EBERHARD KARLS
UNIVERSITÄT
TÜBINGEN

Mathematisch-
Naturwissenschaftliche
Fakultät

Fachbereich Mathematik

Modulhandbuch

Mathematical Physics

Master of Science

Wintersemester 2024

Stand: 22. November 2024

Inhaltsverzeichnis

1 Beschreibung des Studiengangs

1.1 Konzept des Studiengangs

Der zweijährige wissenschaftlich-forschungsorientierte internationale Studiengang Master of Science Mathematical Physics wird gemeinsam von den Fachbereichen Mathematik und Physik angeboten und kann jährlich im Wintersemester begonnen werden. Er richtet sich an Studierende mit einem soliden Basiswissen sowohl im Bereich der Mathematik als auch im Bereich der Physik, und setzt einen Bachelorabschluss im Fach Mathematik oder Physik in einem Bachelorstudiengang mit einer Regelstudienzeit von sechs Semestern oder einen gleichwertigen Abschluss voraus. Die Disziplin Mathematische Physik beschäftigt sich mit der mathematisch rigorosen Formulierung und Analyse physikalischer Theorien und Modelle. In dem Master-Studium Mathematical Physics vertiefen die Absolventinnen und Absolventen daher ihre fachwissenschaftlichen Kenntnisse und Kompetenzen in der Mathematik und der Physik sowohl in interdisziplinären Veranstaltungen zur Mathematischen Physik als auch in disziplinären Veranstaltungen beider Fächer. Sie sind anschließend in besonderer Weise vorbereitet für Arbeitsfelder, bei denen typisch mathematische Kompetenzen im Zusammenwirken mit physikalischen Anwendungen gefragt sind.

Der Studiengang ist international sowohl von Seiten der Studierenden als auch von Seiten der Dozierenden und kann nicht ohne Englischkenntnisse studiert werden, da die Grundlagenmodule ausschließlich in englischer Sprache angeboten werden. Vorausgesetzt werden deshalb englische Sprachkenntnisse auf dem Niveau B2 nach dem Gemeinsamen Europäischen Referenzrahmen für Sprachen (GER), wie sie z. B. mit Englisch in der Schule bis zum Abitur erworben werden. Der Studiengang ist vollständig auf Englisch studierbar, wobei abhängig vom Lehrangebot je Semester unter Umständen Einschränkungen bei der Modulwahl gegeben sein können.

1.2 Qualifikationsziele

Die Absolventinnen und Absolventen beherrschen theoretische Erklärungsansätze, Prinzipien und Methoden sowohl der Mathematik als auch der Theoretischen Physik. Sie verknüpfen physikalische Fragestellungen und ihre mathematische Modellierung und sind in der Lage, die Relevanz und Adäquatheit der mathematischen Modellierung und der daraus abgeleiteten mathematischen Resultate einzuordnen und zu hinterfragen. Sie können den aktuellen Forschungsstand im Bereich ihrer Spezialisierung wiedergeben und kritisch hinterfragen. Ihr vertieftes Wissen können die Absolventinnen und Absolventen für die Entwicklung und Lösung eigener Forschungsideen einsetzen. Sie können die Resultate ihrer Forschungsarbeiten vor einem wissenschaftlichen Publikum sowohl schriftlich als auch mündlich präsentieren, erläutern und vertiefend diskutieren. Im Rahmen der Seminare und des Moduls Mathematical Physics Colloquium üben die Studierenden zusätzlich zu den fachlichen Inhalten die Zusammenarbeit und den wissenschaftlichen Diskurs in interdisziplinär und international gemischten Gruppen.

Durch ihre Ausbildung in der Mathematischen Physik haben die Absolventinnen und Absolventen die Voraussetzungen dafür erworben, mathematische Modellierungsaufgaben sowohl in der Physik als auch in anderen Bereichen - wie beispielsweise der Technik oder den Wirtschaftswissenschaften - nach Einarbeitung in die spezielle Thematik professionell und erfolgreich zu bearbeiten. Sie sind überdies bestens auf die interdisziplinäre und internationale Zusammenarbeit in fachlich und kulturell gemischten Teams vorbereitet, wie sie heutzutage in allen Bereichen der Forschung und Entwicklung verbreitet sind.

1.3 Struktur des Studiengangs

Die Studierenden vertiefen sich im Studiengang M.Sc. Mathematical Physics in einem mathematischen Gebiet, das sich mit Fragen der Grundlagenforschung an der Schnittstelle zwischen Mathematik und Physik beschäftigt. Die Studierenden erbringen mindestens Leistungen im Umfang von 63 Leistungspunkten in diesem Studienschwerpunkt. Das schließt das Modul Scientific Project und die Masterarbeit ein. Die Studierenden werden zunächst durch vertiefende Vorlesungen und dann durch angeleitetes Selbststudium bis an die aktuelle Forschung herangeführt. In der Masterarbeit ist eine wissenschaftliche Fragestellung in Abstimmung mit dem Betreuer zu formulieren und weitgehend selbständig zu bearbeiten. Dies schließt die eigenständige Suche nach geeigneter Literatur, deren Auswertung, die Formulierung geeigneter methodischer Ansätze sowie die Darstellung der Projektergebnisse ein. Die Studierenden stellen in dieser Endphase des Studiums die Ergebnisse ihrer Masterarbeit im Mathematical Physics Colloquium vor und erhalten durch die Teilnahme an Vorträgen internationaler Gäste und lokaler Experten weitere Einblicke in aktuelle Forschungsthemen der Mathematischen Physik. Die Studierenden können sich in ihrem Studium sehr frei in der Mathematischen Physik, der Mathematik oder der Theoretischen Physik durch die freie Wahl entsprechender Kurse vertiefen. Neben den Pflichtmodulen des Abschnitts Grundlagen der Mathematischen Physik ist die einzige Einschränkung, dass im Abschnitt Erweiterungswissen mindestens je neun Leistungspunkte aus der Mathematik und aus der Theoretischen Physik, die nicht zur Mathematischen Physik gehören, eingebracht werden müssen, um die notwendige Breite des Studiums sicherzustellen. Die Studierenden haben dadurch zudem Studien auf dem Masterniveau in den Bereichen Mathematik und Theoretischen Physik nachgewiesen.

Die Regelstudienzeit für den Abschluss Master of Science Mathematical Physics beträgt vier Semester (120 Leistungspunkte). Dieses Studium wird mit der Masterarbeit (M.Sc. Thesis, 30 Leistungspunkte) abgeschlossen.

1.4 Mentorinnen und Mentoren, Studien- und Prüfungspläne

Jeder und jedem Studierenden wird mit Aufnahme des Studiengangs eine Mentorin oder ein Mentor aus der Gruppe der am Studiengang beteiligten Dozentinnen und Dozenten zur Seite gestellt. Mit dieser Mentorin oder diesem Mentor trifft sich die oder der Studierende zu Beginn des Studiums, um einen persönlichen Studien- und Prüfungsplan zu erstellen, der alle im Studium geplanten Module enthält. Der Studien- und Prüfungsplan ist der oder dem Vorsitzenden des Prüfungsausschusses zur Prüfung vorzulegen. In den Folgesemestern trifft sich die oder der Studierende jeweils mindestens einmal mit seiner Mentorin oder seinem Mentor, um den Studien- und Prüfungsplan anzupassen. Die angepassten Studien- und Prüfungspläne sind wieder zur Genehmigung vorzulegen. Durch dieses verpflichtende Mentoringprogramm wird sichergestellt, dass sich die Studierenden zielgerichtet spezialisieren und dahingehend sinnvolle Kombinationen aus Mathematik- und Physikveranstaltungen wählen.

Bei der Erstellung oder Anpassung des Studien- und Prüfungsplans kann auch ein sinnvolles Zeitfenster für einen Studienanteil an einer ausländischen Hochschule eingeplant werden. Grundsätzlich eignet sich hierfür jedes Fachsemester. Die Entscheidung wird im Einzelnen von den bereits erbrachten Leistungen der oder des Studierenden und dem Angebot an der gewählten ausländischen Hochschule abhängen. Auch die Erstellung der Masterarbeit während des Auslandsaufenthaltes und unter Kobetreuung durch eine dortige Lehrende oder einen dortigen Lehrenden ist möglich.

1.5 Informationen für Studieninteressierte mit dem Abschluss Bachelor of Science Physik an der Universität Tübingen

Studierende des 4-jährigen Studiengangs Bachelor of Science Physik an der Universität Tübingen haben die Möglichkeit, schon während des Bachelorstudiums bis zu 60 Leistungspunkte zu erwerben, die für den Master of Science Mathematical Physics anerkannt werden können, wenn die im Bachelorstudium bestehende Wahlfreiheit geeignet genutzt wird.

Insbesondere können

- das Basismodul BMTPKFT Klassische Feldtheorie aus dem Bachelor of Science Physik mit 9 Leistungspunkten als Modul MAT-40-32 Advanced Topics in Theoretical Physics im Master of Science Mathematical Physics und
- 21 Leistungspunkte aus dem Vertiefungsfach im Bachelor of Science Physik bei passender Auswahl im Abschnitt Freier Wahlpflichtbereich im Master of Science Mathematical Physics anerkannt werden.

Weiterhin können

- bis zu 27 Leistungspunkte aus dem Abschnitt Ergänzungsmodule im Bachelor of Science Physik durch die Module MAT-65-11 Geometry in Physics, MAT-65-12 Mathematical Quantum Theory, MAT-65-13 Mathematical Relativity oder MAT-65-14 Mathematical Statistical Physics erbracht werden und
- die Bachelorarbeit kann als Scientific Project mit 9 Leistungspunkten angerechnet werden.

