übungen können die Studierenden ihre theoretischen Kenntnisse anwenden. Sie werden mit (a) allgemeinen Methoden der Prozessierung elektronenmikroskopischer Daten und (b) der Bildverarbeitung in MATLAB vertraut gemacht. In den Hausaufgaben vertiefen die Studierenden ihre Kenntnisse und präsentieren ihre Ergebnisse in der nächsten Stunde.
Der Vorlesungsteil des Praktikums vermittelt die Grundlagen der Transmissions- und Rasterelektronenmikroskopie (TEM und SEM) und gibt eine Übersicht über Probenvorbereitungstechniken. Weiterhin werden Bildverarbeitungstechniken vorgestellt, die in der strukturbiologischen Elektronenmikroskopie angewendet werden. Im praktischen Teil wird in Kleingruppen (3–4 Studierende) gearbeitet. Die Studierenden werden Negativfärbung und Kryo-Fixationsmethoden anwenden, die Ultramikrotomie mit Diamantmessern ausführen und praktische Erfahrungen an TEMs sammeln.
In the lecture *Electron Microscopy with Image Processing* the students learn the theoretical basics of biological electron microscopy (in particular of single-particle cryo-electron microscopy and cellular electron tomography). Accompanying, the basic algorithms of image processing are introduced and students can use these basics to design new and advanced algorithms themselves. The mathematical basics and applications are discussed. The aim of the lecture is to provide a sound background in electron microscopy, enabling students to successfully pursue their future electron microscopy projects.
In the accompanying exercises students can apply their theoretical knowledge. They will be familiarized with (a) general methods of processing electron microscopic data and (b) image processing in MATLAB. In the homework, the students deepen their knowledge and present their results in the next lesson.
The lecture part of the practical course teaches the basics of transmission and scanning electron microscopy (TEM and SEM) and gives an overview of sample preparation techniques. Furthermore, image processing techniques used in structural biology electron microscopy are presented. In the practical part we work in small groups (3–4 students). Students will apply negative staining and cryofixation techniques, perform ultramicrotomy with diamond knives, and gain hands-on experience at TEMs.

| **Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls** | |
|---|---|
| keine | |
| **Empfohlene Vorkenntnisse** | |
| Grundlagen der Optik (z.B. Lichtmikroskopie), Mathematische Grundlagen (z.B. Fourier-Transformation) | |
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Biophysik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Biophysik, MSc Physik, MSc Biochemie, BSc Informatik, MSc Informatik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Frangakis |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | *Elektronenmikroskopie mit Bildverarbeitung*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Einführung in die biologische Elektronenmikroskopie mit Bildverarbeitung*: regelmäßige Teilnahme am Praktikum |
| **Leistungsnachweise** | *Elektronenmikroskopie mit Bildverarbeitung*: kommentierte Hausaufgabe<br>*Einführung in die biologische Elektronenmikroskopie mit Bildverarbeitung*: Präsentation eines Forschungsartikels als Nachfolgetermin zum *Praktikum* |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung, Praktikum |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Englisch oder Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) zur *Vorlesung* |
| **Organisatorische Hinweise** | |
| Diese Veranstaltungen finden auf Englisch statt. Wenn sie nur von deutschsprachigen Studierenden besucht werden, können sie auch auf Deutsch gehalten werden.<br>Das Praktikum Einführung in die biologische Elektronenmikroskopie mit Bildverarbeitung findet als Blockveranstaltung in der vorlesungsfreien Zeit statt und wird jedes Semester angeboten. | |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Elektronenmikroskopie mit Bildverarbeitung (Electron Microscopy with Image Processing) | V+Ü | 4 | 4 | Pf | X | | (X) | |
| Einführung in die biologische Elektronenmikroskopie mit Bildverarbeitung (Introduction to Biological Electron Microscopy with Image Processing) (Blockveranstaltung: 3 Tage V2+P6 + 1 Tag S6) | P | 2 | 2 | Pf | X | X | (X) | (X) |
| Summe | | 6 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VKBPHM** | **Spezielle Themen der Biophysik für MSc-Studierende**<br>(Special Topics in Biophysics for MSc Students) | Wahlpflicht-modul | 6–9 CP (insg.) = 180–270 h | | 4–6 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4–6 SWS / 60–90 h | Selbststudium 120–180 h | |

**Inhalte**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*(Bio-)molekulare Dynamik — Messmethoden und Anwendungen von Femtosekunden bis Sekunden*: Experimentelle Methoden werden vorgestellt aus den Bereichen: Ultrakurzzeitspektroskopie; nichtlineare Laserspektroskopie; Einzelmolekülspektroskopie; Einzelmolekülmikroskopie; Kraftmikroskopie; Optische Pinzetten; zeitaufgelöste NMR-Spektroskopie; Massenspektrometrie; zeitaufgelöste Röntgenbeugung, Kristallographie und Elektronenbeugung. Der Informationsgehalt der verschiedenen Experimente wird anhand wichtiger Beispiele erläutert. Diese umfassen unter anderem: Protonentransfer; Bruch und Bildung chemischer Bindungen; Katalysatoren; Bildung transienter Strukturen in Flüssigkeiten; Energietransfer in Molekülen; Proteinfaltung; Enzymfunktion; Photorezeptoren; Molekulare Motoren; Photosynthese.

*Biochemische Methoden in der Biophysik*: Die vorgestellten Techniken beinhalten: Methoden der Molekularbiologie (Identifikation und Isolierung von Genen, Sequenzierung, Synthese, Klonierung, Mutagenese, Expression von rekombinanten Genen); Proteinchemische Methoden (lösliche Expression, Rückfaltung von denaturierten Proteinen, Besonderheiten bei Membranproteinen, chromatographische Trennverfahren, Pufferaustausch und Konzentrieren, Immobilisieren, Kristallisieren); Analytische Methoden (Konzentrations- und Reinheitsbestimmung, Elektrophorese, Bestimmung von Bindungskonstanten und Aktivitäten); Markierungstechniken (*Tags*, chemische Label, Isotopenlabel, künstliche Aminosäuren); biochemisch relevante Datenbanken und Software

*Strahlen- und Umweltbiophysik*: Grundlagen der Wechselwirkung ionisierender und nichtionisierender Strahlung mit Materie; Grundbegriffe von Dosis, Dosimetrie; gesetzliche Grundlagen des Strahlenschutzes; Anwendungen von Teilchenstrahlung und elektromagnetischer Strahlung in der Medizin; natürliche und künstliche Radioaktivität; nicht-ionisierende Strahlung. Übungen sind in die Vorlesung integriert.

Die Studierenden müssen mindestens zwei und können maximal drei Lehrveranstaltungen absolvieren. Dabei kann frei aus den verfügbaren Lehrveranstaltungen ausgewählt werden.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Das Modul vermittelt vertiefende Kenntnisse aus Themengebieten der Biophysik und kann als Vorbereitung auf eine biophysikalische Abschlussarbeit dienen. Nach Absolvieren des Moduls sind die Studierenden in dem von ihnen gewählten Vertiefungsbereich in der Lage, sich selbstständig in die aktuelle Forschung einzuarbeiten bzw. direkt zu ihr beizutragen.
Die Studierenden kennen Präparations- und Untersuchungsmethoden für biomolekulare Systeme und können geeignete Verfahren für eine gegebene Fragestellung auswählen, insbesondere für die Untersuchung von dynamischen Eigenschaften.
Sie können den theoretischen Hintergrund für die experimentellen Untersuchungsmethoden erläutern und Vor- und Nachteile einer Methode im Vergleich mit möglichen Alternativen abwägen.
Darüberhinaus können die Studierenden Mechanismen der biologischen Strahlenwirkung erläutern und die Auswirkung von elektromagnetischer und Teilchenstrahlung quantifizieren. Sie kennen deren medizinische Anwendungsmöglichkeiten und die Grundlagen der Dosimetrie und des gesetzlichen Strahlenschutzes.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*(Bio-)molekulare Dynamik — Messmethoden und Anwendungen von Femtosekunden bis Sekunden*: keine

| | |
|---|---|
| *Biochemische Methoden in der Biophysik*: Grundbegriffe der allg. und anorganischen Chemie (Begriffe: Stoffmenge, Konzentration, Reaktionsgeschwindigkeit und -gleichgewicht, pH-Wert; Funktionsweise von Puffern), Struktur von Nukleinsäuren und Proteinen, Grundlagen der elektronischen Spektroskopie (Absorptionskoeffizient, Lambert-Beer'sches Gesetz, Fluoreszenz) Grundkenntnisse der Biochemie (Stoffwechsel von Pro- und Eukaryoten) und der organischen Chemie (grundlegende Reaktionstypen) sind wünschenswert<br>*Strahlen- und Umweltbiophysik*: Grundlagen des Atommodells und des Aufbaus der Atomkerne, beispielsweise aus der Vorlesung Experimentalvorlesung 3 (Atome und Quanten) | |
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Bredenbeck |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*(Bio-)molekulare Dynamik — Messmethoden und Anwendungen von Femtosekunden bis Sekunden*: keine<br>*Biochemische Methoden in der Biophysik*: keine<br>*Strahlen- und Umweltbiophysik*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*(Bio-)molekulare Dynamik — Messmethoden und Anwendungen von Femtosekunden bis Sekunden*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Biochemische Methoden in der Biophysik*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Strahlen- und Umweltbiophysik*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise in der Lehrveranstaltung, zu der die lehrveranstaltungsbezogene Modulprüfung stattfinden soll |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | Die Modulprüfung zu diesem Modul erfolgt lehrveranstaltungsbezogen: In einer Lehrveranstaltung des Moduls nach Wahl der oder des Studierenden werden sowohl die konkreten Inhalte der jeweiligen Lehrveranstaltung als auch die übergeordneten Lernziele des Moduls abgeprüft. Alle anderen von der oder dem Studierenden in diesem Modul absolvierten Lehrveranstaltungen werden mit den oben aufgeführten Leistungsnachweisen abgeschlossen. |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| (Bio-)molekulare Dynamik — Messmethoden und Anwendungen von Femtosekunden bis Sekunden ((Bio-)molecular Dynamics — Measuring Methods and Applications from Femtoseconds to Seconds) | V | 2 | 3 | WP | | X | | (X) |
| Biochemische Methoden in der Biophysik (Biochemical Methods in Biophysics) | V | 2 | 3 | WP | | X | | (X) |
| Strahlen- und Umweltbiophysik (Radiation and Environmental Biophysics) | V+Ü | 1.5+0.5 | 3 | WP | | X | | (X) |
| Summe | | 4–6 | 6–9 | | | | | |

## 3.8 Neurowissenschaften

<table>
<tr><td rowspan="2">VTHNEU</td><td rowspan="2">Theoretical Neuroscience</td><td rowspan="2">Wahlpflicht-modul</td><td colspan="2">6–9 CP (insg.) = 180–270 h</td><td rowspan="2">4–6 SWS</td></tr>
<tr><td>Kontaktstudium 4–6 SWS / 60–90 h</td><td>Selbststudium 120–180 h</td></tr>
<tr><td colspan="6">Inhalte<br><br>Theoretical Neuroscience: basic models of neurons and neural networks, network dynamics, introduction to neural coding and decoding, synaptic plasticity and Hebbian learning, associative memory<br><br>Brain Dynamics: From Neuron to Cortex: Brain dynamics is described at the level of single neurons, microcircuits, and global cortical dynamics. Beginning from the discussion of harmonic oscillators, we introduce the basic knowledge needed to describe spiking dynamics of neurons. This is then used to classify neurons according to different spiking behaviors. We then describe universal architectural aspects of microcircuits that connect the single neurons into functional substructures. Finally, we describe generation, stability, and possible functionality of cortical oscillations. The latter are observed in the context of cognitive processing.</td></tr>
<tr><td colspan="6">Lernergebnisse/Kompetenzziele<br><br>Das Modul vermittelt die grundlegenden Konzepte des Vertiefungsfachs Neuroscience. Es erlaubt insbesondere auch Studierenden ohne umfangreiche Vorkenntnisse den Einstieg in das Vertiefungsfach. Es führt dabei insbesondere in Methoden zur Modellierung von Neuronen und neuronalen Netzen und deren kollektiver Dynamik ein. Das Modul gibt gleichzeitig einen Überblick über das breite Angebot an Wahlpflichtveranstaltungen im Bereich Neuroscience, um den Studierenden die weitere Orientierung im Vertiefungsfach zu erleichtern. Nach Absolvieren des Moduls sind die Studierenden in der Lage, einfache Modelle von Nervenzellen und Netzwerken mit mathematischen und computergestützten Methoden zu analysieren:<br><br>• Die Studierenden kennen grundlegende Konzepte und Fachbegriffe und verstehen deren inhaltliche Zusammenhänge.<br><br>• Die Studierenden können Problemstellungen thematisch einordnen und mit den vermittelten Methoden analysieren.<br><br>• Die Studierenden können weiterführende Informationen zu einer gegebenen Fragestellung in Fachliteratur und Internet recherchieren.</td></tr>
<tr><td colspan="6">Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls<br><br>keine</td></tr>
<tr><td colspan="6">Empfohlene Vorkenntnisse<br><br>Theoretical Neuroscience: Inhalt der mathematischen Grundvorlesungen, elementare Kenntnisse von Matlab<br><br>Brain Dynamics: From Neuron to Cortex: Die Teilnehmer sollten ein grundsätzliches Verständnis für Differentialgleichungen haben auf dem Niveau, das etwa in den grundlegenden Vorlesungen der Theoretischen Physik (insb. Mechanik) vermittelt wird.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)</td><td colspan="3">BSc Physik, MSc Physik / FB Physik</td></tr>
<tr><td colspan="3">Verwendbarkeit</td><td colspan="3">BSc Physik, MSc Physik</td></tr>
<tr><td colspan="3">Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">jährlich</td></tr>
</table>

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Dauer** | einsemestrig | | | | | | | |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Triesch | | | | | | | |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | | | | | | | | |
| **Teilnahmenachweise** | *Theoretical Neuroscience*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Brain Dynamics: From Neuron to Cortex*: keine | | | | | | | |
| **Leistungsnachweise** | *Theoretical Neuroscience*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben<br>*Brain Dynamics: From Neuron to Cortex*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test | | | | | | | |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise zur Lehrveranstaltung *Theoretical Neuroscience* | | | | | | | |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen, Übung | | | | | | | |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Englisch | | | | | | | |
| **Modulprüfung** | | | | | | | | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | | | | | | | | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) zum Inhalt der Lehrveranstaltung *Theoretical Neuroscience* | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Theoretical Neuroscience | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | X | | (X) | |
| Brain Dynamics: From Neuron to Cortex | V | 2 | 3 | WP | X | | (X) | |
| Summe | | 4–6 | 6–9 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VTHNEU2** | **Advanced Theoretical Neuroscience** | Wahlpflicht-modul | 6–9 CP (insg.) = 180–270 h | | 4–6 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4–6 SWS / 60–90 h | Selbststudium 120–180 h | |

**Inhalte**

*Theoretical Neuroscience 2*: advanced models of neurons and neural networks, network dynamics, information theory and coding, neuronal and synaptic plasticity, self-organization in neural networks, theories of learning, analysis of neural data

*Visual System – Neural Structure, Dynamics, and Function*: Electromagnetic spectrum and light as visual stimulus; structure of eye, retina, and optic nerve; the thalamus as relay station to cortex and recurrent modulator; primary and secondary visual cortex; hypercolumns as modules of information processing; microcircuits; what- and where-paths; feedback connections; maps of cortical visual areas in monkey and human; representations of color, form, motion, and location; analysis of semantic categories; attention; psychological theories; capacity of working memory; visual search, illusory conjunctions, and binding problem; distractor interference phenomena; priming; attentional gating of information flow; oscillations and synchrony.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Das Modul vermittelt fortgeschrittene Konzepte des Vertiefungsfachs Neuroscience. Dabei werden fortgeschrittene Methoden zur Beschreibung von Nervenzellen und Netzwerken und zur Analyse biologischer Daten vermittelt. Das Modul führt die Studierenden an die aktuelle Forschung heran und bereitet sie auf das selbstständige wissenschaftliche Arbeiten in diesem Bereich vor. Nach Absolvieren des Moduls sind die Studierenden in der Lage, fortgeschrittene Modelle von Nervenzellen und Netzwerken mit mathematischen und computergestützten Methoden zu analysieren:

- Die Studierenden kennen grundlegende und weiterführende Konzepte und Fachbegriffe und verstehen deren inhaltliche Zusammenhänge.
- Die Studierenden können Problemstellungen thematisch einordnen und mit den vermittelten Methoden analysieren.
- Die Studierenden können weiterführende Informationen zu einer gegebenen Fragestellung in Fachliteratur und Internet recherchieren.
- Die Studierenden können aktuelle wissenschaftliche Publikationen verstehen und wiedergeben.
- Die Studierenden besitzen das theoretische und praktische Rüstzeug, um ein gegebenes Problem selbstständig zu untersuchen und durch Anwendung geeigneter Methoden zu lösen.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

*Theoretical Neuroscience 2*: Inhalt der mathematischen Grundvorlesungen, elementare Kenntnisse von Matlab und/oder Python, Inhalt der Lehrveranstaltung *Theoretical Neuroscience*.