Um den Studiengang Master of Science Mathematical Physics im Anschluss an den 4-jährigen Studiengang Bachelor of Science Physik an der Universität Tübingen innerhalb eines Jahres abschließen zu können, wird daher empfohlen, bei der Wahl der Veranstaltungen im Vertiefungsfach darauf zu achten, dass es sich um fortgeschrittene Veranstaltungen der Theoretischen Physik handelt, die im Studiengang Master of Science Mathematical Physics dann im Abschnitt Freier Wahlpflichtbereich anerkannt werden können. Weiterhin wird empfohlen, im Abschnitt Ergänzungsmodule des Bachelorstudiums mindestens zwei der Module MAT-65-11, MAT-65-12, MAT-65-13 oder MAT-65-14 des Studiengangs Master of Science Mathematical Physics zu belegen. Sinnvoll wären hier die Kombinationen MAT-65-11 + MAT-65-13 und MAT-65-12 + MAT-65-14. Möglich wären auch MAT-65-11 und MAT-65-12.

2 Studienverlaufsplan

2.1 Übersicht nach Modulen

Wir geben hier eine Übersicht über den Studienverlauf in Form einer Tabelle, die die im Studiengang zu belegenden Module aufzeigt.

Empfohlenes Fachsemester	Modulnummer	Modultitel	Art der Veranstaltungen	Art des Moduls	Studienleistung	Prüfungsform	ECTS-Punkte
Abschnitt 1: Grundlagen Mathematische Physik							
1	MAT-65-11	Geometry in Physics	V+Ü	PM	ÜN	K o. mP	9
1	MAT-65-12	Mathematical Quantum Theory	V+Ü	PM	ÜN	K o. mP	9
2	MAT-65-13	Mathematical Relativity	V+Ü	PM	ÜN	K o. mP	9
Abschnitt 2: Erweiterungswissen							
1–3	MAT-40-31	Advanced Topics in Mathematics	V+Ü	PMW	ÜN	K o. mP	9
1–3	MAT-40-32	Advanced Topics in Theoretical Physics	V+Ü	PMW	ÜN	K o. mP	9
2–3	MAT-40-33	Seminar Knowledge Extension	S	PMW	s.M.	R	3
Abschnitt 3: Freier Wahlpflichtbereich							
1-3		Module aus den Masterstudiengängen der Mathematik oder Physik gemäß Abschnitt 3.		WPM			30
Abschnitt 4: Wissenschaftliches Arbeiten							
3	MAT-40-41	Scientific Project	P	PM	s.M.	-	9
3–4	MAT-40-42	Mathematical Physics Colloquium	C+C	PM	-	-	3
4	MAT-40-43	Abschlussmodul M.Sc. Mathematische Physik	MA	PM	s.M.	MA	30

Erläuterung der Abkürzungen:

Art des Moduls	: PM=Pflichtmodul, PMW=Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit, WPM=Wahlpflichtmodul
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kolloquium, Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Studienleistung	: ÜN=Übungsnachweis
Sonstiges	: o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung

2.2 Übersicht nach Studienverlauf

Wir geben zunächst einen allgemeinen Studienverlaufsplan, der die zeitliche Verteilung der Leistungspunkte nach Studienbereichen aufzeigt. Auf den folgenden Seiten finden sich dann beispielhafte Studienverlaufspläne für unterschiedliche Vertiefungen, bei denen für die Module MAT-40-31 und MAT-40-32 beispielhaft Kurse aus dem Wahlpflichtbereich gewählt wurden.

<table>
<tr><th>Semester</th><th>LP</th><th>Grundlagen Mathematische Physik</th><th>Erweiterungswissen</th><th>Freier Wahlpflichtbereich</th><th>Wissenschaftliches Arbeiten</th></tr>
<tr><td>1.</td><td>27</td><td rowspan="2">27 LP</td><td rowspan="3">21 LP</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2.</td><td>30</td><td rowspan="2">30 LP</td><td></td></tr>
<tr><td>3.</td><td>31</td><td></td><td rowspan="2">42 LP</td></tr>
<tr><td>4.</td><td>32</td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

Abbildung 2.1: Allgemeiner Studienverlaufsplan

2.3 Auswahl möglicher Studienverläufe

Die im folgenden aufgeführten beispielhaften Studienverlaufspläne sollen einen Eindruck davon geben, wie das Studium bei entsprechender Wahl in den verschiedenen Vertiefungsrichtungen der Mathematischen Physik gestaltet werden könnte. Sie sind nicht als Empfehlungen zu verstehen. Auch werden nicht alle angegebenen Lehrveranstaltungen jährlich angeboten und nicht bei jeder der angegebenen Lehrveranstaltungen ist gewährleistet, dass sie in Englisch angeboten wird.

Beispielhafter Studienverlaufsplan ohne Vertiefung

<table>
<tr><th>Semester</th><th>LP</th><th>Grundlagen Mathematische Physik</th><th>Erweiterungs-wissen</th><th>Freier Wahlpflichtbereich</th><th colspan="2">Wissenschaftliches Arbeiten</th></tr>
<tr><td rowspan="2">1.</td><td rowspan="2">27</td><td>Geometry in Physics (9 LP)</td><td rowspan="2">Lineare Partielle Differential-gleichungen (9 LP)</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2" colspan="2"></td></tr>
<tr><td>Mathematical Quantum Theory (9 LP)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2.</td><td rowspan="2">30</td><td rowspan="2">Mathematical Relativity (9 LP)</td><td rowspan="2">Seminar(3 LP)</td><td>Advanced Topics in Mathematical Quantum Theory (9 LP)</td><td rowspan="2" colspan="2"></td></tr>
<tr><td>Mathematical Statistical Physics (9 LP)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">3.</td><td rowspan="2">31</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">Quantenfeld-Theorie und Teilchen-Physik (9LP)</td><td>Advanced Topics in Mathematical Relativity (6 LP)</td><td rowspan="3">Mathe-matical Physics Colloquium (3 LP)</td><td rowspan="2">Scientific Project (9 LP)</td></tr>
<tr><td>Advanced Topics in Mathematical Statistical Physics (6 LP)</td></tr>
<tr><td>4.</td><td>32</td><td></td><td></td><td></td><td>Master Thesis (30 LP)</td></tr>
</table>

Abbildung 2.2: Der Studiengang Mathematical Physics kann großenteils ohne Wahl einer spezifischen Vertiefung studiert werden. In diesem Fall empfehlen wir alle vier Grundlagenmodule und Fortgeschrittenen-Module aus dem Angebot zu belegen. Die Module des Studienbereichs Erweiterungswissen sollten dann passend zur geplanten Vertiefung im wissenschaftlichen Projekt und in der Masterarbeit gewählt werden (siehe z. B. die folgenden Studienverlaufspläne).

Beispielhafter Studienverlaufsplan mit Vertiefung Quantum Theory

Semester	LP	Grundlagen Mathematische Physik	Erweiterungswissen	Freier Wahlpflichtbereich	Wissenschaftliches Arbeiten	
1.	27	Geometry in Physics (9 LP) Mathematical Quantum Theory (9 LP)	Operatorentheorie (9 LP)			
2.	30	Mathematical Relativity (9 LP)	Quantenfeldtheorie und Teilchenphysik (9 LP) Seminar(3 LP)	Funktionalanalysis (9 LP)		
3.	31			Advanced Topics in Mathematical Quantum Theory (9 LP) Numerische Methoden in Physik und Astrophysik (6 LP) Theorie der kondensierten Materie (6 LP)	Mathematical Physics Colloquium (3 LP)	Scientific Project (9 LP)
4.	32					Master Thesis (30 LP)

Abbildung 2.3: Die mathematischen Grundlagen der Quantentheorie gehören in wesentlichen Teilen zum Bereich der Analysis. Wir empfehlen deshalb bei der Wahl der Vertiefung in einem der Bereiche Mathematische Quantentheorie, Quantenfeldtheorie, Theoretische Festkörperphysik, Quanten-Vielteilchen-Systeme oder Theorie der Quanteninformation im Studienbereich Erweiterungswissen Kurse aus dem Bereich der Analysis zu belegen, z. B. Operatortheorie, Partielle Differentialgleichungen, Variationsrechnung oder Numerische Analysis.

Beispielhafter Studienverlaufsplan mit Vertiefung Relativity

Semester	LP	Grundlagen Mathematische Physik	Erweiterungs-wissen	Freier Wahlpflichtbereich	Wissenschaftliches Arbeiten	
1.	27	Geometry in Physics (9 LP)	Astronomie und Astrophysik (9 LP)			
		Mathematical Quantum Theory (9 LP)				
2.	30	Mathematical Relativity (9 LP)	Einführung in Partielle Differentialgleichungen (9 LP)	Riemannsche Geometrie (9 LP)		
			Seminar(3 LP)			
3.	31			Advanced Topics in Mathematical Relativity (9 LP)	Mathematical Physics Colloquium (3 LP)	Scientific Project (9 LP)
				Theoretische Astrophysik (6 LP)		
				Numerische Methoden in Physik und Astrophysik (6 LP)		
4.	32					Master Thesis (30 LP)

Abbildung 2.4: Die mathematischen Grundlagen der Relativitätstheorie gehören in wesentlichen Teilen den Bereichen Geometrie und Analysis an. Wir empfehlen deshalb bei der Wahl der Vertiefung in einem der Bereiche Mathematische Relativitätstheorie, Astronomie, Kosmologie oder Astrophysik Kurse aus dem Bereich der Geometrie, z. B. Riemannsche Geometrie und Lorentzsche Geometrie, oder aus dem Bereich der Analysis, z. B. Partielle Differentialgleichungen, Variationsrechnung oder Numerische Analysis, zu belegen.