*Visual System – Neural Structure, Dynamics, and Function*: Einführende Vorlesungen in die Mathematik und Physik

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |

| | |
|---|---|
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Triesch |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | *Theoretical Neuroscience 2*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Visual System – Neural Structure, Dynamics, and Function*: keine |
| **Leistungsnachweise** | *Theoretical Neuroscience 2*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben<br>*Visual System – Neural Structure, Dynamics, and Function*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise zur Lehrveranstaltung *Theoretical Neuroscience2* |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) zum Inhalt der Lehrveranstaltung *Theoretical Neuroscience2* |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Theoretical Neuroscience 2 | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | | X | | (X) |
| Visual System – Neural Structure, Dynamics, and Function | V | 2 | 3 | WP | | X | | (X) |
| Summe | | 4–6 | 6–9 | | | | | |

# 4 Wahlpflichtmodule des Masterstudiengangs: II) Zweijährlich oder unregelmäßig angebotene Module

## 4.1 Fachgebietsübergreifende Module

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VHSTATP** | **Höhere Statistische Physik: Vielteilchensysteme im Nicht-Gleichgewicht** | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
| | (Advanced Statistical Physics: Many-body systems out of equilibrium) | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

| | |
|---|---|
| **Inhalte** | |
| Langevin-Gleichungen, Fokker-Planck Gleichungen, Master Gleichungen, Kinetik klassischer Gase, Boltzmann-Gleichung, Navier-Stokes Gleichung, Keldysh-Formalismus, Funktionalintegral- Formulierung der Nicht-Gleichgewichts-Vielteilchentheorie, Quantenkinetische Gleichungen. | |
| **Lernergebnisse/Kompetenzziele** | |
| Die Studierenden sind mit dem Übergang von der theoretischen Beschreibung von thermodynamischen Gleichgewichtssystemen zu solchen außerhalb des Gleichgewichts vertraut. Sie sind damit in der Lage, physikalische Nichtgleichgewichtssituationen zu kategorisieren, den entsprechenden Gleichungssystemen zuzuordnen und diese zu lösen. | |
| **Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls** | |
| keine | |
| **Empfohlene Vorkenntnisse** | |
| Inhalt der Veranstaltungen *Theoretische Physik 1–5* | |
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Kopietz |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Höhere Statistische Physik: Vielteilchensysteme im Nicht-Gleichgewicht (Advanced Statistical Physics: Many-body systems out of equilibrium) | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | X | X | (X) | (X) |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| **VNUMP** | **Numerische Methoden der Physik** (Numerical Methods in Physics) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 5 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 5 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

Darstellung von Zahlen, Rundungsfehler; Gewöhnliche Differentialgleichungen, Anfangswertprobleme; Einheitenbehaftete/dimensionslose Größen; Nullstellensuche, lösen nicht-linearer Gleichungen; Gewöhnliche Differentialgleichungen, Randwertprobleme; Lösen linearer Gleichungssysteme; Numerische Integration; Eigenwertprobleme; Verwendung numerischer Bibliotheken; Interpolation, Extrapolation, Approximation; Funktionsminimierung, Optimierung; Monte Carlo-Simulation statistischer Zustandssummen.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Das Modul vermittelt auf einer praktischen Ebene die wichtigsten numerischen Verfahren, die in physikalischen Rechnungen eingesetzt werden. Die Studierenden erlangen die Kompetenz, selbst Methoden zu implementieren und aus Programmbibliotheken kritisch die für ein Problem geeigneten Verfahren auszuwählen.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Mathematische Kenntnisse etwa aus den Modulen VTH1–VTH4; Programmierkentnisse in einer numerischen Sprache, etwa Fortran, Java, C, C++

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik, BSc Biophysik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Wagner |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Numerische Methoden der Physik (Numerical Methods in Physics) | V+Ü | 3+2 | 6 | Pf | X | X | | |
| Summe | | 5 | 6 | | | | | |

| **VCPSM** | **Computational Physics and Simulations in Matlab** | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 6 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 6 SWS / 90 h | Selbststudium 90 h | |

**Inhalte**

Programmieren und Visualisieren in Matlab, numerische Simulationen physikalischer Fragestellungen: Ableitung und Integration, Optimierung and Minimierung, gewöhnliche Differentialgleichungen, chaotische Dynamik, Fraktale, Zufallsbewegungen, Eigenwertprobleme, Matrixzerlegungen, partielle Differentialgleichungen, Perkolation, Monte-Carlo-Methoden, neuronale Netze.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Im Rahmen des Tutoriums wird die Anwendung der vorgestellten Algorithmen auf konkrete physikalische Problemstellungen vermittelt. Dabei erlernen und verwenden die Studierenden die Programmierumgebung MATLAB, die auch bei geringen Vorkenntnissen effiziente Simulationen und Visualisierung ermöglicht.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Grundlagen der Analysis und der linearen Algebra, sowie der Inhalt der Veranstaltungen *Theoretische Physik 1–2*, insbesondere Newton- und Hamilton-Mechanik, Phasenraum, Wellengleichung.

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik (kann anstelle des Pflichtmoduls VPROG absolviert werden), MSc Physik, BSc Biophysik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Hofstetter |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Computational Physics and Simulations in Matlab | V+Ü | 3+3 | 6 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 6 | 6 | | | | | |

| **VCADS** | **Complex Adaptive Dynamical Systems** | Wahlpflicht-modul | 8 CP (insg.) = 240 h | | 6 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 6 SWS / 90 h | Selbststudium 150 h | |

**Inhalte**

*Foundations*: Graph Theory, Information Theory, Neural Networks, Bifurcation Theory, Game Theory, Branching Theory, Cognitive System Theory
*Models*: Small-World Network, Cellular Automata, Boolean Networks, Sandpile Model, Kuramoto Model, Quasispecies Model, Galton-Watson Process
*Phenomena*: Self-Organized Criticality, Determistic Chaos, Stochastic Resonance and Escape, Synchronization, Dynamical Phase Transitions, Error Catastrophy, Small-World Phenomenon

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Students are familiar with the basic concepts of modern dynamical systems theory, including the time-series analysis and game and branching theory. They can analyze and set up neural networks. They are aware of standard complexity models and can determine whether systems are chaotic and/or self-critical. After completion of this module students are well prepared for research in computational neuroscience, theoretical biology, ecology, epidemiology and network sciences in general.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Einführende Vorlesungen in die Mathematik

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | zweijährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Gros |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Complex Adaptive Dynamical Systems | V+Ü | 4+2 | 8 | Pf | X | X | (X) | (X) |
| Summe | | 6 | 8 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VSELFORG** | **Self-Organization: Theory and Simulations** | Wahlpflicht-modul | 8 CP (insg.) = 240 h | | 6 SWS |
| | | | Kontaktstudium 6 SWS / 90 h | Selbststudium 150 h | |

**Inhalte**

The course will be a combination of lectures on complex system theory with a focus on self-organization, together with a computer lab. The lectures will treat topics like pattern formation in reaction-diffusion systems, opinion dynamics, swarm intelligence, Darwinian evolution and cognitive system theory. An introduction to dynamical system theory will be given, including bifurcation theory, chaos and dissipative systems. In the computer lab an introduction to programming in general will be given and students are expected to write their own codes and to perform then a series of simulations for self-organizing systems.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

To comprehend the basics of the complex system theory and the principles leading to self-organizing processes in physics and nature. Both an analytic and mathematical understanding and the capability to perform numerical simulations and experiments testing the respective phenomena.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

The physics basic math knowledge

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik, MSc Biophysik, BSc Meteorologie, MSc Meteorologie |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Gros |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Self-Organization: Theory and Simulations | V+Ü | 4+2 | 8 | Pf | X | X | (X) | (X) |
| Summe | | 6 | 8 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VCPPML** | **Advanced Introduction to C++, Scientific Computing and Machine Learning** | Wahlpflicht-modul | 8 CP (insg.) = 240 h | | 6 SWS |
| | | | Kontaktstudium 6 SWS / 90 h | Selbststudium 150 h | |

**Inhalte**

Einführung in Linux und C++; Datentypen, Kontrollfluss, Exceptions, Pointers, Funktionen, Templates, Klassen, Konstruktoren, Destruktoren, Vererbung, String- und Filestreams, IO Manipulation, Containers, Assoziative Datenstrukturen. Zusätzlich werden die grundlegenden numerischen Methoden und Konzepte behandelt wie Summation, Rekursion, Stabilität, Auswertung von Integralen, Lösung von Differentialgleichungen, das Runge-Kutta Verfahren, Elimination, Gauss Verfahren, Monte Carlo- und Metropolis Verfahren. Weiterhin wird eine Einführung in die grundlegenden Konzepte des Maschinellen Lernens gegeben, wie überwachtes, nicht-überwachtes und verstärktes Lernen, Klassifikation, Regression, Klustering, Dimensionalitätsreduktion und Neuronale Netze.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Für den Physiker ist es wichtig, sich in jeder Progammier-Umwelt zurechtzufinden, sei es wissenschaftliches Rechnen, Web-Programmierung oder Maschinelles Lernen. Ziel der Vorlesung ist es, das hierfür notwendige Basiswissen zu vermitteln. Dafür soll das eigenständige Programmieren in C++ anhand von Übungen und von größeren numerischen Projekten erlernt werden. Mit den Grundlagen numerischer Methoden und vom Maschinellen Lernen soll die Fähigkeit erworben werden, moderne Programmpakete nicht nur zu benutzen, sondern auch zu verstehen nach welchen Prinzipien diese arbeiten.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

keine

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik (kann anstelle des Pflichtmoduls VPROG absolviert werden), MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Gros |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben; erfolgreicher Abschluss von Programmierprojekten |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Advanced Introduction to C++, Scientific Computing and Machine Learning | V+Ü | 4+2 | 8 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 6 | 8 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VKOED** | **Kovariante Elektrodynamik und spezielle Relativitätstheorie**<br>(Covariant Electrodynamics and Special Theory of Relativity) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

Abriss der speziellen Relativitätstheorie und der relativistischen Mechanik; relativistische Elektrodynamik: Einführung des Feldstärketensors, kovariante Maxwell-Gleichungen, Lagrange-Formalismus für Teilchen und Felder, Energie-Impuls-Tensor; kovariante Formulierung des elektromagnetischen Strahlungsfeldes; Weizsäcker-Williams-Methode und Photonenspektrum

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Studierenden kennen alle wesentlichen Konzepte der Elektrodynamik in einer kovarianten, relativistischen Beschreibung. Nach der erfolgreichen Belegung des Kurses wissen die Studierenden, dass sich die Maxwell-Gleichungen zwangslos aus einer einfachen relativistischen klassischen Feldtheorie ergeben. Die relativistischen Transformationen der Systemgrößen betrachtet aus verschiedenen Bezugssytemen sind den Studierenden dann offensichtlich. Auf der Basis der vielen Beispiele aus der Vorlesung und den Aufgaben der Übungen ist den Studierenden der Umgang mit dem relativistische Potential zur Berechnung des Feldstärke-Tensors und des Energie-Impulstensors für verschiedenste Fragestellungen der Elektodynamik nun völlig vertraut. Die Studierenden können jetzt auch elektromagnetische Strahlungsphänomene mittels der kovarianten Darstellung der Lienard-Wiechert Potentiale vollständig relativistisch beschreiben. Die Studierenden sind am Schluss in der Lage, sich selbständig in die einschlägige fortführende Literatur einzuarbeiten. Die erfolgreiche Belegung der Vorlesung bereitet die Studierenden insbesondere auf die Konzepte der Allgemeinen Relativitätstheorie und von relativistischen Quanten-Feldtheorien vor.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltung *Theoretische Physik 3: Elektrodynamik*, Grundkenntnisse der speziellen Relativitätstheorie

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Greiner |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |

| **Modulprüfung**<br>**Modulabschlussprüfung, benotet**<br>**bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Kovariante Elektrodynamik und spezielle Relativitätstheorie (Covariant Electrodynamics and Special Theory of Relativity) | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VNGTD** | **Nichtgleichgewichtsthermodynamik**<br><br>(Non-equilibirum thermodynamics) | Wahlpflichtmodul | 6 CP (insg.) = 180 h<br>Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | 4 SWS |

**Inhalte**

Terminologie stochastischer Prozesse (Gauß'scher Prozess, Markov-Prozess), Transportprozesse (Brownscher Prozess, Langevin-Gleichung, Fokker-Planck-Gleichung, Boltzmann-Gleichung), (ggf. kl. Hierarchien von Korrelationen, Nicht-Gleichgewichts-Vielteilchentheorie), random walk to finance, modelling of risk free financial market (classical option pricing, Black-Scholes equation)

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Studierenden kennen alle wesentlichen Konzepte und Fachbegriffe von stochastischen Prozessen in der (theoretischen) Physik. Die Studierenden wissen im Besonderen um die Bedeutung von Gauß'schen Prozessen und speziell um die Bedeutung eines Wiener Prozesses. In der Physik können die Studierenden nun nach erfolgreicher Belegung des Kurses die verschiedenen bekannten dynamischen Konzepte als Markov-Prozesse formulieren, wie die Master-Gleichung, die Fokker-Planck-Gleichung, die Langevin-Gleichung und die Boltzmann-Gleichung. Die Studierenden sind in der Lage, diese Konzepte für verschiedene Fragestellungen mittels der vielen Beispiele des Kurses und der Übungen anzuwenden, wie das Erreichen vom thermodynamischen Gleichgewicht eines Systems, die Begründung des H-Theorems, die Beschreibung von (einfachen) Birth- and Death- Populationen, die Transporteigenschaften von Systemen uvm. Die Studierenden können die erlernten Methodiken der stochastischen Prozesse auch in die Ökonomie (Ëcophysis") übertragen und anwenden: Sie kennen die Bedeutung von Levy-Verteilungen zur Betrachtung der Fluktuationen von Preisen von Aktien, und sie verstehen die zeitliche Dynamik (Black-Scholes-Gleichung) zur Berechnung der Preise von Optionen als einem effektiven Fokker-Planck-Prozess. Die Studierenden sind nun in der Lage, sich selbständig in die einschlägige fortführende Literatur und in wissenschaftlichen Publikationen einzuarbeiten.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Module *Quantenmechanik*, *Statistische Mechanik* (bedingt), *Höhere Quantenmechanik* (bedingt)

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Greiner |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |

| **Modulprüfung**<br>**Modulabschlussprüfung, benotet**<br>**bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Nichtgleichgewichtsthermodynamik<br>(Non-equilibirum thermodynamics) | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VQI** | **Quantenwahrscheinlichkeit und Informationsverarbeitung** | Wahlpflichtmodul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
| | (Quantum probability and information processing) | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

*Wahrscheinlichkeit und Information in der Quantentheorie*: Logik, klassische Wahrscheinlichkeitstheorie, Wahrscheinlichkeiten in der Quantentheorie, Kochen-Specker-Theorem, Geometrie des Zustandsraums, empirische Rekonstruktion von Quantenzuständen, Entropie und Information, Holevo-Schranke, Gibbs-Modelle, Optimierung der Beschreibungsebene, Symmetrien, Informationsübertragung mit und ohne gemeinsame Bezugssysteme

*Quantencomputer*: Qubits, Quantengatter, Schaltkreise, no-cloning-Theorem, Bell-Zustände, Verschränkung, Quanten-Teleportation, dense coding, Deutsch-Algorithmus, Fehlerkorrektur, Shor-Code, Quantenkryptografie, BB84-Protokoll, Quanten-Fouriertransformation, Faktorisierung (Shor-Algorithmus), Grover-Iteration, Datenbanksuche, experimentelle Realisierung, DiVincenzo-Kriterien, nichtlineare Optik, optische Kavitäten, Ionenfallen, Kernspinresonanz, Einweg-Quantencomputer

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Das Modul führt in die Grundlagen der klassischen und quantenmechanischen Wahrscheinlichkeits- und Informationstheorie ein sowie in die modernen Forschungsgebiete der Quanteninformationsverarbeitung, der statistischen Rekonstruktion von Zuständen und Prozessen sowie der Thermodynamik kleiner Systeme. Nach Absolvieren des Moduls kennen Studierende die Bedeutung von Wahrscheinlichkeit und Information für das moderne Verständnis der Quantentheorie sowie deren Ähnlichkeiten und Unterschiede zur klassischen Wahrscheinlichkeits- und Informationstheorie. Studierende sind in der Lage, einfache Quanten-Schaltkreise zu skizzieren und deren Funktionsweise zu erläutern. Insbesondere beherrschen Studierende die grundlegenden Protokolle zur Fehlerkorrektur, zur sicheren Verteilung kryptografischer Schlüssel, zur effizienten Faktorisierung sowie zur effizienten Datenbanksuche. Darüber hinaus sind Studierende mit den Möglichkeiten der Realisierung in realen physikalischen Systemen vertraut. Die Lehrveranstaltungen sind interaktiv und ermuntern die Teilnehmer zu aktiver Diskussion. Sie stärken somit über die reine Wissensvermittlung hinaus die Fähigkeit der Studierenden zur Argumentation und zur kritischen Auseinandersetzung mit physikalischen Fragestellungen.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Module Theoretische Physik 4–5 (Quantenmechanik, Statistische Mechanik), im Besonderen: Wellenfunktion, Hilbertraum, Schrödingergleichung, quantenmechanische Messung, Pauli-Matrizen, Dichtematrix, Entropie, statistische Ensembles

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Hofstetter |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | keine |
| **Leistungsnachweise** | keine |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Prüfungsvorleistungen** | keine | | | | | | | |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen | | | | | | | |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Englisch | | | | | | | |
| **Modulprüfung** | | | | | | | | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | | | | | | | | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Wahrscheinlichkeit und Information in der Quantentheorie (Quantum probability and information) | V | 2 | 3 | Pf | X | | (X) | |
| Quantencomputer (Quantum computing) | V | 2 | 3 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VIQMPT** | **Introduction to Quantum Many-Particle Theory**<br>(Einführung in die Vielteilchentheorie) | Wahlpflicht-modul | 5 CP (insg.) = 150 h | | 4 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 90 h | |

**Inhalte**

many-particle states and operators; Hartree-Fock approximation, correlation (Part I); 2nd quantization, Fock space; pictures in quantum theory; linear response; Green's functions, equations of motion for Green's functions; perturbation theory; Dyson equations, irreducible functions; Hartree-Fock approximation, correlation (Part II), conserving approximations.
Vielteilchenzustände und -operatoren; Hartree-Fock Näherung, Korrelation (Teil I); 2. Quantisierung, Fockraum; Bilder in der Quantenmechanik; Lineare Antwort; Greensfunktionen und ihre Bewegungsgleichungen; Störungstheorie; Dyson-Gleichung, irreduzible Funktionen; Hartree-Fock Näherung, Korrelation (Teil II); erhaltende Näherungen.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

In this module students acquire a basic understanding of many-particle wave functions and operators, as well as of standard methods for studying the properties of many-particle systems. In particular, students become familiar with the fundamental differences between single- and many-particle systems (Pauli and Coulomb correlation) and make first contact with alternatives to the Schrödinger equation for dealing with quantum systems. In the tutorial students learn to translate the general many-body formalism to specific systems and gain versatility in explicitly calculating many-body matrix elements and Green's functions.
The course is fully self-contained and emphasizes the structural and formal aspects of many-particle theory, rather than particular many-body systems. It is directly based on the mandatory theory courses *Theoretische Physik I-IV* and does not require additional preparation. Explicit examples are drawn from electronic structure theory, the material is, however, also relevant for atomic, molecular and nuclear physics. The module prepares students for attending more advanced theory courses which then lead to research projects in this field.
Die Studierenden entwickeln ein grundlegendes Verständnis für Vielteilchenwellenfunktionen und -operatoren, sowie für Standardmethoden zur Untersuchung der Eigenschaften von Vielteilchensystemen. Insbesondere sind die Studierenden mit den fundamentalen Unterschieden zwischen Ein- und Vielteilchensystemen (Pauli und Coulomb-Korrelation) vertraut und kommen erstmals mit Alternativen zur direkten Lösung der Schrödinger-Gleichung bei der Diskussion von Quantensystemen in Kontakt. In den Übungen lernen die Studierenden, den allgemeinen Vielteilchenformalismus auf spezifische Problemstellungen zu übersetzen und gewinnen Erfahrung mit der Berechnung von Vielteilchenmatrixelementen sowie Greensfunktionen.
Dieser Kurs ist in sich abgeschlossen und betont die strukturellen und formalen Aspekte des Vielteilchenformalismus, weniger dagegen die Physik konkreter Vielteilchensysteme. Er basiert unmittelbar auf den Pflichtmodulen *Theoretische Physik I-IV*, darüber hinausgehende Vorkenntnisse sind nicht erforderlich. Explizite Beispiele entstammen dem Gebiet der Elektronenstrukturtheorie, das Material der Vorlesung ist aber ebenso relevant in den Bereichen Atom-, Molekül- und Kernphysik. Das Modul bereitet Studierende auf die Teilnahme an fortgeschrittenen Lehrveranstaltungen in diesen Fachgebieten vor.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

elementary quantum mechanics (single-particle wavefunctions, operators, Schrödinger equation, boundary conditions, spin, Coulomb interaction); basic elements of functional analysis (Hilbert space, complete and orthonormal basis sets).
elementare Quantenmechanik (1-Teilchen-Wellenfunktionen, Operatoren, Schrödinger-Gleichung, Randbedingungen, Spin, Coulomb-Wechselwirkung); Grundelemente der Funktionalanalysis (Hilbertraum, vollständige und orthonormale Basen).

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik | | | | | | | |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik | | | | | | | |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig | | | | | | | |
| **Dauer** | einsemestrig | | | | | | | |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Engel | | | | | | | |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | | | | | | | | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen | | | | | | | |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben | | | | | | | |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise | | | | | | | |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung | | | | | | | |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Englisch oder Deutsch | | | | | | | |
| **Modulprüfung** | | | | | | | | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | | | | | | | | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Introduction to Quantum Many-Particle Theory | V+Ü | 2.5+1.5 | 5 | Pf | X | X | (X) | (X) |
| Summe | | 4 | 5 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VMSDA** | **Modern Statistical Data Analysis for Practitioners** | Wahlpflicht-modul | 5 CP (insg.) = 150 h | | 4 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 90 h | |

**Inhalte**

We introduce the basics of probability theory, classical statistics, and classical error analysis (p-values, confidence intervals), which serves as the starting point to explore modern methods of statistics (Maximum Likelihood, Bayes). We use these methods to extract information from noisy data through (non-)linear parameter estimation (fitting) and model comparison. We show how to analyze data containing dynamical information by time series analysis (correlation functions, error analysis) and Markov-Chain models and kinetic models described by rate equations.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

The overarching goal is to equip the students with the necessary statistical tools to extract information from noisy data reliably and with quantified uncertainties. The students should be able to identify the common pitfalls of statistical data analysis in their own work and be able to critically assess the quality of published data and statistical analyses. These goals will be practiced in the practical course on real world examples.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Basic knowledge of physics and mathematics. Any experience in programming and Linux OS.

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Biophysik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Biophysik, MSc Biophysik, BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Hummer |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Modern Statistical Data Analysis for Practitioners | V+Ü | 2.5+1.5 | 5 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 4 | 5 | | | | | |

## 4.2 Astrophysik und Kosmologie

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VHYMAG** | **Hydrodynamics and Magnetohydrodynamics** | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

On the fluid approximation, Newtonian kinetic theory, The Boltzmann equation, The H-theorem, The moment equations, The Maxwell-Boltzmann equilibrium distribution, The zero-order approximation: perfect fluids, The first-order approximation: non-perfect fluids, Relativistic kinetic theory, The relativistic Boltzmann equation, Relativistic transport fluxes, The relativistic moment equations, The general-relativistic hydrodynamic equations, Relativistic equilibrium distributions, The laws of thermodynamics, Equations of state, Kinematic properties of fluids, Kinematic shear, expansion and vorticity, Evolution laws of the kinematic quantities, Mass current and energy-momentum of perfect fluids, Hydrodynamics equations of perfect fluids, Stationary flows, Bernoulli's theorem, Irrotational flows, Vorticity, Irrotational flows, Kelvin-Helmholtz theorem, Isentropic flows, Hyperbolic systems of partial differential equations, Quasi-linear formulation, Conservative formulation, Linear and nonlinear behaviour, Characteristic equations for linear systems, Riemann invariants, Characteristic curves and caustics, Domain of determinacy and region of influence, Linear hydrodynamic waves, Sound waves, Nonlinear hydrodynamic waves, Simple waves and discontinuous waves, Rarefaction waves, Shock waves, Contact discontinuities, The Riemann problem, Introduction to plasmas, The magnetohydrodynamic equations, Flux-freezing condition, Magnetohydrostatic solutions, Hydromagnetic waves, Magnetic reconnection.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

At the end of the course the students will have been exposed to the basic concept of modern hydrodynamics and magnetohydrodynamics. Furthermore, with the discussion of the mathematical and computational techniques employed in the solution of the equations of hydrodynamics and magnetohydrodynamics, the students will be able to carry out quantitative studies employing the solution of these equations. Overall, the material in the course will provide all the necessary background for a successful research work in plasma physics and relativistic astrophysics.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Classical Mechanics

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Rezzolla |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |

| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Englisch | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Modulprüfung**<br>**Modulabschlussprüfung, benotet**<br>**bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Hydrodynamics and Magnetohydrodynamics | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VASTBIO** | **Astrobiologie**<br><br>(Astrobiology) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

Entstehung der Elemente, Chemie im Weltraum, Habitable Erde, Eigenschaften von Leben, Terrestrische Biochemie, Ursprung des Lebens, Leben im All, Exoplaneten

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Dieses Modul vermittelt den Studierenden die Fähigkeiten,

- das Phänomen Leben im astrophysikalischen Kontext einzuordnen,
- die Enstehung des Lebens auf der Erde und im Universum gegenüber zu stellen,
- Bezüge zwischen den naturwissenschaftlichen Bereichen Chemie, Biologie, Geowissenschaften, Physik und Astrophysik herzustellen,
- die Komplexität der Definition von Leben zu verstehen,
- das Konzept der Habitabilität von Exoplaneten einzuordnen,
- die Frage der Zukunft des Lebens und der Möglichkeit des Lebens außerhalb der Erde zu untersuchen.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

keine

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Schaffner-Bielich |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Astrobiologie (Astrobiology) | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | X | X | (X) | (X) |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| **VGWAV** | **Gravitationswellen**<br><br>(Gravitational Waves) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

Einsteinsche Feldgleichungen, linearisierte Theorie der Allgemeinen Relativitätstheorie, Geometrischer Zugang zu Gravitationswellen, Feldtheoretischer Zugang zu Gravitationswellen, Erzeugung von Gravitationswellen in linearisierter Theorie, Anwendungen (binäre Systeme, rotierende Körper, freier Fall in Schwarze Löcher, beschleunigte Massen), experimentelle Beobachtung von Gravitationswellen

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Studierenden lernen die Eigenschaften von Gravitationswellen der Allgemeinen Relativitätstheorie in einem geometrischen Zugang und komplementär innerhalb des Wellenbegriffes eines klassischen Feldes kennen. Sie können mögliche Quellen für die Produktion von Gravitationswellen benennen und einen Bezug zu astrophysikalischen Systemen herstellen. Sie verstehen die Prinzipien hinter der experimentellen Messung von Gravitationswellen und mögliche Methoden zur Detektion. Sie kennen die gegenwärtigen Beobachtungen von Gravitationswellen und wissen die Implikation dieser Messungen für die Eigenschaften von kompakten Objekten einzuschätzen.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Theoretische Physik 1-3, Allgemeine Relativitätstheorie

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Schaffner-Bielich |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Gravitationswellen (Gravitational Waves) | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | X | X | (X) | (X) |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