Beispielhafter Studienverlaufsplan mit Vertiefung Statistical Physics

<table>
<tr><th>Semester</th><th>LP</th><th>Grundlagen Mathematische Physik</th><th>Erweiterungs-wissen</th><th>Freier Wahlpflichtbereich</th><th colspan="2">Wissenschaftliches Arbeiten</th></tr>
<tr><td rowspan="2">1.</td><td rowspan="2">27</td><td>Geometry in Physics (9 LP)</td><td rowspan="2">Wahrscheinlichkeitstheorie (9 LP)</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2" colspan="2"></td></tr>
<tr><td>Mathematical Quantum Theory (9 LP)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2.</td><td rowspan="2">30</td><td rowspan="2">Mathematical Relativity (9 LP)</td><td rowspan="2">Fortgeschrittene Statistische Physik (9 LP)</td><td>Mathematical Statistical Physics (9 LP)</td><td rowspan="2" colspan="2"></td></tr>
<tr><td>Dichtefunktionaltheorie für klassische und Quantensysteme (6 LP)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">3.</td><td rowspan="2">31</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">Seminar (3LP)</td><td>Advanced Topics in Mathematical Statistical Physics (6 LP)</td><td rowspan="3">Mathematical Physics Colloquium (3 LP)</td><td rowspan="2">Scientific Project (9 LP)</td></tr>
<tr><td>Mathematische Statistik (9 LP)</td></tr>
<tr><td>4.</td><td>32</td><td></td><td></td><td></td><td>Master Thesis (30 LP)</td></tr>
</table>

Abbildung 2.5: Die mathematischen Grundlagen der Statistischen Physik gehören in großen Teilen dem Bereich der Stochastik an. Wir empfehlen deshalb bei der Wahl der Vertiefung im Bereich Mathematische Statistische Physik, Soft Matter oder Dichtefunktionaltheorie Kurse im Bereich Stochastik zu belegen, z. B. Wahrscheinlichkeitstheorie oder Mathematische Statistik.

2.4 Übersicht nach Studienverlauf und Prüfungsanforderungen

Übersicht nach Studienverlauf und Prüfungsanforderungen													
		Prüfungsleistung				**Lehrform**				**Semester**			
		Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Gewichtung bei der Abschlussnote	Art der Lehrform	Status	SWS	Summe der ECTS-Punkte (LP)	Die Zuordnung der Prüfungen / ECTS-Punkte zu Semestern hat empfehlenden Charakter. Die Zuordnung von ECTS-Punkten zu Veranstaltungen haben informativen Charakter. Die Gutschrift von Leistungspunkten erfolgt erst nach Abschluss des Moduls.			
										1. LP	2. LP	3. LP	4. LP
Studienbereich Grundlagen Mathematische Physik									**27**				
MAT-65-11 Geometry in Physics								6	9				
1.	Vorlesung	K o. mP	90–120 o. 20–30	b	9	V	o	4		6			
2.	Übung					Ü	o	2		3			
MAT-65-12 Mathematical Quantum Theory								6	9				
1.	Vorlesung	K o. mP	90–120 o. 20–30	b	9	V	o	4		6			
2.	Übung					Ü	o	2		3			
MAT-65-13 Mathematical Relativity								6	9				
1.	Vorlesung	K o. mP	90–120 o. 20–30	b	9	V	o	4			6		
2.	Übung					Ü	o	2			3		
Studienbereich Erweiterungswissen									**21**				
MAT-40-31 Advanced Topics in Mathematics								6	9				
1.	Vorlesung	K o. mP	90–120 o. 20–30	b	9	V	o	4		6			
2.	Übung					Ü	o	2		3			
MAT-40-32 Advanced Topics in Physics								6	9				
1.	Vorlesung	K o. mP	90–120 o. 20–30	b	9	V	o	4			6		
2.	Übung					Ü	o	2			3		
MAT-40-33 Seminar								2	3				
1.	Seminar	R	45–90	b	3	S	o	2				3	
Studienbereich Freier Wahlpflichtbereich									**30**				
Hier können die Module MAT-65-15 und MAT-65-21 bis MAT-65-26 genauso gewählt werden wie andere geeignete Module aus den Studiengängen Master of Science Mathematik, Physik oder Astro- und Teilchenphysik. Die Wahl muss in Absprache mit dem Mentor getroffen werden. Module aus anderen Studiengängen können vom Prüfungsausschuss genehmigt werden.													
MAT-65-14 Mathematical Statistical Physics								6	9				
1.	Vorlesung	K o. mP	90–120 o. 20–30	b	9	V	f	4			6		
2.	Übung					Ü	f	2			3		
MAT-65-21 Advanced Topics in Mathematical Quantum Theory								6	9				
1.	Vorlesung	K o. mP	90–120 o. 20–30	b	9	V	f	4				6	

Übersicht nach Studienverlauf und Prüfungsanforderungen													
		Prüfungsleistung				Lehrform				Semester			
		Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Gewichtung bei der Abschlussnote	Art der Lehrform	Status	SWS	Summe der ECTS-Punkte (LP)	Die Zuordnung der Prüfungen / ECTS-Punkte zu Semestern hat empfehlenden Charakter. Die Zuordnung von ECTS-Punkten zu Veranstaltungen haben informativen Charakter. Die Gutschrift von Leistungspunkten erfolgt erst nach Abschluss des Moduls.			
										1. LP	2. LP	3. LP	4. LP
2.	Übung					Ü	f	2				3	
MAT-65-22 Advanced Topics in Mathematical Quantum Theory (kurze Version)								4	6				
1.	Vorlesung	K o. mP	90–120 o. 20–30	b	6	V	f	2				3	
2.	Übung					Ü	f	2				3	
MAT-65-23 Advanced Topics in Mathematical Relativity								6	9				
1.	Vorlesung	K o. mP	90–120 o. 20–30	b	9	V	f	4				6	
2.	Übung					Ü	f	2				3	
MAT-65-24 Advanced Topics in Mathematical Relativity (kurze Version)								4	6				
1.	Vorlesung	K o. mP	90–120 o. 20–30	b	6	V	f	2				3	
2.	Übung					Ü	f	2				3	
Studienbereich Wissenschaftliches Arbeiten									**42**				
MAT-40-41 Scientific Project									9				
1.	Projekt	Proj.		nb	9		o					9	
MAT-40-42 Mathematical Physics Colloquium									3				
1.	Kolloquium			nb			o					1	2
MAT-40-43 Master Thesis									30				
1.	Masterarbeit	MA		b	30		o						30

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit
Lehrform	: V=Vorlesung, Proj.=Projektarbeit, Koll.=Kolloqium, Ü=Übungen, S=Seminar
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: o.=oder, SWS=Semesterwochenstunden, LP=Leistungspunkte=ECTS-Punkte

3 Modulbeschreibungen

Abschnitt 1: Grundlagen Mathematische Physik

Sofern die Pflichtmodule dieses Abschnitts oder Module, die mit diesen inhaltlich und von den zu erwerbenden Kompetenzen her im Wesentlichen übereinstimmen, im Bachelorstudiengang eingebracht wurden, der Zulassungsvoraussetzung für die Zulassung zum Studiengang Master of Science Mathematical Physics war, können diese gemäß dem Besonderen Teil der Studien- und Prüfungsordnung nicht mehr im Masterstudiengang eingebracht werden. Sie sind im Rahmen des Studien- und Prüfungsplans durch andere Leistungen zu ersetzen.

Modulnummer: **MAT-65-11**	**Modultitel:** Geometry in Physics		**Art des Moduls:** Pflichtmodul
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig im Wintersemester		
Fachsemester	1		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übungen 2 SWS, Hausaufgaben		
Modulinhalt	Das Modul beinhaltet eine Einführung in grundlegende Methoden der Differentialgeometrie und ihre Bedeutung in der Physik. Themen sind insbesondere Mannigfaltigkeiten, Differentialformen, Riemannsche Metriken und zugehörige Krümmungsbegriffe, Riemannsche Geometrie von Untermannigfaltigkeiten, reelle Vektorbündel und Zusammenhänge. Es werden beispielhaft Anwendungen in der Physik genannt.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden kennen und verstehen die genannten Begriffe der Differentialgeometrie und die grundlegenden Techniken im Umgang mit ihnen. Sie sind zu einem vertieften Verständnis insbesondere der Differential- und Integralrechnung gelangt und haben beispielhaft erfahren, wie die mathematischen Konzepte in natürlicher Weise in physikalischen Theorien Anwendung finden. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Geometry in Physics	V	o	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	o	2	3					

Die Prüfungsform wird vom Dozenten bzw. der Dozentin festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • John Lee: Introduction to smooth manifolds. Springer 2012. • John Lee: Riemannian manifolds: An introduction. Springer 1997. • Chris Isham: Modern differential geometry for physicists. World Scientific 1999. • Mikio Nakahara: Geometry, Topology and Physics. IOP Publishing 2003.
Verwendbarkeit	Der Teilnahme am Modul ist Voraussetzung für die Teilnahme am Modul Mathematical Relativity, am Modul Seminar Knowledge Extension und am Modul Scientific Project.
Teilnahme-voraussetzungen	-
Modul-verantwortliche	Christoph Bohle, Carla Cederbaum, Stefan Teufel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-65-12</td><td colspan="2">Modultitel:
Mathematical Quantum Theory</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">regelmäßig im Wintersemester</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übungen 2 SWS, Hausaufgaben</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Dieses Modul bietet eine Einführung in mathematische Methoden, die zur Formulierung und Analyse von Quantentheorien eine wesentliche Rolle spielen. Themen sind insbesondere die Fourier-Transformation, Distributionen, Hilbert-Räume, unitäre Gruppen und ihre Erzeuger, Spektraltheorie selbst-adjungierter Operatoren, Spektralsatz, Tensor-Produkte, POVMs, Spektralmaße sowie Spurklasseoperatoren. Es können zusätzlich Grundideen aus einem weiterführenden Bereich behandelt werden, beispielsweise aus der Streutheorie, der Stabilität der Materie, der semi-klassischen Analysis oder der Hartree-Fock-Theorie. Die genannten mathematischen Methoden und Gebiete werden in der Vorlesung aus der Quantentheorie heraus motiviert und an Beispielen aus der Quantentheorie angewendet.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Studierende kennen und verstehen die genannten Begriffe und Methoden und können mit ihrer Hilfe bekannte und neue Fragestellungen aus der Quantentheorie analysieren. Sie sind in der Lage, die Aussagen und Beweise der Vorlesung nachzuvollziehen und zu erklären. Weiterhin verknüpfen sie physikalische Fragestellungen und ihre mathematische Modellierung und sind in der Lage, die Relevanz und Adäquatheit der mathematischen Modellierung und der aus ihr abgeleiteten mathematischen Resultate zu hinterfragen. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Mathematical Quantum Theory</td><td>V</td><td>o</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>o</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
Die Prüfungsform wird vom Dozenten bzw. der Dozentin festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="3">Der erfolgreiche Abschluss eines der Module Mathematical Quantum Theory oder Mathematical Relativity ist Voraussetzung für die Teilnahme an Modul Scientific Project. Der erfolgreiche Abschluss von Modul Mathematical Quantum Theory ist Voraussetzung für die Teilnahme am Modul Advanced Topics in Mathematical Quantum Theory.</td></tr>
<tr><td>Teilnahme-voraussetzungen</td><td colspan="3">-</td></tr>
<tr><td>Modul-verantwortliche</td><td colspan="3">Stefan Teufel</td></tr>
</table>

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-65-13</td><td colspan="2">Modultitel:
Mathematical Relativity</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">regelmäßig im Sommersemester</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">2</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übungen 2 SWS, Hausaufgaben</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Dieses Modul bietet eine Einführung in die Mathematische Relativitätstheorie. Themen sind insbesondere Newtons Gravitationstheorie, spezielle Relativitätstheorie, relativistische Effekte, Einstein-Gleichung, Schwarzschild-Modell. Optional können zusätzlich weitere Themen behandelt werden, beispielsweise kosmologische Modelle, Materie-Modelle, schwarze Löcher, Cauchy-Problem und ADM-Zerlegung, Singularitätentheoreme oder Gravitationswellen.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden kennen und verstehen die genannten Begriffe und Methoden und können mit ihrer Hilfe bekannte und neue Fragestellungen aus der Relativitätstheorie analysieren. Weiterhin verknüpfen sie physikalische Fragstellungen der Kosmologie und Astrophysik und ihre mathematische Modellierung durch differentialgeometrische Methoden und sind in der Lage, die Relevanz und Adäquatheit der mathematischen Modellierung und der aus ihr abgeleiteten mathematischen Resultate zu hinterfragen. Dabei bauen Sie insbesondere die im Modul MAT-65-11 erlernten Methoden aus und vernetzen Ihr Methoden- und Fachwissen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Mathematical Relativity</td><td>V</td><td>o</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>o</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
Die Prüfungsform wird vom Dozenten bzw. der Dozentin festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="3">Der erfolgreiche Abschluss eines der Module Mathematical Relativity oder Mathematical Quantum Theory ist Voraussetzung für die Teilnahme an Modul Scientific Project. Der erfolgreiche Abschluss von Modul Mathematical Relativity ist Voraussetzung für die Teilnahme an Modul Advanced Topics in Mathematical Relativity.</td></tr>
<tr><td>Teilnahme-voraussetzungen</td><td colspan="3">Die Teilnahme am Modul Geometry in Physics wird vorausgesetzt.</td></tr>
<tr><td>Modul-verantwortliche</td><td colspan="3">Carla Cederbaum, Gerhard Huisken, Frank Loose</td></tr>
</table>

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Abschnitt 2: Erweiterungswissen

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-40-31</td><td colspan="2">Modultitel:
Advanced Topics in Mathematics</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">jedes Semester</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1–3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Englisch oder Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übungen 2 SWS, Hausaufgaben</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Es müssen eine oder mehrere Vorlesungen mit den jeweiligen Übungen im entsprechenden Umfang aus dem Studiengang M.Sc. Mathematik belegt werden. Empfohlene Themengebiete sind beispielsweise Partielle Differentialgleichungen, Numerik von Differentialgleichungen, Harmonische Analysis, Lie-Gruppen, Nichtlineare Funktionalanalysis, Operatoren-Theorie, Stochastische Prozesse, Variationsrechnung, Symplektische Geometrie, Algebraische Topologie oder Algebraische Geometrie. Weitere Informationen zum Angebot finden sich im Modulkatalog ab Seite 44 und im Modulhandbuch des Studiengangs M.Sc. Mathematik.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden erarbeiten sich losgelöst von der physikalischen Anwendung vertiefte Kenntnisse in einem ausgewählten mathematischen Teilgebiet. Sie verbreitern damit die Basis ihres mathematischen Wissens und erweitern die ihnen zur Verfügung stehenden Methoden. Die weiteren Qualifikationsziele, insbesondere die konkreten inhaltlichen Qualifikationsziele, ergeben sich aus der Modulbeschreibung des zugehörigen Moduls im Modulhandbuch des M.Sc. Mathematik.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Advanced Topics in Mathematics</td><td>V</td><td>o</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180 o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>o</td><td>2</td><td>3</td></tr>
<tr><td colspan="10">Die Prüfungsform wird vom Dozenten bzw. der Dozentin festgelegt.</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="3">Das Modul ist ggf. Voraussetzung für das Abschlussmodul.</td></tr>
<tr><td>Teilnahme-voraussetzungen</td><td colspan="3">Siehe Teilnahmevoraussetzungen im Modulhandbuch des Studiengang M.Sc. Mathematik.</td></tr>
<tr><td>Modul-verantwortliche</td><td colspan="3">Die Studiendekanin oder der Studiendekan des Fachbereichs Mathematik</td></tr>
</table>

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-40-32	**Modultitel:** Advanced Topics in Theoretical Physics		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	jedes Semester		
Fachsemester	1–3		
Unterrichtssprache	Englisch oder Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übungen 2 SWS, Hausaufgaben		
Modulinhalt	Es müssen eine oder mehrere fortgeschrittene Vorlesungen mit den jeweiligen Übungen im entsprechenden Umfang aus dem Studiengang M.Sc. Physik oder dem Studiengang M.Sc. Astro and Particle Physics jeweils im Bereich der Theoretischen Physik belegt werden. Empfohlene Themenbereiche sind beispielsweise Quantenfeldtheorie und Teilchenphysik, Theoretische Astrophysik, Relativistic Astrophysics, Viel-Teilchen Quantensysteme, Fortgeschrittene Statistische Physik, Yang-Mills-Theorie, Theorie der kondensierten Materie, Theoretische Quantenoptik, Theorie der Quanteninformation, Kosmologie, Numerische Methoden in Physik und Astrophysik, Moderne Themen der Theoretischen Physik. Weitere Informationen zum Angebot finden sich im Modulhandbuch der jeweiligen Studiengänge.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden erarbeiten sich losgelöst vom rigorosen mathematischen Formalismus Kenntnisse in einem ausgewählten Teilgebiet der Theoretischen Physik. Sie verbreitern damit die Basis ihres physikalischen Wissens und erweitern die ihnen zur Verfügung stehenden physikalischen Methoden. Die weiteren Qualifikationsziele, insbesondere die konkreten inhaltlichen Qualifikationsziele, ergeben sich aus der Modulbeschreibung des zugehörigen Moduls im Modulhandbuch des M.Sc. Physik bzw. des M.Sc. Astro and Particle Physics.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Advanced Topics in Theoretical Physics	V	o	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	o	2	3					

Die Prüfungsform wird vom Dozenten bzw. der Dozentin festgelegt.

Verwendbarkeit	Das Modul ist ggf. Voraussetzung für das Abschlussmodul.
Teilnahmevoraussetzungen	Siehe Teilnahmevoraussetzungen im Modulhandbuch des Studiengangs M.Sc. Physik bzw. M.Sc. Astro and Particle Physics.
Modulverantwortliche	Die Studiendekanin oder der Studiendekan des Fachbereichs Physik

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-40-33	**Modultitel:** Seminar Knowledge Extension		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	jedes Semester		
Fachsemester	2–3		
Unterrichtssprache	Englisch oder Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Seminar: Referat, Diskussion, Teamarbeit, Handout		
Modulinhalt	Verschiedene Themen aus verschiedenen Gebieten der Mathematischen Physik, Mathematik oder Theoretischen Physik.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben gelernt, sich ein fortgeschrittenes mathematisches oder physikalisches Thema selbständig und im Team mit wissenschaftlichen Methoden zu erarbeiten und dieses in Form eines Vortrags zu präsentieren. Sie haben dabei vertiefte Kompetenzen in der Präsentation mathematischer oder physikalischer Ergebnisse erworben, und sie sind in der Lage, diese Ergebnisse in kritischen Diskussionen zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Seminar	S	o	2	3	ja	R	45–90	b	100

Der Erwerb der Leistungspunkte setzt neben einem erfolgreichen Vortrag auch die regelmäßige aktive Teilnahme an der Veranstaltung voraus, etwa in Form von Fragen, Diskussionsbeiträgen oder der Bearbeitung von Aufgaben. Zudem kann eine schriftliche Ausarbeitung des eigenen Vortrages oder das Erstellen eines Handouts für die Teilnehmerinnen und Teilnehmer zu den zu erbringenden Leistungen gehören. Diese zusätzlichen Leistungen stellen die Studienleistung des Moduls dar.