## 4.3 Kern- und Elementarteilchenphysik

| **VSTATP** | **Statistische Physik und kritische Phänomene** (Statistical Physics and Critical Phenomena) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

1. Phasenübergänge und kritische Phänomene, Ginzburg-Landau-Theorie für Phasenübergänge
2. Ising-Modell und andere einfache Spinmodelle
3. Renormierungsgruppe
4. Monte-Carlo-Methoden

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Aufbauend auf den Grundvorlesungen über Theoretische Physik vermittelt das Modul vertiefende Kenntnisse über Phasenübergänge. Am Ende des Moduls können die Studierenden zur Beschreibung von kritischen Phänomenen geeignete Modelle heranziehen und das Konzept der Universalität auf kritische Phänomene in allen Bereichen der Physik anwenden.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

siehe VQFT1 und VQFT2

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Philipsen |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Statistische Physik und kritische Phänomene (Statistical Physics and Critical Phenomena) | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | X | X | (X) | (X) |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| **VSTAFT** | **Statistische Feldtheorie**<br><br>(Statistical Field Theory) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

Kanonische und großkanonische Zustandssumme als Funktionalintegral; nichtwechselwirkende skalare Felder, Fermionen, Vektorfelder und Eichfelder im Imaginärzeitformalismus; wechselwirkende Felder in Störungstheorie, diagrammatische Entwicklung der Zustandssumme; vielteilchentheoretische Resummationsmethoden, 1PI- und 2PI-effektive Wirkung; Anwendungen für skalare Felder (Nambu–Jona-Lasinio–Modell), Suprafluidität und Supraleitung; Eichtheorien und Hard-Thermal-Loop–Approximation

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Ziel des Moduls ist es, den Studentinnen und Studenten die wesentlichen Konzepte der quantenfeldtheoretischen Beschreibung von Systemen bei nichtverschwindenden Temperaturen und Dichten zu vermitteln. Sie können diese auf Systeme im Bereich der kondensierten Materie, beispielsweise die Bose-Einstein-Kondensation, und im Bereich der Elementarteilchenphysik, beispielsweise die Entwicklung des frühen Universums, die Dynamik von Schwerionenkollisionen, sowie das Innere kompakter stellarer Objekte, anwenden. Nach Abschluss des Moduls haben sie die Fertigkeiten erworben, die Techniken der Statistischen Feldtheorie für ihre eigenen Forschungsarbeiten nutzen zu können.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Höhere Quantenmechanik, Einführung in die Quantenfeldtheorie (Teil I und II)

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Rischke |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Statistische Feldtheorie (Statistical Field Theory) | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VHYDRO** | **Hydrodynamik und Transporttheorie**<br>(Hydrodynamics and Transport Theory) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

Hydrodynamik der idealen Flüssigkeiten; Schallwellen; Schock- und Verdünnungswellen; Zerfall der Unstetigkeit; selbstähnliche Lösungen; Zustandsgleichung hochverdichteter Materie; Phasengleichgewicht; Deflagrations- und Detonationswellen; Instabilitäten; Navier-Stokes-Gleichung; Wärme- und Strahlungstransport; kinetische Gastheorie; Einteilchen-Verteilungsfunktion; Boltzmann-Gleichung; Zweierstöße.
Hydrodynamics of ideal fluids; sound waves; shock and rarefaction waves; decay of discontinuity; self-similar solutions; equation of state of matter at high pressure; phase equilibrium; deflagration and detonation waves; instabilities; Navier-Stokes equation; heat and radiation transport; kinetic theory of gases; single-particle distribution function; Boltzmann equation; two-body collisions.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Das Modul vermittelt die Grundkonzepte der klassischen Strömungsmechanik als nichtlinearer Feldtheorie. Die Studierenden lernen die Grundgleichungen kennen und erwerben die Kompetenz, das Verhalten von Flüssigkeiten und Gasen unter verschiedenen Bedingungen zu beurteilen und in typische Lösungsklassen einzuordnen. In der Transporttheorie wird die fundamentale Einsicht vermittelt, wie aus einer reversiblen mikroskopischen Physik irreversibles makroskopisches Verhalten etwa in der Boltzmanngleichung entstehen kann und die Kompetenz erlangt, lokales und globales Gleichgewicht sowie Nichtgleichgewichtsprozesse zu erkennen.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

klassische Mechanik, Vektoranalysis

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Tauschwitz |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Hydrodynamik und Transporttheorie (Hydrodynamics and Transport Theory) | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | X | X | (X) | (X) |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VSKTG1** | **Von der Quantenfeldtheorie zu semiklassischen Transportgleichungen I: Vielteilchensysteme im thermischen Gleichgewicht**<br>(From quantum field theory to semi-classical transport equations I: many-body systems in equilibrium) | Wahlpflicht-modul | 5 CP (insg.) = 150 h<br>Kontaktstudium 3 SWS / 45 h | Selbststudium 105 h | 3 SWS |

**Inhalte**

Beschreibung von Vielteilchensystemen mittels der relativistischen Quantenfeldtheorie; kanonische und Pfadintegral-Quantisierung relativistischer Feldtheorien; Statistischer Operator; thermodynamisches Gleichgewicht im Matsubara-Imaginärzeit- und Schwinger-Keldysh-Realzeitformalismus; Störungstheorie und nichtperturbative Methoden bei endlichen Temperaturen; Anwendung auf den chiralen Phasenübergang in der Schwerionenphysik

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Studierenden

- beherrschen die grundlegenden Konzepte der relativistischen Quantenfeldtheorie,
- können den Formalismus auf Vielteilchensysteme im thermodynamischen Gleichgewicht anwenden,
- beherrschen mathematische Methoden zur perturbativen und nichtperturbativen Berechnung von Green-Funktionen im Matsubara- und Schwinger-Keldysh-Realzeitformalismus,
- beherrschen funktionale Methoden zur Regularisierung und Renormierung im 2PI-Formalismus,
- kennen die wichtigsten Anwendungen in der relativistischen Schwerionenphysik (Quark-Gluon-Plasma, Mediummodifikationen, chiraler Phasenübergang).

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen *Theoretische Physik 1–5* und *Höhere Quantenmechanik*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | van Hees |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | keine |
| **Leistungsnachweise** | keine |
| **Prüfungsvorleistungen** | keine |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung |

| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Modulprüfung**<br>**Modulabschlussprüfung, benotet**<br>**bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Von der Quantenfeldtheorie zu semiklassischen Transportgleichungen I: Vielteilchensysteme im thermischen Gleichgewicht (From quantum field theory to semi-classical transport equations I: many-body systems in equilibrium) | V | 3 | 5 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 3 | 5 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VSKTG2** | **Von der Quantenfeldtheorie zu semiklassischen Transportgleichungen II: Vielteilchensysteme im Nichtgleichgewicht** | Wahlpflicht-modul | 5 CP (insg.) = 150 h | | 3 SWS |
| | (From quantum field theory to semi-classical transport equations II: many-body systems out of equilibrium) | | Kontaktstudium 3 SWS / 45 h | Selbststudium 105 h | |

**Inhalte**

Beschreibung von Vielteilchensystemen mittels der relativistischen Quantenfeldtheorie; Schwinger-Keldysh-Realzeitformalismus; Pfadintegral-Quantisierung relativistischer Feldtheorien; Kadanoff-Baym-Gleichungen; „Coarse-Graining“ und Gradientenentwicklung; Markov-Näherung; Quasiteilchennäherung; „Off-Shell-Transport“

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Studierenden

- beherrschen die Grundlagen zur Beschreibung von Nichtgleichgewichtsprozessen im Schwinger-Keldysh-Realzeitformalismus,
- können relativistische semiklassische Transportgleichungen mittels Coarse-Graining"von Kadanoff-Baym-Gleichungen für Wigner-transformierte Green-Funktionen herleiten,
- verstehen den Zusammenhang mit relativistisch-hydrodynamischen Beschreibungen von Vielteilchensystemen,
- können die theoretischen Techniken auf die Beschreibung von relativistischen Schwerionenstößen anwenden.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen *Theoretische Physik 1–5* und *Höhere Quantenmechanik*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | van Hees |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | keine |
| **Leistungsnachweise** | keine |
| **Prüfungsvorleistungen** | keine |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |

| **Modulprüfung** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Modulabschlussprüfung, benotet**<br>**bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Von der Quantenfeldtheorie zu semiklassischen Transportgleichungen II: Vielteilchensysteme im Nichtgleichgewicht (From quantum field theory to semi-classical transport equations II: many-body systems out of equilibrium) | V | 3 | 5 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 3 | 5 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VFRG** | **Die Funktionale Renormierungsgruppe und ihre Anwendung auf QCD und Gravitation** | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
| | (The Functional Renormalization Group and its Application to QCD and Gravity) | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

Fermionen im Pfadintegral, Eichfelder im Pfadintegral, Faddeev-Popov Quantisierung, Hintergrundfeldmethode, Funktionale Renormierungsgruppengleichung, Trunkierungsschemen, Nambu-Jona-Lasinio Modell, chirale Symmetriebrechung, perturbative Nichtrenormierbarkeit der Gravitation, Asymptotic Safety Szenario

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Ziel dieses Moduls ist es, den Studentinnen und Studenten die wesentlichen Konzepte der Funktionalen Renormierungsgruppe (FRG) zu vermitteln. Sie können diese auf Probleme der Quantenchromodynamik (QCD) und der Gravitation anwenden. Sie verstehen das Konzept der Symmetriebrechung und -restaurierung bei nichtverschwindenden Temperaturen und Dichten. Nach Abschluss des Moduls haben sie die Fertigkeiten erworben, die Techniken der Funktionalen Renormierungsgruppe für ihre eigenen Forschungsarbeiten nutzen zu können.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Grundlagen der Allgemeine Relativitätstheorie, Grundlagen der Quantenfeldtheorie, Pfadintegral, perturbative Renormierung

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Rischke |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Die Funktionale Renormierungsgruppe und ihre Anwendung auf QCD und Gravitation (The Functional Renormalization Group and its Application to QCD and Gravity) | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VDRIDE** | **Physik von Driftdetektoren**<br>(Physics of Drift Detectors) | Wahlpflicht-modul | 5 CP (insg.) = 150 h | | 4 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 90 h | |

**Inhalte**

Grundlagen von Ionisation durch geladene Teilchen in Gasen, Photo-Absorptions Ionisations Modell, Energieverlustfluktuationen, Elektronen- und Ionendrift in elektrischen und magnetischen Feldern, Gasverstärkung, Signaleinkopplung, Positionsmessung. Teilchenidentifizierung durch Messung des spezifischen mittleren Energieverlusts. Impulsbestimmung im Magnetfeld. Statistische und systematische Limitierungen in realen Detektoren. Methoden zur Kalibrierung von großen Driftdetektoren.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Detaillierte Kenntnis der relevanten physikalischen Phänomene versetzt Studierende in die Lage, eigenständig reale Driftdetektorsysteme zu entwerfen und im Rahmen von Monte-Carlo Studien zu optimieren. Die Studierenden erlangen ein Verständnis für die komplexen Kalibrierungsschritte großvolumiger Detektoren.
Das Modul bereitet Studierende für die Arbeit an kernphysikalischen Großexperimenten vor. Simulation, Entwicklung, Kalibrierung und Analyse von Driftdetektordaten sind typische Elemente von Bachelor-, Master-, und Doktorarbeiten auf diesem Gebiet.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Lehrveranstaltungen *Experimentalphysik 3* und *Experimentalphysik 4A*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Appelshäuser |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Physik von Driftdetektoren (Physics of Drift Detectors) | V+Ü | 2.5+1.5 | 5 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 4 | 5 | | | | | |

## 4.4 Festkörperphysik

| **VQMPT** | **Vielteilchenphysik** (Many-body physics) | Wahlpflicht-modul | 8 CP (insg.) = 240 h | | 6 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 6 SWS / 90 h | Selbststudium 150 h | |

**Inhalte**

Zweite Quantisierung, Vielteilchen-Modellsysteme, Greensche Funktionen, Diagrammatische Störungstheorie für $T = 0$ und $T > 0$, Random-Phase Approximation, Leiter-Näherung

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Studierenden lernen die grundlegenden Methoden der Vielteilchen-Theorie, um eigenständig auf dem Gebiet der Vielteilchenphysik arbeiten zu können.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen *Theoretische Physik 1–5*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Kopietz |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Vielteilchenphysik (Many-body physics) | V+Ü | 4+2 | 8 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 6 | 8 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VFSTATP** | **Fortgeschrittene Statistische Physik: Nichtgleichgewicht, kritische Phänomene und Renormierungsgruppe** | Wahlpflicht-modul | 8 CP (insg.) = 240 h | | 6 SWS |
| | (Advanced Statistical Physics: Non-equilibrium, Critical Phenomena, and Renormalization Group) | | Kontaktstudium 6 SWS / 90 h | Selbststudium 150 h | |

| | |
|---|---|
| **Inhalte** | |
| Im ersten Teil der Vorlesung werden die grundlegenden Methoden und Gleichungen der statistischen Physik im Nicht-Gleichgewicht hergeleitet und diskutiert. Im zweiten Teil wird die Theorie der Renormierungsgruppe entwickelt und auf die Berechnung kritischer Phänomene angewandt. | |
| **Lernergebnisse/Kompetenzziele** | |
| Die folgenden Themen der Nicht-Gleichgewichts Statistischen Physik werden behandelt: Langevin-Gleichungen, Fokker-Planck Gleichungen, Master-Gleichungen, Kinetik klassischer Gase, Boltzmann-Gleichung, Navier-Stokes Gleichung. Anschließend werden kritischen Phänomene am Beispiel der Ising-Universalitätsklasse eingeführt und das Skalenverhalten in der Nähe des kritischen Punktes erklärt. Es folgt eine Einführung in die Wilsonsche Renormierungsgruppen-Methode. Schließlich wird die Funktionale Renormierungsgruppe entwickelt.<br>Mit den in diesem Modul erworbenen Kenntnissen können die Studierenden viele aktuelle Forschungsthemen im Bereich der statistischen Physik und der wechselwirkenden Vielteilchensysteme verstehen. Die Vorlesung kann begleitend zur Anfertigung einer Bachelor- oder Masterarbeit auf diesen Gebieten gehört werden. | |
| **Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls** | |
| keine | |
| **Empfohlene Vorkenntnisse** | |
| Inhalt der Veranstaltungen *Theoretische Physik 1–5* | |
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Kopietz |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |

| **Modulprüfung**<br>**Modulabschlussprüfung, benotet**<br>**bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Fortgeschrittene statistische Physik: Nichtgleichgewicht, kritische Phänomene und Renormierungsgruppe (Advanced Statistical Physics: Non-equilibrium, Critical Phenomena, and Renormalization Group) | V+Ü | 4+2 | 8 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 6 | 8 | | | | | |

| **VDFT** | **Density Functional Theory** | Wahlpflicht-modul | 5 CP (insg.) = 150 h | | 3 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 3 SWS / 45 h | Selbststudium 105 h | |