Verwendbarkeit	Das Modul ist ggf. Voraussetzung für das Abschlussmodul.
Teilnahmevoraussetzungen	Erfolgreicher Abschluss eines der Module aus dem Studienbereich Grundlagen Mathematische Physik.
Modulverantwortliche	Stefan Teufel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Abschnitt 3: Freier Wahlpflichtbereich

Der Freie Wahlpflichtbereich umfasst frei nach den individuellen Studien- und Forschungsinteressen zusammengestellte Module aus den Masterstudiengängen Mathematical Physics, Mathematik, Physik und Astro and Particle Physics. Zur Auswahl stehen u.a. Lehrveranstaltungen, die seitens der Studierenden nicht den Modulen MAT-40-31 bzw. MAT-40-32 zugeordnet wurden, das nicht im Studienbereich Grundlagen Mathematische Physik absolvierte Modul MAT-65-13 oder MAT-65-14, die Module MAT-65-15 und MAT-65-21 bis MAT-65-24, sowie weitere geeignete fortgeschrittene Module aus den Studiengängen Mathematik (siehe 44), Mathematical Physics, Physik und Astro and Particle Physics. Nicht alle Module können jährlich angeboten werden, es stehen jedoch jedes Semester ausreichend Module zur Auswahl. Ebenfalls ist sichergestellt, dass der Freie Wahlpflichtbereich grundsätzlich auf Englisch studierbar ist, wobei abhängig vom Lehrangebot gegebenenfalls Einschränkungen bei der Modulwahl gegeben sein können. Die Auswahl wird im Rahmen des Mentorings verpflichtend abgesprochen. Eine Doppelbelegung von Modulen oder Lehrveranstaltungen ist ausgeschlossen.

Die Studierenden erwerben dabei studien- und forschungsrelevante Kompetenzen. Sie erlernen selbständig einzuschätzen, welche zusätzlichen Qualifikationen und Kompetenzen für ihr Studium hilfreich sind und entsprechende Veranstaltungen gezielt auszuwählen. Sie sind in der Lage, sich spezifische Grundlagen für ihr zukünftiges Forschungsprofil auch jenseits des Pflichtprogramms des Masters Mathematical Physics anzueignen. Die Studierenden kennen und verstehen die gelernten Begriffe und Methoden und können mit ihrer Hilfe bekannte und neue Fragestellungen aus dem thematisierten Spezialgebiet analysieren. Sie sind in der Lage, die Aussagen und Beweise nachzuvollziehen und zu erklären. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen. In den Übungen haben die Studierenden sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln.

Modulnummer: **MAT-65-14**	**Modultitel:** Mathematical Statistical Physics		**Art des Moduls:** Wahlpflichtmodul
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig im Sommersemester		
Fachsemester	2-3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übungen 2 SWS, Hausaufgaben		
Modulinhalt	Dieses Modul bietet eine Einführung in die Mathematische Statistische Physik. Themen sind insbesondere Konzepte der Wahrscheinlichkeitstheorie, die klassische statistische Mechanik von Gasen (Äquivalenz von Ensembles, thermisches Gleichgewicht, Boltzmann-Gleichung, Entropie), die Brownsche Bewegung (stochastische Prozesse, Wiener-Prozess), Gittermodelle (Ising-Modell, Gibbs-Maße, thermodynamischer Limes, Phasenübergänge), statistische Quantenmechanik (quantenmechanische Ensembles, Übergang ins thermische Gleichgewicht, Bose-Einstein-Kondensation). Optional können zusätzlich weitere Themen behandelt werden, beispielsweise offene Quantensysteme, Transportphänomene, Renormierungsgruppe oder Fluktuations-Dissipations-Theoreme.		

Qualifikationsziele	Die Studierenden kennen und verstehen die oben genannten Begriffe und Methoden und können mit ihrer Hilfe bekannte und neue Fragestellungen aus der Statistischen Physik analysieren. Weiterhin verknüpfen sie grundlegende physikalische Konzepte wie Gleichgewicht, Irreversibilität und Entropie und ihre mathematische Modellierung durch wahrscheinlichkeitstheoretische Methoden und sind in der Lage, die Relevanz und Adäquatheit der mathematischen Modellierung und der aus ihr abgeleiteten mathematischen Resultate zu hinterfragen. Dabei bauen sie insbesondere ihre im Grundstudium erlernten Methoden der Wahrscheinlichkeitstheorie aus und vernetzen Ihr Methoden- und Fachwissen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Mathematical Statistical Physics	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

Die Prüfungsform wird vom Dozenten bzw. der Dozentin festgelegt.

Verwendbarkeit	Der erfolgreiche Abschluss des Moduls ist Voraussetzung für die Teilnahme an Modul Advanced Topics in Mathematical Statistical Physics.
Teilnahmevoraussetzungen	-
Modulverantwortliche	Roderich Tumulka

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-65-15</td><td colspan="2">Modultitel:
Foundations of Quantum Mechanics</td><td>Art des Moduls:
Wahlpflichtmodul</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">regelmäßig alle zwei Jahre</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">2-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übungen 2 SWS, Hausaufgaben</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Das Modul bietet eine Einführung in grundlegende Fragen der Quantenmechanik, einschließlich ihrer mathematischen und philosophischen Aspekte. Verschiedene Interpretationen wie Kopenhagen, die Bohmsche Mechanik, viele Welten und der Kollaps der spontanen Wellenfunktion werden vorgestellt und mathematisch und physikalisch analysiert. Weitere Themen sind die Bornsche Regel, die Heisenbergsche Unschärferelation, das Quantenmessproblem, der Nichtlokalitätssatz von Bell, identische Teilchen und Sätze ohne versteckte Variablen.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden kennen und können die Regeln der Quantenmechanik in verschiedenen Umgebungen anwenden und verstehen mehrere wichtige Theorien zur Funktionsweise der Quantenwelt. Sie erwerben mathematische Kenntnisse, die für die Anwendung dieser Regeln und Theorien relevant sind, und können die mathematische Behandlung mit der physikalischen Bedeutung verbinden. Sie machen sich mit den überraschenden Phänomenen und Paradoxien der Quantenmechanik vertraut. Sie wissen zu schätzen, was an der orthodoxen Interpretation umstritten ist und warum und können die aktuelle Debatte über grundlegende Fragen verfolgen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Foundations of Quantum Mechanics</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180 o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
<tr><td colspan="10">Die Prüfungsform wird vom Dozenten bzw. der Dozentin festgelegt.</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="3">-</td></tr>
<tr><td>Teilnahme-voraussetzungen</td><td colspan="3">Die grundlegenden Module zur Analysis und Linearen Algebra werden vorausgesetzt.</td></tr>
<tr><td>Modul-verantwortliche</td><td colspan="3">Roderich Tumulka</td></tr>
</table>

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-65-21	**Modultitel:** Advanced Topics in Mathematical Quantum Theory		**Art des Moduls:** Wahlpflichtmodul
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	2-3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übungen 2 SWS, Hausaufgaben		
Modulinhalt	Dieses Modul bietet eine Einführung in ein weiterführendes Thema der Mathematischen Vielteilchen-Quantentheorie, beispielsweise Hartree und Hartree-Fock Theorie, BCS Theorie, Adiabatentheorie, Renormierungsgruppe, mathematische Modelle in der Quantenfeldtheorie und Transport in wechselwirkenden Fermionensytemen. Es werden sowohl die für das jeweilige Gebiet grundlegenden mathematischen Resultate und physikalischen Vorstellungen vermittelt, als auch ein Einblick in den aktuellen Forschungsstand und bestehende offene Probleme gegeben.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden kennen und verstehen die gelernten Begriffe und Methoden und können mit ihrer Hilfe bekannte und neue Fragestellungen aus dem thematisierten Spezialgebiet der Mathematischen Quantentheorie analysieren. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Advanced Topics in Mathematical Quantum Theory	V	o	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	o	2	3					

Die Prüfungsform wird vom Dozenten bzw. der Dozentin festgelegt.

Verwendbarkeit	Das Modul ist ggf. Voraussetzung für das Abschlussmodul.
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Mathematical Quantum Theory werden vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Stefan Teufel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-65-22</td><td colspan="2">Modultitel:
Advanced Topics in Mathematical Quantum Theory (kurze Version)</td><td>Art des Moduls:
Wahlpflichtmodul</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">6</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
180 h</td><td>Kontaktzeit:
60 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig im Sommersemester</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">2</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS + Übungen 2 SWS, Hausaufgaben</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Dieses Modul bietet eine kurze Einführung in ein weiterführendes Thema der Mathematischen Vielteilchen-Quantentheorie, beispielsweise Hartree und Hartree-Fock Theorie, BCS Theorie, Adiabatentheorie, Renormierungsgruppe, mathematische Modelle in der Quantenfeldtheorie und Transport in wechselwirkenden Fermionensytemen. Es werden sowohl die für das jeweilige Gebiet grundlegenden mathematischen Resultate und physikalischen Vorstellungen vermittelt, als auch ein Einblick in den aktuellen Forschungsstand und bestehende offene Probleme gegeben.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden kennen und verstehen die gelernten Begriffe und Methoden und können mit ihrer Hilfe bekannte und neue Fragestellungen aus dem thematisierten Spezialgebiet der Mathematischen Quantentheorie analysieren. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und in ersten Ansätzen kritisch hinterfragen.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Advanced Topics in Mathematical Quantum Theory</td><td>V</td><td>o</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180 o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>o</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
Die Prüfungsform wird vom Dozenten bzw. der Dozentin festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="3">Das Modul ist ggf. Voraussetzung für das Abschlussmodul.</td></tr>
<tr><td>Teilnahmevoraussetzungen</td><td colspan="3">Kenntnisse aus dem Modul Mathematical Quantum Theory werden vorausgesetzt.</td></tr>
<tr><td>Modulverantwortliche</td><td colspan="3">Stefan Teufel</td></tr>
</table>

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer:	**Modultitel:**	**Art des Moduls:**
MAT-65-23	Advanced Topics in Mathematical Relativity	Wahlpflichtmodul

ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig im Wintersemester		
Fachsemester	3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übungen 2 SWS, Hausaufgaben		
Modulinhalt	Dieses Modul bietet eine Einführung in ein weiterführendes Thema der Mathematischen Relativitätstheorie. Es werden sowohl die für das jeweilige Gebiet grundlegenden mathematischen Resultate und physikalischen Vorstellungen vermittelt, als auch ein Einblick in den aktuellen Forschungsstand und bestehende offene Probleme gegeben.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden erwerben vertiefte Kenntnisse zu ausgewählten Fragestellungen der Mathematischen Relativitätstheorie. Sie erlernen analytische und geometrische Techniken zum Nachweis und zur Untersuchung von Lösungen der Einstein Gleichungen und können die physikalische Relevanz der mathematischen Ergebnisse einordnen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Advanced Topics in Mathematical Relativity	V	o	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	o	2	3					

Die Prüfungsform wird vom Dozenten bzw. der Dozentin festgelegt.

Verwendbarkeit	Das Modul ist ggf. Voraussetzung für das Abschlussmodul.
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Mathematical Relativity werden vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Carla Cederbaum, Gerhard Huisken, Frank Loose

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-65-24</td><td colspan="2">Modultitel:
Advanced Topics in Mathematical Relativity (kurze Version)</td><td>Art des Moduls:
Wahlpflichtmodul</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">6</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
180 h</td><td>Kontaktzeit:
60 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig im Wintersemester</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS + Übungen 2 SWS, Hausaufgaben</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Dieses Modul bietet eine kurze Einführung in ein weiterführendes Thema der Mathematischen Relativitätstheorie. Es werden sowohl die für das jeweilige Gebiet grundlegenden mathematischen Resultate und physikalischen Vorstellungen vermittelt, als auch ein Einblick in den aktuellen Forschungsstand und bestehende offene Probleme gegeben.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden erwerben erste vertiefte Kenntnisse zu ausgewählten Fragestellungen der Mathematischen Relativitätstheorie. Sie erlernen analytische und geometrische Techniken zum Nachweis und zur Untersuchung von Lösungen der Einstein Gleichungen und können die physikalische Relevanz der mathematischen Ergebnisse einordnen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und in ersten Ansätzen kritisch hinterfragen.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Advanced Topics in Mathematical Relativity</td><td>V</td><td>o</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180 o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>o</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
Die Prüfungsform wird vom Dozenten bzw. der Dozentin festgelegt. – Das Modul kann vom ausnahmsweise Dozenten auch ohne Übungen angeboten werden; in diesem Fall werden für das Modul statt 6 nur 3 Leistungspunkte vergeben.</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="3">Das Modul ist ggf. Voraussetzung für das Abschlussmodul.</td></tr>
<tr><td>Teilnahme-voraussetzungen</td><td colspan="3">Kenntnisse aus dem Modul Mathematical Relativity werden vorausgesetzt.</td></tr>
<tr><td>Modul-verantwortliche</td><td colspan="3">Carla Cederbaum, Gerhard Huisken, Frank Loose</td></tr>
</table>

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-65-35	**Modultitel:** Quantum Shannon Theory and Beyond		**Art des Moduls:** Wahlpflichtmodul
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	2-3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übungen 2 SWS, Hausaufgaben		
Modulinhalt	**Contents:** • Grundlegende Begriffe über den universellen Quantencomputer: Quantengatter, Quantenschaltungen, Universalität und Messungen. • Quantenalgorithmen: Deutsch-Jozsa, Shor und Grover. • Quantenkommunikation: No-Cloning-Theorem, Quantenteleportation und superdichte Kodierung. Quantenschlüsselverteilung. • Physikalische Realisierungen: DiVincenzo-Kriterien, Cirac-Zoller-Quantencomputer, Circuit QED. • Dekohärenz und offene Quantensysteme. • Quanten-Fehlerkorrektur. Fehlertolerante Quanteninformatik. • Alternative Modelle der Quanteninformatik: Adiabatische Quantenberechnung. • Einführung in die Theorie der Verschränkung: Definition, Kriterien und Messung der Verschränkung, mehrteilige Verschränkung.		
Qualifikationsziele	In this course, the students have learned about the transmission of information over a noisy quantum communication channel. They know how to use diverse quantum entropic measures for several quantum information processing tasks, such as quantum tomography, quantum estimation and quantum hypothesis testing. Sie sind zudem in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

<table>
<tr><td rowspan="3">Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td>Quantum Shannon Theory and Beyond</td><td>V
Ü</td><td>f
f</td><td>4
2</td><td>6
3</td><td>ja</td><td>K o. mP</td><td>90-180 o. 20-30</td><td>b</td><td>100</td></tr>
<tr><td colspan="10">In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Literatur</td><td colspan="10">Exemplarische Literatur:
• Michael A. Nielsen, Isaac L. Chuang: Quantum Computation and Quantum Information. CUP 2010.
• Mark M. Wilde: From Classical to Quantum Shannon Theory. arXiv 2019.
• John Watrous: The theory of quantum information. CUP 2018.
• Eric A. Carlen: Trace inequalities and quantum entropy. Rutgers 2009.
• Michael A. Wolf: Quantum Channels and Operations Guided Tour. Lecture Notes 2012.</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="10">-</td></tr>
<tr><td>Teilnahme-voraussetzungen</td><td colspan="10">Die grundlegenden Module zur Analysis und Linearen Algebra werden vorausgesetzt.</td></tr>
<tr><td>Modul-verantwortliche</td><td colspan="10">Angela Capel Cuevas</td></tr>
</table>

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Abschnitt 4: Wissenschaftliches Arbeiten

Modulnummer: MAT-40-41	**Modultitel:** Scientific Project		**Art des Moduls:** Pflichtmodul
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 15 h	Selbststudium: 255 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	jedes Semester		
Fachsemester	3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Individuelle Betreuung durch Betreuer/in, Studium wissenschaftlicher Arbeiten.		
Modulinhalt	Inhalt: • Formulierung einer fortgeschrittenen wissenschaftlichen Aufgabenstellung in Abstimmung mit dem Betreuer. • Eigenständige Suche und Studium relevanter wissenschaftlicher Literatur. • Formulierung spezifischer Fragestellungen und methodischer Ansätze zu deren Lösung. • Schriftliche Darstellung des Projekts im Kontext des aktuellen Forschungsstandes auf 5-10 Seiten. Dieses Modul dient in der Regel zur Vorbereitung der Masterarbeit.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden • entwickeln die Fähigkeit, sich systematisch in ein neues Teilgebiet einzuarbeiten, • lernen kritisches Arbeiten und Herausbilden eines fundierten, fachlichen und fachübergreifenden Urteilsvermögens, • erwerben Qualifikationen in den Bereichen Literaturrecherche, Identifikation von relevanten Fragestellungen und von geeigneten Methoden, sowie schriftliche Darstellung eines Vorhabens.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Wissenschaftliches Projekt	P	o	1	9	ja	-	-	nb	-

Verwendbarkeit	Der erfolgreiche Abschluss dieses Moduls ist Voraussetzung für die Teilnahme am Abschlussmodul.
Teilnahme-voraussetzungen	Erfolgreicher Abschluss des Moduls Geometry in Physics sowie eines der Module Mathematical Quantum Theory oder Mathematical Relativity.

Modul-verantwortliche	Stefan Teufel, Werner Vogelsang.