**Inhalte**

Hohenberg-Kohn theorem, interacting $v$-representability, spin/current-density functional theory, Kohn-Sham equations, noninteracting $v$-representability, exact exchange, virial theorems, adiabatic connection, local density approximation (LDA), (meta) generalized gradient approximation, LDA+$U$, orbital-dependent functionals, relativistic density functional theory (optionally: time-dependent density functional theory)

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

In this module students are trained for doing research in the field of computational electronic structure theory. Both the complete theoretical background of one of the standard methods in this field, density functional theory, and more practical aspects are covered. In particular, students learn to distinguish the various aspects of electron correlation. Prototype results from a variety of fields illustrate the merits and limitations of density functional theory. As a result of this course, students understand the significance and implications of various approximations and are able to operate standard density functional codes. Students are ready for pursuing a bachelor's or master's project in this field.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

required knowledge: basic elements of many-particle quantum mechanics (wavefunctions, operators, Schrödinger equation, Coulomb interaction, Hartree-Fock approximation, 2nd quantization, field operators);
recommended knowledge: basic elements of Green's function approach to many-particle systems (1-particle propagator, response functions, Dyson equation, irreducible functions, Feynman diagrams); (semi)relativistic quantum mechanics (Pauli equation, Dirac equation)
recommended for preparation: course *Introduction to Quantum Many-Particle Theory*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik, MSc Biophysik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Engel |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | keine |
| **Leistungsnachweise** | keine |
| **Prüfungsvorleistungen** | keine |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Density Functional Theory | V | 3 | 5 | Pf | X | X | (X) | (X) |
| Summe | | 3 | 5 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VQMD** | **Quantum Molecular Dynamics** | Wahlpflicht-modul | 5 CP (insg.) = 150 h | | 3 SWS |
| | | | Kontaktstudium 3 SWS / 45 h | Selbststudium 105 h | |

**Inhalte**

Born-Oppenheimer approximation; density functional theory (Hohenberg-Kohn theorem, Kohn-Sham equations, local density approximation, generalized gradient approximation, time-dependent density functional theory); Born- Oppenheimer versus Car-Parrinello dynamics; iterative diagonalization; optimization techniques (steepest descent, conjugate gradient dynamics, variable metric method); global energy minimization (Metropolis algorithm, Markov chains, dynamical simulated annealing); pseudopotentials; quantum molecular dynamics for periodic systems; Kleinman-Bylander transformation; supercell concept

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

This module provides a bridge between the electronic structure of atoms, familiar to students from the standard course(s) on quantum mechanics, and the electronic structure of molecules and solids. The course addresses both the fundamental physics involved as well as the theoretical concepts and computational techniques required for efficiently dealing with such systems. Students become familiar with the relevant lengths, time and energy scales, with the notion of hybridization and delocalization of states, and with the Born-Oppenheimer approximation. In addition, students make first contact with "counterintuitive" approaches, such as the pseudopotential approximation or the simulation of the Schrödinger equation by another differential equation. They learn about the interplay between the equations of motion and discretization. In this way students are trained to think more creatively about the representation of physics in terms of equations.
The course is directly based on the mandatory theory courses *Theoretische Physik I-IV*. It is highly self-contained, preparation of students by attending additional courses e.g. in condensed matter theory is not required. The module prepares students for pursuing bachelor's or master's projects in computational electronic structure theory.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

basic understanding of (a) classical electrodynamics (Coulomb forces, multipole expansion); (b) quantum mechanics of many-electron systems (wavefunctions, Schrödinger equation, spin, Pauli principle, 2nd quantization); (c) atomic physics (electronic structure, energetics)

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik, BSc Biophysik, MSc Biophysik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Engel |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | keine |
| **Leistungsnachweise** | keine |
| **Prüfungsvorleistungen** | keine |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Englisch |

| **Modulprüfung**<br>**Modulabschlussprüfung, benotet**<br>**bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Quantum Molecular Dynamics | V | 3 | 5 | Pf | X | X | (X) | (X) |
| Summe | | 3 | 5 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VEFRG** | **Einführung in die Funktionale Renormierungsgruppe**<br>(Introduction to the functional renormalization group) | Wahlpflicht-modul | 8 CP (insg.) = 240 h | | 6 SWS |
| | | | Kontaktstudium 6 SWS / 90 h | Selbststudium 150 h | |

**Inhalte**

In diesem Modul wird eine systematische Einführung in die Theorie der Funktionalen Renormierungsgruppe gegeben. Die folgenden Themen werden behandelt:

1. Das Konzept der Renormierungsgruppe
2. Phasenübergänge und Skalenhypothese
3. Molekularfeld-Theorie und Gauß'sche Näherung
4. Die Wilsonsche Renormierungsgruppe
5. Kritische Exponenten des Ising-Modells in der Nähe von 4 Dimensionen
6. Funktional-Methoden
7. Exakte Renormierungsgruppen Flussgleichungen
8. Vertex-Entwicklung
9. Gradienten-Entwicklung
10. Anwendungen auf Vielteilchensysteme (Fermionen, Bosonen, Spinsysteme).

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Studierenden erwerben in diesem Modul ein grundlegendes Verständnis der Idee der Renormierungsgruppe und ihrer modernen Formulierung durch formal exakte Flussgleichungen für erzeugende Funktionale. Die Studierenden sollen dabei die Fähigkeit erwerben, eigenständig Renormierungsgruppenmethoden zur Lösung physikalischer Probleme einzusetzen.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Module: Quantenmechanik (VTH4) und Thermodynamik und Statistische Physik (VTH5)

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Kopietz |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |

| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Modulprüfung**<br>**Modulabschlussprüfung, benotet**<br>**bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Einführung in die Funktionale Renormierungsgruppe (Introduction to the functional renormalization group) | V+Ü | 4+2 | 8 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 6 | 8 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VKTHFPM** | **Spezielle Themen der theoretischen Festkörperphysik für MSc-Studierende** | Wahlpflicht-modul | 6–10 CP (insg.) = 180–300 h | | 4–7 SWS |
| | (Special Topics in Condensed Matter Theory for MSc Students) | | Kontaktstudium 4–7 SWS / 60–105 h | Selbststudium 120–195 h | |

**Inhalte**

abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:

*Topological States of Matter*: This module gives an overview over the field of topological phenomena in condensed matter systems.

- Geometry and topology of band structures and their physical implications (e.g., modern versions of the semiclassical equations of motion or the electric polarization).
- Discussion of a variety of topological phases, including topological insulators in 2d and 3d, topological superconductors and Majorana states, topological metals (e.g., Weyl semimetals), quantum Hall systems and spin liquids.
- Topological protection: effects of disorder and interactions.
- Special emphasis on experimental observations such as the detection of topological edge modes as well as novel applications.

*Introduction to physical kinetics, transport theory, and disordered systems*: Kinetic (Boltzmann) equation; Scattering by impurities and diffusion equation; Scattering of electrons by another electrons, viscosity, and Navier-Stokes equation; currents of charge and heat, kinetic coefficients, Onsager relations, Weidman-Franz law, and thermo-electric effect; Scattering by phonons and temperature dependence of the electric conductivity; Effect of magnetic field and classical Hall effect; Electron spin, scattering by magnetic impurities, spintronics, and spin-Seebeck effect (optionally: Kondo effect); Zero-temperature green functions, diagrammatic technique for disorder potential, Kubo formula, and current-current correlation function (optionally: weak localisation (interference) corrections to bulk conductivity).

*Theorie starker Magnetfelder in der Festkörperphysik*:

- Klassische Behandlung eines geladenen Teilchens im elektromagnetischen Feld im Hamilton- und Lagrange-Formalismus sowie die Lösung der Bewegungsgleichungen für ein konstantes Magnetfeld und im Fall eines gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldes
- Formulierung des quantenmechanischen Ein-Teilchen-Problems und dessen Lösung (Erhaltungsgrößen, symmetrische und Landau-Eichung, Landau-Niveaus, Entartung, Füllfaktor)
- Freies Teilchen im gitterperiodischen Potential ohne Magnetfeld (Bloch-Theorem) und das Bloch-Elektron im Magnetfeld, Näherung eines langsam veränderlichen Vektorpotentials und die Peierls-Substitution im Fall schwacher Felder
- Beschreibung eines Teilchens mittels eines tight-binding-Modells und Peierls-Substitution für ein quadratisches Gitter im Magnetfeld, Ableitung der Harper-Gleichung für schwache und starke Magnetfelder, Eigenschaften des Spektrums (Hofstadter-Schmetterling)
- Semiklassisches Modell (Gültigkeit, Ableitung der Bewegungsgleichungen) im homogenen Magnetfeld und im gitterperiodischen Potential, Bahnkurven und Fermiflächen
- Magnetische Suszeptibilität freier Elektronen im schwachen Feld (Trennung von diamagnetischem und paramagnetischem Anteil) und im starken Feld mit temperaturunabhängigen Oszillationen, deren Periode invers zur Stärke des Magnetfeldes ist
- Bohr-Sommerfeld-Quantisierung der semiklassischen Theorie im periodischen Potential und konstanten Magnetfeld und die Onsagersche Quantisierungsbedingung, experimenteller Nachweis und theoretische Erklärung des de Haas-van Alphen-Effekts, Aussagen über die Form der Fermi-Fläche eines Metalls
- Transporterscheinungen im Magnetfeld (Hall-Effekt im Rahmen der Drude- und Boltzmann-Theorien, Schubnikow-de Haas-Effekt der Leitfähigkeit und die Quanten-Hall-Effekte bei ganzzahligem und gebrochenzahligem Füllfaktor)
- Quanten-Hall-Effekt in Graphen

*Theorie der Supraleitung*: Grundlegende Experimente der Supraleitung, supraleitende Materialien, Thermodynamik und London-Gleichung, Ginsburg-Landau-Theorie, Supraleiter 1. und 2. Art, magnetische Eigenschaften, Fröhlich-Hamiltonian, BCS-Modell, Cooper-Paare, Grundzustand und Thermodynamik von BCS-Supraleitern, Meißner-Effekt, Josephson-Effekt.

*Pfadintegrale in der Quantenmechanik und in der Statistischen Physik*:

- Einordnung der Pfadintegraldarstellung der Quantenmechanik im Vergleich zu den Formulierungen der Quantenmechanik mit Wellenfunktionen und Matrizen, Vorteile dieser Formulierung
- Definition des Pfadintegrals zur Berechnung der Übergangsamplitude (Zeitentwicklungsoperator, kanonisches Pfadintegral und Feynmans Formulierung, verschiedene Methoden der Berechnung der Fluktuationsamplitude für das freie Teilchen und den harmonischen Oszillator)
- Zusammenhang zwischen Übergangsamplitude und Wellenfunktion, Ableitung der Schrödingergleichung und Bestimmung der Eigenwerte aus der Amplitude
- die Übergangsamplitude als Greensche Funktion und der Zusammenhang zu den Greenschen Funktionen der Quantenstatistik
- Pfadintegral und kanonische Zustandssumme (analytische Fortsetzung, klassischer Limes)
- Näherungen bei der Berechnung von Pfadintegralen (WKB-Näherung, Sattelpunktsnäherung als semiklassischer Grenzfall, Störungstheorie und Korrelationsfunktionen, Variationsprinzip zur Lösung des Polaron-Problems)
- Pfadintegral für Systeme mit topologischen Beschränkungen (Teilchen auf einem Kreis)

*Computational Methods in Solid State Theory*: The lecture will focus on methods that are suitable for solving problems in solid state theory. The students will apply these methods and as far as possible implement programs for them in the accompanying exercises. Possible topics are the application of density functional theory (DFT) to crystalline materials, the tight binding method, extraction of Hamiltonian parameters from DFT band structures. Approximate methods of solution for manybody Hamiltonians like mean field theory will be covered. Greens functions on real and imaginary frequency axes as well as methods of analytic continuation will be discussed in practical terms. Response functions will be calculated for example in random phase approximation. Part of the lecture can deal with dynamical mean field theory, a method that is approximate in finite dimension but has been increasingly successful over the last twenty years. The final part of the lecture can introduce numerically exact methods like exact diagonalization and quantum Monte Carlo. The lecture will be enriched by discussion of available software or libraries and methods of implementation.

Die Studierenden müssen mindestens zwei und können maximal drei Lehrveranstaltungen absolvieren. Dabei kann frei aus den verfügbaren Lehrveranstaltungen ausgewählt werden.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Dieses Modul bereitet die Studierenden auf eine Abschlussarbeit im Bereich Festkörperphysik vor. Nach Absolvieren des Moduls sind die Studierenden in dem von ihnen gewählten Vertiefungsbereich in der Lage, sich selbstständig in die aktuelle Forschung einzuarbeiten bzw. direkt zu ihr beizutragen:

- Die Studierenden kennen alle wesentlichen Konzepte und Fachbegriffe und verstehen deren inhaltliche Zusammenhänge.
- Die Studierenden können forschungsnahe Problemstellungen thematisch einordnen und mit den vermittelten Methoden analysieren.
- Die Studierenden können weiterführende Informationen zu einer gegebenen Fragestellung in Fachliteratur und Internet recherchieren.
- Die Studierenden können aktuelle wissenschaftliche Publikationen verstehen und wiedergeben.
- Die Studierenden besitzen das experimentelle oder theoretische Rüstzeug, um eine gegebene wissenschaftliche Fragestellung selbst quantitativ zu untersuchen und zu beantworten.

| **Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls** | |
|---|---|
| keine | |
| **Empfohlene Vorkenntnisse** | |
| abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Topological States of Matter*: Elementary quantum mechanics and some basic knowledge in solid-state physics (Bloch theorem, band structures). The course will not require very technical calculations but focus on general concepts and simple theoretical approaches.<br>*Introduction to physical kinetics, transport theory, and disordered systems*: No special knowledge is required. Classical mechanics (VTH2: Klassische Mechanik) and a very basic knowledge of quantum mechanics (the beginning of VTH4: Quantenmechanik) are enough for this course.<br>*Theorie starker Magnetfelder in der Festkörperphysik*: Kenntnisse der Quantenmechanik, der Quantenstatistik und der Festkörperphysik<br>*Theorie der Supraleitung*: Inhalt der Veranstaltungen *Theoretische Physik 1–5*<br>*Pfadintegrale in der Quantenmechanik und in der Statistischen Physik*: Kenntnisse der Quantenmechanik und der Statistischen Physik<br>*Computational Methods in Solid State Theory*: This course requires elementary programming skills, an understanding of quantum mechanics and solid state physics. | |
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Kopietz |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Topological States of Matter*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen<br>*Introduction to physical kinetics, transport theory, and disordered systems*: keine<br>*Theorie starker Magnetfelder in der Festkörperphysik*: keine<br>*Theorie der Supraleitung*: keine<br>*Pfadintegrale in der Quantenmechanik und in der Statistischen Physik*: keine<br>*Computational Methods in Solid State Theory*: regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | abhängig von den gewählten Lehrveranstaltungen:<br>*Topological States of Matter*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Introduction to physical kinetics, transport theory, and disordered systems*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Theorie starker Magnetfelder in der Festkörperphysik*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test |

| | |
|---|---|
| **Prüfungsvorleistungen** | *Theorie der Supraleitung*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Pfadintegrale in der Quantenmechanik und in der Statistischen Physik*: Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test<br>*Computational Methods in Solid State Theory*: erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben<br>Erbringen aller Leistungsnachweise in der Lehrveranstaltung, zu der die lehrveranstaltungsbezogene Modulprüfung stattfinden soll |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch und/oder Englisch je nach den gewählten Lehrveranstaltungen |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | Die Modulprüfung zu diesem Modul erfolgt lehrveranstaltungsbezogen: In einer Lehrveranstaltung des Moduls nach Wahl der oder des Studierenden werden sowohl die konkreten Inhalte der jeweiligen Lehrveranstaltung als auch die übergeordneten Lernziele des Moduls abgeprüft. Alle anderen von der oder dem Studierenden in diesem Modul absolvierten Lehrveranstaltungen werden mit den oben aufgeführten Leistungsnachweisen abgeschlossen. |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Topological States of Matter | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | X | X | (X) | (X) |
| Introduction to physical kinetics, transport theory, and disordered systems | V | 2 | 3 | WP | X | X | (X) | (X) |
| Theorie starker Magnetfelder in der Festkörperphysik (Theory of Strong Magnetic Fields in Solid State Physics) | V | 2 | 3 | WP | | X | | (X) |
| Theorie der Supraleitung (Theory of Superconductivity) | V | 2 | 3 | WP | X | | (X) | |
| Pfadintegrale in der Quantenmechanik und in der Statistischen Physik (Path Integrals in Quantum Mechanics and in Statistical Physics) | V | 2 | 3 | WP | X | | (X) | |
| Computational Methods in Solid State Theory | V+Ü | 2+1 | 4 | WP | X | X | (X) | (X) |
| Summe | | 4–7 | 6–10 | | | | | |