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-40-42	**Modultitel:** Mathematical Physics Colloquium		**Art des Moduls:** Pflichtmodul
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 30 h
Moduldauer	2 Semester		
Häufigkeit des Angebots	jedes Semester		
Fachsemester	3–4		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorträge, Diskussionen. Spezifische Lernform: Studierende stellen im letzten Semester Ihre Masterarbeit vor.		
Modulinhalt	An 15 Terminen (je 2h) während jedes Semesters finden Vorträge und Diskussionen zu aktuellen Themen der Mathematischen Physik statt. Vortragende sind Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den beteiligten Fachbereichen sowie Gäste und Masterstudierende, die die Ergebnisse ihrer Masterarbeit vorstellen.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden erhalten einen Einblick in aktuelle Entwicklungen in der Mathematischen Physik, auch über den Bereich ihrer Spezialisierung hinaus. Sie entwickeln die Fähigkeit, wissenschaftlichen Vorträgen zu folgen und diese in größerer Runde zu diskutieren und zu hinterfragen. Dadurch erwerben sie auch interdisziplinäre und interkulturelle Kompetenzen durch die regelmäßige Zusammenarbeit und Diskussion in gemischten Gruppen.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Kolloquium Wintersemester	C	o	2	1	nein	-	-	nb	-
Kolloquium Sommersemester	C	o	2	2	nein	-	-	nb	-

Verwendbarkeit	-
Teilnahmevoraussetzungen	-
Modulverantwortliche	Carla Cederbaum, Stefan Teufel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-40-43</td><td colspan="2">Modultitel:
Abschlussmodul M.Sc. Mathematische Physik</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">30</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
900 h</td><td>Kontaktzeit:
0 h</td><td>Selbststudium:
900 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">jedes Semester</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">4</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Englisch oder Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Masterarbeit</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Die Studierenden sind in eine Arbeitsgruppe eingebunden und nehmen an den Arbeitsgruppenseminaren teil. Sie haben unter Anleitung durch eine Betreuerin oder einen Betreuer eine begrenzte Aufgabenstellung aus der Mathematischen Physik mit wissenschaftlichen Methoden zu bearbeiten und schriftlich in englischer oder in deutscher Sprache darzustellen. Im Einzelnen umfasst dies:
die Formulierung einer wissenschaftlichen Fragestellung in Abstimmung mit der Betreuerin oder dem Betreuer;
die eigenständige Suche nach und das Studium von relevanter wissenschaftlicher Literatur;
die Formulierung geeigneter Fragestellungen und methodischer Ansätze zu deren Lösung;
die eigenständige Durchführung des Projekts, die schriftliche Darstellung des Projekts und der Ergebnisse im Kontext des aktuellen Forschungsstandes;
die Vorstellung der Ergebnisse in englischer Sprache im Mathematical Physics Colloquium.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden
sind in der Lage, sich innerhalb einer vorgegebenen Frist in eine neue Problemstellung einzuarbeiten und diese mit wissenschaftlichen Methoden zunehmend selbständig zu bearbeiten;
können sich in den Stand der wissenschaftlichen Literatur zu einem neuen Thema einarbeiten;
können wissenschaftliche Ergebnisse kritisch interpretieren und in den jeweiligen Kenntnisstand einordnen;
sind in der Lage, ihre Ergebnisse nach den Grundsätzen guter wissenschaftlicher Praxis schriftlich darzustellen;
sind in der Lage, ihre Arbeit in einem internationalen wissenschaftlichen Umfeld zu präsentieren.</td></tr>
</table>

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Masterarbeit	MA	o	-	30	nein	MA	-	b	100

Verwendbarkeit	-
Teilnahme-voraussetzungen	• 27 LP aus dem Abschnitt Grundlagen Mathematische Physik, • insgesamt 18 LP aus den Abschnitten Erweiterungswissen und Freier Wahlpflichtbereich, • erfolgreicher Abschluss von Modul Scientific Project.
Modul-verantwortliche	Stefan Teufel, Werner Vogelsang.

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Katalog mathematischer Module

In diesem Abschnitt werden Module aus dem Studiengang M.Sc. Mathematik aufgelistet, die im Freien Wahlbereich eingebracht werden können, und die nicht schon im Abschnitt 3 aufgeführt sind.

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-45-01</td><td colspan="2">Modultitel:
Einführung in Kommutative Algebra und Algebraische Geometrie</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">regelmäßig im Wintersemester (im Wechsel mit dem Modul MAT-45-02)</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Ringe und Ideale.
• Gröbnerbasen.
• Lokalisierung.
• Noethersche Ringe und Moduln.
• Ganze Ringerweiterungen.
• Krullscher Hauptidealsatz und Dimensionstheorie.
• Hilbertscher Nullstellensatz und Noether-Normalisierung.
• Affine Varietäten, Zariski-Topologie, Morphismen.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden haben zentrale Begriffe, Ergebnisse und Methoden der kommutativen Algebra und der affinen algebraischen Geometrie kennengelernt. Dabei haben sie das tiefliegende Wechselspiel von Algebra und Geometrie am Beispiel der affinen Varietäten erlebt. Die Studierenden erkennen zudem, wie das Einnehmen eines höheren Standpunktes, sprich die Abstraktion der Problemstellung, es erlaubt, auf den ersten Blick vollkommen verschiedene Fragestellungen gleichzeitig zu behandeln und zu lösen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
</table>

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Einführung in Kommutative Algebra und Algebraische Geometrie	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur

Exemplarische Literatur:

- Michael Francis Atiyah, Ian G. Macdonald: Introduction to commutative algebra. Addison Wesley 1969.
- David A. Cox, John B. Little, Donal O'Shea: Ideals, varieties, and algorithms. Springer 2008.
- David Eisenbud: Commutative algebra with a view toward algebraic geometry. Springer 1995.
- Ernst Kunz: Einführung in die kommutative Algebra und algebraische Geometrie. Vieweg 1980.
- Miles Reid: Undergraduate Commutative Algebra. Cambridge University Press 1997.

Verwendbarkeit

Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Das Modul kann wegen der großen inhaltlichen Überschneidungen nicht zusammen mit den Modulen 'Kommutative Algebra' eingebracht werden.

Teilnahmevoraussetzungen

Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.

Modulverantwortliche

Jürgen Hausen

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-45-02**	**Modultitel:** Kommutative Algebra		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig im Wintersemester (im Wechsel mit dem Modul MAT-45-01)		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Ringe und Ideale. • Lokalisierung und lokale Ringe. • Noethersche und Artinsche Ringe und Moduln. • Ganze Ringerweiterungen und die Cohen-Seidenberg Sätze. • Krullscher Hauptidealsatz und Dimensionstheorie. • Primärzerlegung. • Normalität, Regularität und Diskrete Bewertungsringe. • Hilbertscher Nullstellensatz und Noether-Normalisierung.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden kennen und verstehen die Sprache und die Methoden der kommutativen Algebra, welche zum Studium der Bereiche Algebra, Geometrie sowie Zahlentheorie notwendig sind. Sie erkennen, wie das Einnehmen eines höheren Standpunktes, sprich die Abstraktion der Problemstellung, es erlaubt, auf den ersten Blick vollkommen verschiedene Fragestellungen gleichzeitig zu behandeln und zu lösen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
	Kommutative Algebra	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
		Ü	f	2	3					
	In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.									
Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Michael Francis Atiyah, Ian G. Macdonald: Introduction to commutative algebra. Addison Wesley 1969. • David A. Cox, John B. Little, Donal O'Shea: Ideals, varieties, and algorithms. Springer 2008. • David Eisenbud: Commutative algebra with a view toward algebraic geometry. Springer 1995. • Ernst Kunz: Einführung in die kommutative Algebra und algebraische Geometrie. Vieweg 1980. • Miles Reid: Undergraduate Commutative Algebra. Cambridge University Press 1997.									
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. Das Modul kann wegen der großen inhaltlichen Überschneidungen nicht zusammen mit dem Modul 'Einführung in Kommutative Algebra und Algebraische Geometrie' eingebracht werden.									
Teilnahmevoraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.									
Modulverantwortliche	Victor Batyrev, Thomas Markwig									

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-45-03</td><td colspan="2">Modultitel:
Computeralgebra</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Normalformen und Standardbasen für Ideale und Moduln.
• Berechnung wichtiger Operationen für Ideale und Moduln.
• Syzygien, freie Auflösungen und der Beweis des Buchberger-Kriteriums.
• Berechnung der Primärzerlegung von Idealen.
• Hilbertfunktion.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden kennen wichtige Problemstellungen im Wechselspiel der Kommutativen Algebra und der Algebraischen Geometrie sowie algorithmische Zugänge zu deren Lösung. Sie sind insbesondere mit der Theorie der Standardbasen und ihrer vielfältigen Anwendungen vertraut. Zudem haben sie wichtige Softwarepakete im Bereich des symbolischen Rechnens kennengelernt und haben selbst Algorithmen in diesen implementiert. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten. Zudem haben sie wichtige Softwarepakete im Bereich des symbolischen Rechnens kennengelernt und haben selbst Algorithmen in diesen implementiert.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Computeralgebra</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Gert-Martin Greuel, Gerhard Pfister: A SINGULAR Introduction to Commutative Algebra. Springer 2008. • Wolfram Decker, Christoph Lossen: Computing in algebraic geometry. A quick start using SINGULAR. Springer 2006. • Wolfram Decker, Gerhard Pfister: A first Course in computational algebraic geometry. Cambridge University Press 2013. • David A. Cox, John B. Little, Donal O'Shea: Ideals, varieties, and algorithms. Springer 2008.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Kenntnisse aus den Modulen Kommutative Algebra und Algebraische Geometrie sind hilfreich, aber nicht zwingend Voraussetzung für die Teilnahme am Modul Computeralgebra
Modulverantwortliche	Hannah Markwig, Thomas Markwig