## 4.5 Atomphysik und Quantenoptik

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VUKQG** | **Quanteninformation und Ultrakalte Atome**<br>(Quantum Information and Ultracold Atoms) | Wahlpflicht-modul | 8 CP (insg.) = 240 h | | 6 SWS |
| | | | Kontaktstudium 6 SWS / 90 h | Selbststudium 150 h | |

**Inhalte**

Suprafluidität und Bose-Kondensation, Theorie wechselwirkender Bosonen (Bogoliubov, Gross-Pitaevskii), Quantenstatistik und Hanbury-Brown-Twiss Experiment, optische Gitter, Mott-Übergang, Bloch-Oszillationen, fermionische Kondensate und BCS-Theorie, Grundlagen der Quanteninformationstheorie, Bell'sche Ungleichung und Quantenteleportation, Verschränkung und Entropie, Quantenkryptographie, Schumacher-Codierungstheorem, Holevo-Bound, Quantenparallelismus und Quantencomputing, Grover-Algorithmus, Quanten-Fouriertransformation, Shor-Algorithmus, Quantenfehlerkorrektur

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

In diesem Modul lernen die Studierenden zentrale Themen der modernen Quantenphysik sowie ihre Anwendungen in der Quanteninformationsverarbeitung und dem Quantencomputing kennen. Die Vorlesung ist daher auch interessant als Vorbereitung für eine spätere Master/Bachelor Arbeit auf diesem Gebiet. Nach Absolvieren des Moduls kennen Studierende die Grundlagen der Quanten-Informationsverarbeitung und wichtige Algorithmen des Quantencomputing, beispielsweise den Shor-Algorithmus zur effizienten Faktorisierung großer Zahlen. Studierende können selbst Quanten-Schaltkreise entwerfen und auf Quantencomputern (z.B. IBM Quantum Experience) implementieren. Studierende kennen wichtige Anwendungen der quantenmechanischen Verschränkung wie die Quantenteleportation oder Quantenkryptographie, und sie können die Übertragung und Kompression von klassischer und quantenmechanischer Information in Quantenkanälen beschreiben. Studierende können wechselwirkende Quantenvielteilchensysteme theoretisch modellieren und ihre Quantenphasen und Dynamik beschreiben, insbesondere im Hinblick auf moderne Realisierungen in ultrakalten Quantensimulatoren.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–4*, *Theoretische Physik 1–5*, insbesondere zentrale Konzepte der Quantenmechanik (Schrödinger-Gleichung, Hilbertraum, Observablen) und der statistischen Physik (Dichteoperator, Ensembles, Temperatur, Entropie).

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Hofstetter |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |

| **Modulprüfung**<br>**Modulabschlussprüfung, benotet**<br>**bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Quanteninformation und Ultrakalte Atome (Quantum Information and Ultracold Atoms) | V+Ü | 4+2 | 8 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 6 | 8 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VTHQO** | **Theoretische Quantenoptik**<br>(Theoretical Quantum Optics) | Wahlpflicht-modul | 8 CP (insg.) = 240 h | | 6 SWS |
| | | | Kontaktstudium 6 SWS / 90 h | Selbststudium 150 h | |

**Inhalte**

Quantisierung und Kohärenzeigenschaften des elektromagnetischen Feldes, squeezed States, Phasenraumdarstellungen, Wigner-Funktion, Quantenmechanik offener Systeme, Lindblad- und Fokker-Planck-Gleichung, Quanten-Markov-Prozesse, Dekohärenz und Theorie der Messung, Quanteninformationsverarbeitung mit quantenoptischen Systemen, Cavity QED, Theorie des Lasers, Lichtkräfte, ultrakalte Quantengase

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

In diesem Modul lernen die Studierenden zentrale Themen der modernen Quantenoptik kennen. Die Vorlesung ist daher auch interessant als Vorbereitung für eine spätere Master/Bachelor Arbeit auf diesem Gebiet. Nach Absolvieren des Moduls können Studierende quantisierte elektromagnetische Felder und ihre Kohärenzeigenschaften theoretisch beschreiben, unter anderem mit semiklassischen Methoden (Phasenraumdarstellungen). Sie beherrschen die semiklassische und die quantisierte Beschreibung von stark wechselwirkenden Ensembles aus Atomen und Licht mit Hilfe des Rabi- und des Jaynes-Cummings-Modells. Studierende kennen Anwendungen quantenoptischer Systeme für Quantencomputing, beispielsweise in Ionenfallen. Studierende können offene Quantensysteme modellieren und ihre zeitliche Dynamik berechnen, beispielsweise mittels Quantenoperationen und der Lindblad-Mastergleichung. Studierende kennen das Phänomen der Dekohärenz und seine Bedeutung für den quantenmechanischen Messprozess. Sie sind mit Anwendungen quantenoptischer Konzepte, beispielsweise Lichtkräften, in ultrakalten Quantensimulatoren vertraut.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Veranstaltungen *Experimentalphysik 1–4*, *Theoretische Physik 1–4*, insbesondere zentrale Konzepte der Quantenmechanik (Schrödinger-Gleichung, Hilbertraum, Observablen)

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Hofstetter |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch oder Englisch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Theoretische Quantenoptik (Theoretical Quantum Optics) | V+Ü | 4+2 | 8 | Pf | X | X | (X) | (X) |
| Summe | | 6 | 8 | | | | | |

## 4.6 Plasmaphysik

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VTHPLAS** | **Theoretische Plasmaphysik**<br>(Theoretical Plasma Physics) | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

Grundlagen, Bewegung von Teilchen in elektromagnetischen Feldern, Wellen in Plasmen, Zweistrom-Instabilität, Fokker-Planck-Gleichung; Magnetohydrodynamik: Feldkonfigurationen, Wellen, Instabilitäten; stochastische Prozesse, Wechselwirkung von Teilchen mit Wellen; numerische Methoden.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Das Modul gibt einen elementaren Überblick über das theoretische Verständnis der Plasmen, ausgehend von der Bewegung von Teilchen in elektromagnetischen Feldern über kollektive Effekte bis hin zu Instabilitäten. Es hilft beim Zugang zu theoretischen und experimentellen Arbeiten im Bereich der Labor- und astrophysikalischen Plasmen.
Die Studenten erwerben ein grundlegendes Wissen über Vielteilcheneffekte in hochgradig nichtlinearen Situationen. Sie lernen, numerische Verfahren zu beurteilen und die Möglichkeit ihrer Anwendung in anderen Bereichen kritisch zu beurteilen.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Grundlagen der Theorie der Mechanik der Punktteilchen, der elementaren Hydrodynamik, und der elektromagnetischen Felder und Wellen.

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | unregelmäßig |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Jacoby |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Theoretische Plasmaphysik (Theoretical Plasma Physics) | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

## 4.7 Neurowissenschaften

| **VRLEARN** | **Reinforcement Learning** | Wahlpflicht-modul | 6 CP (insg.) = 180 h | | 4 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 4 SWS / 60 h | Selbststudium 120 h | |

**Inhalte**

Markov Decision Processes, Dynamic Programming, Monte Carlo Methods, Temporal Difference Learning, Value Functions, Bellman Equations, Function Approximation, Policy Gradient Methods, Deep Reinforcement Learning, Connection to Psychology and Neuroscience, Applications

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Dieses Modul bietet eine Einführung in die Theorie und Praxis des Gebiets Reinforcement Learning (Verstärkungslernen). Nach Absolvieren des Moduls sind die Studierenden in der Lage, selbstständig gegebene Probleme durch Anwendung geeigneter Lernalgorithmen zu lösen:

- Die Studierenden kennen alle wesentlichen Konzepte und Fachbegriffe und verstehen deren inhaltliche Zusammenhänge.
- Die Studierenden können Problemstellungen thematisch einordnen und mit den vermittelten Methoden analysieren.
- Die Studierenden können weiterführende Informationen zu einer gegebenen Fragestellung in Fachliteratur und Internet recherchieren.
- Die Studierenden können aktuelle wissenschaftliche Publikationen verstehen und wiedergeben.
- Die Studierenden besitzen das theoretische und praktische Rüstzeug, um ein gegebenes Problem selbstständig zu untersuchen und durch Anwendung geeigneter Algorithmen zu lösen.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Grundkenntnisse in Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | zweijährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Triesch |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Englisch |

| **Modulprüfung**<br>**Modulabschlussprüfung, benotet**<br>**bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Reinforcement Learning | V+Ü | 3+1 | 6 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 4 | 6 | | | | | |

# 5 Zusätzliche Wahlpflichtmodule des Masterstudiengangs mit Schwerpunkt *Computational Physics*

Folgende Module aus den Bereichen Meteorologie und Geowissenschaften können als Wahlpflichtmodule eingebracht werden (für Details siehe Modulhandbücher BSc/MSc Meteorologie, BSc/MSc Geowissenschaften):

- EMETA: Allgemeine Meteorologie
- EMETA: Allgemeine Klimatologie
- EMETB: Atmosphäric Dynamics 1
- EMETB: Atmospheric Dynamics 2
- EMETB: Introduction to IT and Programming
- METTH: Atmosphärendynamik 3
- METV: Numerische Wettervorhersage
- METV: Wetterbesprechung
- FATDYN: Fortgeschrittene Theorie der Atmosphärischen Dynamik und des Klimas 1: Stochastische Beschreibung atmosphärischer Prozesse
- FATDYN: Fortgeschrittene Theorie der Atmosphärischen Dynamik und des Klimas 2: Schwerewellen, Klimavariabilitäten oder ein anderes Thema der fortgeschrittenen Atmosphärendynamik
- METMK: Globale Klimaprozesse
- METMK: Regionale Klimaprozesse
- MWp Gph4: Numerische Methoden der Geodynamik
- BWp 6: Kristallstrukturbestimmung
- BWp 6: Kristallchemie
- BWp 6: Mineralphysik
- BWp 6: Kristallographisches Seminar
- MWp Gph1: Geodynamik: Plattentektonik und Rheologie
- MWp Gph1: Geodynamik: Fluiddynamik und Wärmetransport
- MWp Gph2: Einführung in die Seismologie
- MWp Min5: Computational Mineralogy with Empirical Models
- MWp Min5: Computational Mineralogy with Quantum Mechanical Models

Für die Teilnahme an diesen Importmodulen gelten die Regelungen des jeweiligen Herkunftsstudiengangs.

# 6 Schlüsselqualifikationsmodule

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **VIPY** | **Einführung in die Programmierung mit Python**<br>(Introduction to Programming with Python) | Schlüssel-qualifikati-onsmodul | 3 CP (insg.) = 90 h<br>Kontaktstudium 2 SWS / 30 h | Selbststudium 60 h | 2 SWS |

**Inhalte**

Installation von Python und Erweiterungspaketen, Umgang mit Kommandozeile und interaktiver Shell, Datentypen und -operationen, wesentliche Sprachelemente, Funktionen, Klassen, Exceptions, Verwendung von Erweiterungsmodulen: NumPy, SciPy, MatPlotLib, BioPython
Übungen zur selbstständigen Bearbeitung und Vertiefung des Stoffs mit anschließender Besprechung sind in die Vorlesung integriert.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

**Dieses Modul dient dem Erwerb von Schlüsselqualifikationen.**
*Ziele*: Der Umgang mit dem Computer ist in der Wissenschaft heute selbstverständlich, und die zusätzliche Kenntnis einer Programmiersprache ist außerordentlich hilfreich für die Durchführung der verschiedensten Tätigkeiten. Über die unmittelbare Nützlichkeit für die Arbeit hinaus fördert das Erlernen einer Programmiersprache das klare, logische, abstrakte Denken und Formulieren. Die Programmiersprache PYTHON ist frei verfügbar, leicht zu erlernen und im Wissenschaftsbetrieb zunehmend verbreitet. Das Modul vermittelt die Grundlagen von PYTHON mit einem Schwerpunkt auf Anwendungen in der Wissenschaft.
*Kompetenzen*: Die Studierenden kennen die wesentlichen Datentypen und Sprachkonstrukte und sind in der Lage, fertige Programme zu analysieren. Sie werden befähigt, für algorithmisch lösbare Aufgabenstellungen eigene Programme zu entwickeln. Sie können diese Kenntnisse auf studiumsrelevante Probleme anwenden, u.a. auf die Aufbereitung und Analyse von experimentellen Daten, die Datenvisualisierung sowie die Nutzung von Zusatzmodulen für wissenschaftliche Fragestellungen.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

prinzipiell keine; für die Veranstaltung wird empfohlen, einen eigenen Laptop mitzubringen

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Wille |
| **Studiennachweise** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme am Praktikum |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Programmieraufgaben |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |

**Modulprüfung**

keine

| **Organisatorische Hinweise** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Importmodul: Es gelten die Regelungen der Studienordnung für den BSc Biophysik. | | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Einführung in die Programmierung mit Python (Introduction to Programming with Python) | V+P | 1+1 | 3 | Pf | X | | | |
| Summe | | 2 | 3 | | | | | |

| VPFEI1 | **Patentrecht – Forschung – Entwicklung – Innovation I**<br>(Patent Law – Research – Development – Innovation I) | Schlüssel-qualifikati-onsmodul | 3 CP (insg.) = 90 h | | 2 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 2 SWS / 30 h | Selbststudium 60 h | |

**Inhalte**

Handhabung geistigen Eigentums am Beispiel der gewerblichen Schutzrechte, insbesondere des Patents. Erhalten, Verteidigen und Durchsetzen von Patenten. Staatliche Innovationspolitik, unternehmerische Forschung und Entwicklung, Technologiemanagement.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

**Dieses Modul dient dem Erwerb von Schlüsselqualifikationen.** In ihm werden grundlegende Kenntnisse über das Patentwesen erworben und die Kompetenz vermittelt, wissenschaftliche Forschung und Entwicklung in ein Unternehmensumfeld einzuordnen.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

keine

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Engel |
| **Studiennachweise** | |
| **Teilnahmenachweise** | keine |
| **Leistungsnachweise** | Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |

**Modulprüfung**

keine

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Patentrecht – Forschung – Entwicklung – Innovation I (Patent Law – Research – Development – Innovation I) | V | 2 | 3 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 2 | 3 | | | | | |

| VPFEI2 | **Patentrecht – Forschung – Entwicklung – Innovation II**<br>(Patent Law – Research – Development – Innovation II) | Schlüssel-qualifikati-onsmodul | 3 CP (insg.) = 90 h | | 2 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 2 SWS / 30 h | Selbststudium 60 h | |

**Inhalte**

Bewertung der Patentierbarkeit einer Entwicklung und des Schutzbereichs eines Patents. Innovationsmanagement, Hochtechnologie-Unternehmensgründungen, Kooperation Hochschule — Wirtschaft.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

**Dieses Modul dient dem Erwerb von Schlüsselqualifikationen.** In ihm werden Leitsätze wegweisender Entscheidungen zu Patentierbarkeit und des betrieblichen Innovationsmanagements vermittelt. Die Studierenden erwerben die Kompetenz zu entscheiden, welche Forschungsergebnisse patentierbar sind und wie man Patentschutz erlangt und durchsetzt. Außerdem erhalten sie einen Überblick darüber, wie der Übergang von der universitären Forschung zur kommerziellen Anwendung gestaltet werden kann.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt der Lehrveranstaltung *Patentrecht – Forschung – Entwicklung – Innovation I*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Engel |
| **Studiennachweise** | |
| **Teilnahmenachweise** | keine |
| **Leistungsnachweise** | Fachgespräch (ca. 30 Min.) oder Test |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |

**Modulprüfung**

keine

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Patentrecht – Forschung – Entwicklung – Innovation II (Patent Law – Research – Development – Innovation II) | V | 2 | 3 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 2 | 3 | | | | | |

# 7 Nebenfachmodule

## 7.1 Nebenfach Astronomie

| **ASTRO1** | **Astronomie I**<br>(Astronomy I) | Nebenfach-modul | 8 CP (insg.) = 240 h | | 6 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 6 SWS / 90 h | Selbststudium 150 h | |

| | |
|---|---|
| **Inhalte** | |
| Koordinatensysteme, Strahlung, Planetensystem, Energieerzeugung in der Sonne, Aufbau der Sonne | |
| **Lernergebnisse/Kompetenzziele** | |
| Das Modul bietet eine erste Einführung in die Astronomie. Der/die Studierende erlernen grundlegende Konzepte und Denkweisen der Astronomie. Themen sind Koordinatensysteme, Strahlung, Planetensystem, Energieerzeugung in der Sonne, Aufbau der Sonne. | |
| **Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls** | |
| keine | |
| **Empfohlene Vorkenntnisse** | |
| keine | |
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Reifarth |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Einführung in die Astronomie 1 (Introduction to Astronomy 1) | V+Ü | 4+2 | 8 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 6 | 8 | | | | | |

| **ASTRO2** | **Astronomie II**<br><br>(Astronomy II) | Nebenfach-modul | 8 CP (insg.) = 240 h | | 6 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 6 SWS / 90 h | Selbststudium 150 h | |

**Inhalte**

Sternentwicklung, Supernovae, Aufbau der Galaxis, Galaxien, Aktive Galaxien, Kosmologie

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Das Modul bietet eine weiterführende Einführung in die Astronomie. Der/die Studierende erlernen grundlegende Konzepte und Denkweisen der Astronomie. Themen sind Sternentwicklung, Supernovae, Aufbau der Galaxien, Aktive Galaxien, Kosmologie.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Der Inhalt der Veranstaltung *Einführung in die Astronomie I* ist hilfreich, aber nicht erforderlich.

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Reifarth |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Übung |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |
| **Modulprüfung** | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Einführung in die Astronomie 2 (Introduction to Astronomy 2) | V+Ü | 4+2 | 8 | Pf | X | | (X) | |
| Summe | | 6 | 8 | | | | | |

| **ASTRO3** | **Astronomie III**<br><br>(Astronomy III) | Nebenfach-modul | 13 CP (insg.) = 390 h | | 7 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 7 SWS / 105 h | Selbststudium 285 h | |

**Inhalte**

*Astronomisches Praktikum*: Computer- und Beobachtungspraktikum mit Beispielen, Simulationen und wichtigen softwaretools der Astronomie sowie einer Exkursion.

*Astronomische Spezialvorlesung*: zur Auswahl stehen Vorlesungen über Struktur und Dynamik der Sterne, Struktur und Dynamik der Galaxis, Struktur und Dynamik Extragalaktischer Systeme, Nukleare und Astroteilchenphysik, Allgemeine Relativitätstheorie, Kosmologie, Experimentelle Astrophysik

*Astronomisches Seminar*: Auswahl aus Spezialthemen der modernen Astronomie (siehe Auflistung unter Ziele des Moduls)

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Der/die Studierende vertiefen ihr Wissen in der Astronomie. In einem am Computer basierten Praktikum lernen sie interaktiv die Anwendung von Wissen aus den Modulen ASTRO1,2. Sie lernen wichtige Software- Werkzeuge des Faches kennen und trainieren den selbstständigen Umgang damit. Themengebiete sind: Klassifikation extragalaktischer und galaktischer Objekte anhand spektraler Eigenschaften. Modellierung von Röntgenspektren aktiver galaktischer Kerne. Entfernungsbestimmung von Cepheiden. Hertzsprung - Russel Diagramm. Berechnungen zu Planetenbahnen und Koordinatensystemen. Dunkle Materie in der Milchstraße. Schließlich wählen sie aus einem Angebot von Spezialvorlesungen einen Themenbereich aus, in dem sie vertieftes Wissen erwerben wollen. In einem Seminar erarbeiten sie eigenständig ein Teilgebiet der Astronomie und üben die Präsentation in einem Seminarvortrag.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Der Inhalt der Veranstaltungen *Einführung in die Astronomie I–II* ist hilfreich, aber nicht erforderlich.

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Reifarth |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme am Praktikum und am Seminar |
| **Leistungsnachweise** | Abgabe und Bestehen von Praktikumsprotokollen im *Astronomischen Praktikum* (weitere Details werden in der Praktikumsordnung festgelegt), Seminarvortrag im Rahmen des *Astronomischen Seminars* |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Praktikum, Vorlesung, Seminar |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |

| **Modulprüfung**<br>**Modulabschlussprüfung, benotet**<br>**bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Astronomisches Praktikum (Lab Class Astronomy) | P | 3 | 6 | Pf | | X | | (X) |
| Astronomische Spezialvorlesung (Special Topics in Astronomy) | V | 2 | 3 | Pf | X | | (X) | |
| Astronomisches Seminar (Astronomy Seminar) | S | 2 | 4 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 7 | 13 | | | | | |

## 7.2 Nebenfach Elektronik

Das Nebenfach Elektronik besteht aus zwei konsekutiven Modulen, die beide erfolgreich absolviert werden müssen. Von der Teilnahme an ELEK-D kann abgesehen werden, falls der oder die Studierende ein inhaltsgleiches Modul vorweisen kann, z.B. die Kombination der Module B-RTKS mit B-HWS-PR des BSc Informatik. Soweit letztgenannte Module bereits als Nebenfachmodule eingebracht wurden, werden für das Nebenfach Elektronik nur die CP und die Note des Moduls ELEK-A berücksichtigt. Das Nebenfach kann jederzeit im Studienverlauf begonnen werden.

| **ELEK-A** | **Analogelektronik**<br><br>(Analog Electronics) | Nebenfach-modul | 9 CP (insg.) = 270 h | | 6 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 6 SWS / 83 h | Selbststudium 187 h | |

**Inhalte**

*Elektronik und Sensorik I*: Die Vorlesung *Elektronik und Sensorik I* bietet eine umfassende Einführung in die Grundlagen der Analog-Elektronik. Dabei werden die wichtigsten elektronischen Bauelemente und ihre Grundschaltungen behandelt. Einige Themenschwerpunkte sind: Passive Netzwerke, Grundlagen der Halbleiterdiode, Feldeffekt- und Bipolarer Transistor, Dioden- und Transistorschaltungen, Operationsverstärker, Schaltungssimulation.

*Elektronik und Sensorik II*: Die Vorlesung *Elektronik und Sensorik II* bietet, aufbauend auf die Vorlesung *Elektronik und Sensorik I*, eine umfassende Einführung in die Grundlagen der Analog-Elektronik. Dabei werden die wichtigsten elektronischen Bauelemente und ihre Grundschaltungen behandelt. Einige Themenschwerpunkte sind: Passive Netzwerke, Grundlagen der Halbleiterdiode, Feldeffekt- und Bipolarer Transistor, Dioden- und Transistorschaltungen, Operationsverstärker, Schaltungssimulation. Kern des Praktikums ist es, den Studierenden den Einsatz der wichtigsten Baugruppen der analogen Elektronik zu vermitteln und den Aufbau einfacher Schaltungen der Analogelektronik zu üben.

*Elektronikpraktikum (Analogteil)*: Ladungstransport, Signale, lineare passive Netzwerke, physikalische Grundlagen der Halbleiter-Bauelemente, Diodenschaltungen, bipolare und FET-Transistoren, Gegenkopplung

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Die Studierenden erlernen grundlegende Konzepte des Faches und erwerben die Kompetenz zur eigenständigen Analyse elektronischer Bauelemente sowie zur Analyse und zum Aufbau elektronischer Schaltungen. Insbesondere im Rahmen des Praktikums sollen Fertigkeiten wie selbständiger Aufbau und Dimensionierung elektronischer Schaltungen, eigenständiges Lösen von Problemen sowie die Fähigkeit zur Dokumentation und Präsentation von Messergebnissen erworben werden.
Das Modul richtet sich an Studierende aller Semester.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

keine

**Empfohlene Vorkenntnisse**

keine

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Fröhlich |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | | | | | | | | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Übungen und Praktika | | | | | | | |
| **Leistungsnachweise** | erfolgreiche Bearbeitung von Übungsaufgaben, Abgabe und Bestehen von Praktikumsprotokollen (Die Leistungsnachweise können nachgereicht werden, müssen also bei der Anmeldung zur Modulabschlussprüfung noch nicht vorliegen; weitere Details werden in der Praktikumsordnung festgelegt) | | | | | | | |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise | | | | | | | |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen, Übung, Praktikum | | | | | | | |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch | | | | | | | |
| **Modulprüfung** | | | | | | | | |
| **Modulabschlussprüfung, benotet** | | | | | | | | |
| **bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Elektronik und Sensorik I (Electronics and Sensorics I) | V+Ü | 2+1 | 4 | Pf | X | | (X) | |
| Elektronik und Sensorik II (Electronics and Sensorics II) (die Lehrveranstaltung erstreckt sich in der Form V1 über die 1. Hälfte des Semesters) | V | 0.5 | 1 | Pf | | X | | (X) |
| Elektronikpraktikum (Analogteil) (Lab Class Analog Electronics) (die Lehrveranstaltung erstreckt sich in der Form P4 über die 1. Hälfte des Semesters) | P | 2 | 4 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 5.5 | 9 | | | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **ELEK-D** | **Digitalelektronik**<br><br>(Digital Electronics) | Nebenfach-modul | 8 CP (insg.) = 240 h | | 5 SWS |
| | | | Kontaktstudium 5 SWS / 68 h | Selbststudium 172 h | |

**Inhalte**

*Digitale Elektronik I*: In der Vorlesung *Digitale Elektronik I* werden zunächst die für das Digitalelektronikpraktikum benötigten Kenntnisse vorbereitet, so werden z.B. die boolsche Algebra, digitale Bauelemente, Zustandsautomaten, und die einzelnen Logikfamilien eingeführt. Hierbei wird Wert auf die praxisnahe Gestaltung der Vorlesung gelegt.

*Digitale Elektronik II*: In der Vorlesung "Digitalelektronik II" werden die Themen boolsche Algebra, digitale Bauelemente, Zustandsautomaten, und die einzelnen Logikfamilien vertieft. Die Vorlesung ist ergänzend zum Praktikum und dient zur Diskussion der konkreten Projekte.

*Elektronikpraktikum (Digitalteil)*: In dem Praktikum, das durch eine ergänzende Vorlesung „Digitalelektronik II"zur Diskussion der konkreten Projekte begleitet wird, werden die Studierenden zunächst durch den Aufbau von Schaltungen mit diskreten Bauelementen an die Materie herangeführt, so dass diese dann mit VHDL ein eigenständiges Projekt mit programmierbarer Logik definieren und implementieren können.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

Den Studierenden wird ein grundlegendes Verständnis der Funktionsweise digitaler Schaltungen vermittelt, um in der Lage zu sein, zukünftige vertiefende Arbeiten und Aufgabenstellungen auf dem Gebiet sicher einzuordnen. Im Vordergrund des Praktikums steht die selbstständige Anwendung des Erlernten durch die selbständige Durchführung eines in Teamarbeit frei zu gestaltenden Projektes. Das Modul richtet sich an Studierende aller Semester.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

Modul Elek-A oder gleichwertige Vorkenntnisse. Das Praktikum kann ohne die gleichzeitige Teilnahme an den Vorlesungen *Digitale Elektronik I,II* oder eine bereits erfolgte erfolgreiche Modulabschlussprüfung für das Modul ELEK-D nicht begonnen werden.

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalt des Moduls ELEK-A

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | einsemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Fröhlich |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme am Praktikum |
| **Leistungsnachweise** | Abgabe und Bestehen von Praktikumsprotokollen (Die Leistungsnachweise können nachgereicht werden, müssen also bei der Anmeldung zur Modulabschlussprüfung noch nicht vorliegen; weitere Details werden in der Praktikumsordnung festgelegt) |
| **Prüfungsvorleistungen** | Erbringen aller Leistungsnachweise |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesungen, Übung, Praktikum |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch |

| **Modulprüfung**<br>**Modulabschlussprüfung, benotet**<br>**bestehend aus:** | mündliche Prüfung (ca. 30 Min.) oder Klausur (90 Min.) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Digitale Elektronik I (Digital Electronics I) | V | 2 | 3 | Pf | | X | | (X) |
| Digitale Elektronik II (Digital Electronics II)<br>(die Lehrveranstaltung erstreckt sich in der Form V1 über die 2. Hälfte des Semesters) | V | 0.5 | 1 | Pf | | X | | (X) |
| Elektronikpraktikum (Digitalteil) (Lab Class Digital Electronics)<br>(die Lehrveranstaltung erstreckt sich in der Form P4 über die 2. Hälfte des Semesters) | P | 2 | 4 | Pf | | X | | (X) |
| Summe | | 4.5 | 8 | | | | | |

## 7.3 Nebenfach Didaktik der Physik

Für das Nebenfach Physikdidaktik im Rahmen des Masterstudiums Physik ist das Absolvieren des Moduls Physikdidaktik 2 verpflichtend, falls im Bachelorstudium Physik bereits Physikdidaktik als Nebenfach gewählt wurde. Anderenfalls ist das Absolvieren des Moduls Physikdidaktik 1 verpflichtend, das Modul Physikdidaktik 2 optional.

| **DIDA1** | **Physikdidaktik 1** | Nebenfach-modul | 13 CP (insg.) = 390 h | | 8 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | (Didactics of Physics 1) | | Kontaktstudium 8 SWS / 120 h | Selbststudium 270 h | |
| **Inhalte** | | | | | |
| Ausgewählte fachdidaktische und methodische Themen wie Schülervorstellungen, Elementarisierung, Modellbildung, Experimentieren und exemplarische Anwendung im Physikunterricht. | | | | | |
| **Lernergebnisse/Kompetenzziele** | | | | | |
| Die Teilnehmer erwerben zu den verschiedenen Inhaltsbereichen handlungsrelevantes Wissen, das es ihnen erlaubt, diese Inhalte in die Gestaltung von Lehr-Lern-Umgebungen verantwortungsvoll, reflektiert und im Anschluss an wissenschaftliche Erkenntnisse einzubeziehen. Ferner erlangen sie im Sinne des exemplarischen Lernens Kompetenzen in der Erschließung zukünftig neuer naturwissenschaftsdidaktischer Inhaltsbereiche und ihrer Vernetzung mit bestehenden Wissens- und Kompetenzbereichen. | | | | | |
| **Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls** | | | | | |
| keine | | | | | |
| **Empfohlene Vorkenntnisse** | | | | | |
| keine | | | | | |
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik | | | | |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik | | | | |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich | | | | |
| **Dauer** | zweisemestrig | | | | |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Wilhelm | | | | |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | | | | | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an den Seminaren und dem Praktikum | | | | |
| **Leistungsnachweise** | keine | | | | |
| **Prüfungsvorleistungen** | keine | | | | |
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Praktikum, Seminare | | | | |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch | | | | |
| **Modulprüfung** | | | | | |
| **kumulative Modulprüfung, benotet** | | | | | |
| **bestehend aus:** | eine Klausur (90 Min.) zu den Inhalten der beiden Lehrveranstaltungen LV1 und LV2, Protokolle und Ausarbeitung in LV3, Hausarbeit oder Präsentation und Ausarbeitung in LV4 | | | | |
| **Bildung der Modulnote:** | nach CP gewichtetes, arithmetisches Mittel der Einzelnoten | | | | |

| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Einführung in die Physikdidaktik für L3 (Introduction to Didactics of Physics for L3) | V | 2 | 3 | Pf | X | | (X) | |
| Fachdidaktische Vertiefung der klassischen Physik (Didactics of Classical Physics) | S | 2 | 2 | Pf | | X | | (X) |
| Physikalisches Praktikum Optik L2 (Lab Class Optics L2) | P | 3 | 5 | Pf | | X | | (X) |
| Physikdidaktische Wahlpflichtveranstaltung (Required Elective Course Didactics of Physics) | S | 2 | 3 | Pf | | X | (X) | (X) |
| Summe | | 9 | 13 | | | | | |

| **DIDA2** | **Physikdidaktik 2**<br><br>(Didactics of Physics 2) | Nebenfach-modul | 14 CP (insg.) = 420 h | | 9 SWS |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Kontaktstudium 9 SWS / 135 h | Selbststudium 285 h | |

**Inhalte**

*Fachdidaktische Vertiefung der Modernen Physik*: Grundlagen der Atomphysik, Kernphysik und Festkörperphysik; Grundlagen der Quantenphysik, Relativitätstheorie und Astrophysik; fachdidaktische Anforderungen an das Kommunizieren und Lehren im Themenfeld Moderne Physik.

*Methodik des Physikunterrichts*: Die Studierenden entwickeln Unterrichtsmaterialien unter Anwendung verschiedener methodischer Konzepte und Unterrichtsformen. Darauf basierend konzipieren sie eine konkrete Unterrichtseinheit zu einem ausgewählten Schwerpunkt.

*Praktikum Experimentelle Demonstrationen*: Grundlegende Experimente des Physikunterrichts der Sekundarstufe I und II; Gerätekunde schultypischer Geräte; Zielsetzung und didaktisches Potential von Demonstrationsexperimenten, Schülerexperimenten, Freihandexperimenten, Modellexperimenten, etc.; rechnergestütztes Experimentieren und computerbasierte Messwerterfassung; Präsentation von Experimenten; Sicherheit im Physikunterricht.

**Lernergebnisse/Kompetenzziele**

*Fachdidaktische Vertiefung der modernen Physik*: Die Studierenden verfügen über ein grundlegendes Fachwissen zu den aufgeführten Themen und können dies in unterschiedlichen Kontexten anwenden. Die Studierenden kennen typische Lernschwierigkeiten aus den betreffenden Themenbereichen und können Folgerungen für Elementarisierungen, fachliche Reflektionen und Unterricht ziehen.
*Methodik des Physikunterrichts*: Die Studierenden kennen fachdidaktische Theorien und Forschung für Lehren und Lernen. Sie können fachdidaktische Ansätze zur Konzeption von Unterrichtsprozessen erläutern und in exemplarischen Unterrichtsentwürfen mit Blick auf Medienpädagogik umsetzen. Sie können schulische und außerschulische Praxisfelder erfassen und kritisch analysieren, sowie fachspezifische Lernschwierigkeiten berücksichtigen und Fördermöglichkeiten entwickeln.
*Experimentelle Demonstrationen*: Die Studierenden kennen Kategorien von Experimenten, ihre Funktion und ihr didaktisches Potential. Sie können mit handels- und schulüblichen Lehrgeräten und Experimentiermaterialien kompetent umgehen und Strategien zur systematischen Analyse von Fehlerquellen beim eigenen Experimentieren entwickeln. Sie können Experimente lernziel- und schülerorientiert auswählen, aufbauen und präsentieren.

**Teilnahmevoraussetzungen für Modul bzw. einzelne Veranstaltungen des Moduls**

erfolgreicher Abschluss des Moduls *Physikdidaktik 1*

**Empfohlene Vorkenntnisse**

Inhalte des Moduls *Physikdidaktik 1*

| | |
|---|---|
| **Zuordnung (Studiengang/Fachbereich)** | BSc Physik, MSc Physik / FB Physik |
| **Verwendbarkeit** | BSc Physik, MSc Physik |
| **Häufigkeit des Angebots** | jährlich |
| **Dauer** | zweisemestrig |
| **Modulbeauftragte / Modulbeauftragter** | Korneck |
| **Studiennachweise / Prüfungsvorleistungen** | |
| **Teilnahmenachweise** | regelmäßige Teilnahme an Seminar und Praktikum |
| **Leistungsnachweise** | keine |
| **Prüfungsvorleistungen** | keine |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Lehr- / Lernformen** | Vorlesung, Praktikum, Seminar | | | | | | | |
| **Unterrichts- / Prüfungssprache** | Deutsch | | | | | | | |
| **Modulprüfung** | | | | | | | | |
| **kumulative Modulprüfung, benotet** | | | | | | | | |
| **bestehend aus:** | Hausarbeit oder Präsentation und Ausarbeitung in LV2 und LV3 | | | | | | | |
| **Bildung der Modulnote:** | nach CP gewichtetes, arithmetisches Mittel der Einzelnoten | | | | | | | |
| **Lehrveranstaltungen des Moduls** | LV-Form | SWS | CP | Pf/ WP | Semester | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Fachdidaktische Vertiefung der Modernen Physik (Didactics of Modern Physics) | S | 2 | 3 | Pf | | X | | (X) |
| Methodik des Physikunterrichts (Methods for School Physics) | S | 3 | 4 | Pf | X | | (X) | |
| Praktikum Experimentelle Demonstrationen (Lab Class Demonstration Experiments) | P | 4 | 7 | Pf | X | X | (X) | (X) |
| Summe | | 9 | 14 | | | | | |

# Index 1: Modulkürzel

ASTRO1, 170
ASTRO2, 171
ASTRO3, 172

BPH3N, 97

DIDA1, 178
DIDA2, 180

ELEK-A, 174
ELEK-D, 176
ELMIK, 98
EP, 8

FS, 7

MA, 9

PEXFL, 4
PHL, 11

SMSC, 5

VAGR, 21
VANAHEP, 51
VANAHEP2, 52
VART, 20
VARTC, 23
VASTBIO, 127
VCADS, 111
VCPPML, 113
VCPSM, 110
VDFT, 146
VDP, 49
VDRIDE, 141
VEBP, 95
VEFRG, 150
VEXFP1, 58
VEXFP2, 60
VFRG, 139
VFSTATP, 144
VGWAV, 129
VHEX, 14
VHQM, 12
VHSTATP, 107
VHYDRO, 133
VHYMAG, 125
VIPY, 166
VIQMPT, 121
VKATOM, 71
VKBEK, 83
VKBEP, 81
VKBPHM, 100
VKEXASTM, 30
VKEXFPM, 68
VKHEPM, 54
VKOED, 115
VKOSMO, 25
VKPHSM, 75
VKPLAM, 86
VKRISZ, 62
VKT1, 42
VKT2, 43
VKT3, 45
VKT4M, 47
VKTECM, 90
VKTHASTM, 26
VKTHFPM, 152
VMSDA, 123
VNGTD, 117
VNLQM, 18
VNUMP, 109
VPFEI1, 168
VPFEI2, 169
VPSOC, 16
VQFT1, 38
VQFT2, 40
VQI, 119
VQMD, 148
VQMPT, 143
VRLEARN, 163
VSELFORG, 112
VSKTG1, 135
VSKTG2, 137
VSTAFT, 132
VSTATP, 130
VTHFP1, 64
VTHFP2, 66
VTHKP1, 34
VTHKP2, 36
VTHNEU, 103
VTHNEU2, 105
VTHPLAS, 161
VTHQO, 159
VUKQG, 157
VVAK, 79

# Index 2: Modultitel

Advanced General Relativity, 21
Advanced Introduction to C++, Scientific Computing and Machine Learning, 113
Advanced Theoretical Neuroscience, 105
Allgemeine Relativitätstheorie, 20
Allgemeine Relativitätstheorie mit dem Computer, 23
Analogelektronik, 174
Analysemethoden der Experimentellen Hochenergiephysik, 51
Astrobiologie, 127
Astronomie I, 170
Astronomie II, 171
Astronomie III, 172

Beschleunigerkonzepte, 83
Beschleunigerphysik, 81
Biophysik 3: Methoden, 97

Complex Adaptive Dynamical Systems, 111
Computational Physics and Simulations in Matlab, 110

Density Functional Theory, 146
Die Funktionale Renormierungsgruppe und ihre Anwendung auf QCD und Gravitation, 139
Digitalelektronik, 176

Einführung in die Biophysik, 95
Einführung in die Funktionale Renormierungsgruppe, 150
Einführung in die Programmierung mit Python, 166
Einführung in die Quantenfeldtheorie und das Standardmodell der Teilchenphysik, 38
Einführung in die Theoretische Festkörperphysik, 64
Einführung in die Theoretische Kern- und Elementarteilchenphysik I, 34
Einführung in die Theoretische Kern- und Elementarteilchenphysik II, 36
Elektronenmikroskopie mit Bildverarbeitung, 98
Erarbeiten eines Projekts, 8
Experimentelle Festkörperphysik 1, 58
Experimentelle Festkörperphysik 2, 60

Fachliche Spezialisierung, 7
Forschungs- und Laborpraktikum, 4
Fortgeschrittene Analysemethoden der Experimentellen Hochenergiephysik, 52
Fortgeschrittene Quantenfeldtheorie und Quantenchromodynamik, 40
Fortgeschrittene Statistische Physik: Nichtgleichgewicht, kritische Phänomene und Renormierungsgruppe, 144

Gravitationswellen, 129
Grundlagen der Kristallzüchtung, 62

Höhere Quantenmechanik, 12
Höhere Statistische Physik: Vielteilchensysteme im Nicht-Gleichgewicht, 107
Höhere Experimentalphysik, 14
Hydrodynamics and Magnetohydrodynamics , 125
Hydrodynamik und Transporttheorie, 133

Introduction to Quantum Many-Particle Theory, 121

Kern- und Teilchenphysik 4 für MSc-Studierende, 47
Kosmologie, 25
Kovariante Elektrodynamik und spezielle Relativitätstheorie, 115

Masterarbeit, 9
Masterseminare, 5
Modern Statistical Data Analysis for Practitioners, 123

Nichtgleichgewichtsthermodynamik, 117
Numerische Methoden der Physik, 109

Patentrecht – Forschung – Entwicklung – Innovation I, 168
Patentrecht – Forschung – Entwicklung – Innovation II, 169
Photonik und Spektroskopie für MSc-Studierende, 75
Physik der Teilchendetektoren, 49
Physik sozio-ökonomischer Systeme mit dem Computer, 16
Physik von Driftdetektoren, 141
Physikdidaktik 1, 178
Physikdidaktik 2, 180
Praktikum Hochleistungsrechnen, 11

Quanteninformation und Ultrakalte Atome, 157
Quantenwahrscheinlichkeit und Informationsverarbeitung, 119
Quantum Molecular Dynamics, 148
Quantum Theory from a Nonlinear Perspective, 18
Quarkstruktur der Materie, 42

Reinforcement Learning, 163

Schwache Wechselwirkung und fundamentale Symmetrien, 43

Self-Organization: Theory and Simulations, 112
Spezielle Themen der angewandten und technischen Physik für MSc-Studierende, 90
Spezielle Themen der Atomphysik für MSc-Studierende, 71
Spezielle Themen der Biophysik für MSc-Studierende, 100
Spezielle Themen der experimentellen Astrophysik für MSc-Studierende, 30
Spezielle Themen der experimentellen Festkörperphysik für MSc-Studierende, 68
Spezielle Themen der Kern- und Elementarteilchenphysik für MSc-Studierende, 54
Spezielle Themen der Plasmaphysik für MSc-Studierende, 86
Spezielle Themen der theoretischen Astrophysik für MSc-Studierende, 26
Spezielle Themen der theoretischen Festkörperphysik für MSc-Studierende, 152
Starke Kernkraft und Kernmodelle, 45
Statistische Feldtheorie, 132
Statistische Physik und kritische Phänomene, 130

Theoretical Neuroscience, 103
Theoretische Plasmaphysik, 161
Theoretische Quantenoptik, 159
Theorie des Magnetismus, der Supraleitung und der elektronischen Korrelationen, 66

Vakuumphysik, 79
Vielteilchenphysik, 143
Von der Quantenfeldtheorie zu semiklassischen Transportgleichungen I: Vielteilchensysteme im thermischen Gleichgewicht, 135
Von der Quantenfeldtheorie zu semiklassischen Transportgleichungen II: Vielteilchensysteme im Nichtgleichgewicht, 137