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-45-11	**Modultitel:** Algebraische Geometrie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig im Sommersemester im Wechsel mit dem Modul MAT-45-12		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Prävarietäten und Varietäten. • Projektive Varietäten und homogenes Spektrum. • Endliche und eigentliche Morphismen. • Blow-Up und Grassmannvarietäten. • Rationale Abbildungen. • Divisoren und Geradenbündel, Klassengruppe und Picardgruppe.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden lernen die zentralen Begriffe, Ergebnisse und Methoden der modernen algebraischen Geometrie kennen und entwickeln ein vertieftes Verständnis für die Zusammenhänge zwischen Geometrie und Algebra. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	siehe unten		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Algebraische Geometrie	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Robin Hartshorne: Algebraic geometry. Springer 2006. • Klaus Hulek: Elementare algebraische Geometrie. Vieweg 2012. • Ernst Kunz: Einführung in die algebraische Geometrie. Vieweg 1997. • David Mumford: The red book of varieties and schemes. Springer 1999. • Miles Reid: Undergraduate algebraic geometry. Cambridge University Press 1988. • Igor R. Shafarevich: Basic algebraic geometry. Springer 1994.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. Das Modul kann wegen der großen inhaltlichen Überschneidungen nicht zusammen mit dem Modul 'Algebraische Geometrie und Torische Varietäten' eingebracht werden.
Teilnahmevoraussetzungen	Wesentliche Kenntnisse aus dem Modul Kommutative Algebra werden vorausgesetzt.
Modulverantwortliche	Victor Batyrev, Hannah Markwig

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-45-12</td><td colspan="2">Modultitel:
Algebraische Geometrie und Torische Varietäten</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">regelmäßig im Sommersemester im Wechsel mit dem Modul MAT-45-11</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Projektiver Raum.
• Prävarietäten, Morphismen, Tangentialräume und Singularitäten.
• Produkte und Separiertheit.
• Projektive Varietäten und Grassmannsche Varietäten.
• Divisoren und Geradenbündel, Klassengruppe und Picardgruppe.
• Torische Varietäten.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden lernen die zentralen Begriffe, Ergebnisse und Methoden der modernen algebraischen Geometrie kennen und sie entwickeln ein vertieftes Verständnis für die Zusammenhänge zwischen Geometrie und Algebra. Am Beispiel der Klasse der torischen Varietäten erfahren sie zudem, wie Methoden der konvexen Geometrie die Untersuchung einer wichtigen Beispielklasse algebraischer Varietäten ermöglichen, und erweitern das Wechselspiel von Algebra und Geometrie um eine weitere Komponente. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Algebraische Geometrie und torische Varietäten</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • David A. Cox, John B. Little, Henry K. Schenck: Toric varieties. American Mathematical Society 2011: • Robin Hartshorne: Algebraic geometry. Springer 2006. • Klaus Hulek: Elementare algebraische Geometrie. Vieweg 2012. • Ernst Kunz: Einführung in die algebraische Geometrie. Vieweg 1997. • David Mumford: The red book of varieties and schemes. Springer 1999. • Miles Reid: Undergraduate algebraic geometry. Cambridge University Press 1988. • Igor R. Shafarevich: Basic algebraic geometry. Springer 1994.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. Das Modul kann wegen der großen inhaltlichen Überschneidungen nicht zusammen mit dem Modul 'Algebraische Geometrie' eingebracht werden.
Teilnahmevoraussetzungen	Wesentliche Kenntnisse aus dem Modul Einführung in die Kommutative Algebra und Algebraische Geometrie werden vorausgesetzt.
Modulverantwortliche	Jürgen Hausen

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-45-13</td><td colspan="2">Modultitel:
Algebraische Transformationsgruppen</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Operationen algebraischer Gruppen auf algebraischen Varietäten, homogene Räume.
Elemente der Strukturtheorie affin-algebraischer Gruppen und ihrer Lie-Algebren.
Elemente der Darstellungstheorie affin-algebraischer Gruppen und ihrer Lie-Algebren.
Quotientenbegriffe in der algebraischen Geometrie.
Klassische Invariantentheorie: Hilberts Endlichkeitssatz. Invariantenberechnung.
Geometrische Invariantentheorie: Mumfords Quotientenkonstruktion, Variation der Quotienten.
Zudem werden einzelne Aspekte der Themen in der folgenden Liste behandelt:
Torische Varietäten;
Sphärische Varietäten.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden erlernen grundlegende Methoden für die mathematische Arbeit mit Symmetrien auf geometrischen Strukturen. Gleichzeitig erleben sie das Zusammenwirken verschiedener algebraischer Konzepte, beispielsweise aus Gruppen- und Ringtheorie, in der algebraischen Geometrie. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td rowspan="4">Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Algebraische Transformationsgruppen</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180 o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
<tr><td colspan="10">In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Literatur</td><td colspan="10">Exemplarische Literatur:
• Armand Borel: Linear algebraic groups. Springer 1991.
• Jean A. Dieudonne, James B. Carrell: Invariant theory. Academic Press 1971.
• David Mumford: Geometric invariant theory. Springer 1965.</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="10">Das Modul gehört zum Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten Studienschwerpunkt, Vertiefungswissen Mathematik oder Freier Wahlbereich einbringbar.
Das Modul kann wegen der großen inhaltlichen Überschneidungen nicht zusammen mit den Modulen 'Algebraische Gruppen' eingebracht werden.</td></tr>
<tr><td>Teilnahme-voraussetzungen</td><td colspan="10">Kenntnisse aus den Modulen Kommutative Algebra und Algebraische Geometrie sind hilfreich, aber nicht zwingend Voraussetzung für die Teilnahme am Modul Algebraische Transformationsgruppen.</td></tr>
<tr><td>Modul-verantwortliche</td><td colspan="10">Victor Batyrev, Jürgen Hausen</td></tr>
</table>

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-45-14	**Modultitel:** Algebraische Kurven		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Projektive Kurven, Divisoren, Satz von Riemann-Roch. • Verzweigte Überlagerungen, Satz von Hurwitz. • Linearsysteme, Einbettungen, Castelnuovo-Ungleichung. • Singularitäten ebener Kurven, Puiseux-Erweiterung. • Klassifikation und Modulräume, Jacobi-Varietät.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die zentralen Begriffe, Ergebnisse und Methoden in einem ausgesuchten Teilgebiet der algebraischen Geometrie kennengelernt. Sie haben dabei ein vertieftes Verständnis für algebraische Kurven und deren Klassifikation entwickelt. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Algebraische Kurven	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Robin Hartshorne: Algebraic geometry. Springer 2006. • Gerd Fischer: Ebene algebraische Kurven. Vieweg 1994. • Rick Miranda: Algebraic Curves and Riemann Surfaces. AMS 1995.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* und *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Wesentliche Kenntnisse aus dem Modul Kommutative Algebra sowie Grundlagen der Algebraischen Geometrie und der Funktionentheorie werden vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Victor Batyrev, Hannah Markwig

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-45-15**	**Modultitel:** Torische Varietäten und Mori Dream Spaces		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** In der Vorlesung werden Mori Dream Spaces als Verallgemeinerungen torischer Varietäten betrachtet: • Geometrie und kombinatorische Theorie für torische Varietäten und Mori Dream Spaces. • Divisoren auf torischen Varietäten und Mori Dream Spaces. • Quotientendarstellung und Cox-Ring für torische Varietäten und Mori Dream Spaces. • Garben divisorieller Algebren. • Cox Garben und charakteristischer Raum. • Quotienten H-faktorieller affiner Varietäten. • Gestraußte Ringe. • Varietäten mit Torusoperationen.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben ihre Kenntnis und ihr Verständnis der zentralen Begriffe, Ergebnisse und Methoden der modernen algebraischen Geometrie in ihrem Wechselspiel zwischen Geometrie und Algebra vertieft. Sie haben mit der Klasse der Mori Dream Spaces eine Verallgemeinerung torischer Varietäten sowie deren Untersuchung mit Methoden der konvexen Geometrie kennen gelernt. Sie erweitern dabei das Wechselspiel von Algebra und Geometrie um eine weitere wichtige methodische Komponente. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

<table>
<tr><td rowspan="4">Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Torische Varietäten und Mori Dream Spaces</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
<tr><td colspan="10">In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Literatur</td><td colspan="10">Exemplarische Literatur:
• Ivan Arzhantsev, Ulrich Derenthal, Jürgen Hausen, and Antonio Laface. Cox rings. Cambridge University Press 2014.
• Yi Hu, Sean Keel. Mori dream spaces and GIT. Michigan Math. J. 48: 331-348, 2000.</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="10">Das Modul gehört zum Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten Studienschwerpunkt, Vertiefungswissen Mathematik oder Freier Wahlbereich einbringbar.</td></tr>
<tr><td>Teilnahme-voraussetzungen</td><td colspan="10">Wesentliche Kenntnisse aus den Modulen Einführung in die Kommutative Algebra und Algebraische Geometrie sowie Algebraische Geometrie und torische Varietäten werden vorausgesetzt.</td></tr>
<tr><td>Modul-verantwortliche</td><td colspan="10">Jürgen Hausen</td></tr>
</table>

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-45-16**	**Modultitel:** Algebraische Gruppen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Definition und Beispiele algebraischer Gruppen. • Hopf Algebren. • Operationen von algebraischen Gruppen auf Varietäten. • Linearisierung von algebraischen Gruppen. • Gruppen-Abschluss. • Auflösbare und nilpotente Gruppen. • Die Lie-Algebra einer algebraischen Gruppe. • Beispiele von Lie-Algebren. • Faltungen und Kommutatoren. • Die adjungierte Darstellung und ihre Differential. • Die Jordan-Zerlegung in affinen algebraischen Gruppen. • Charaktere einer algebraischen Gruppe. • Halbinvarianten einer rationalen Darstellung. • Existenz und Konstruktion von Quotienten mit Anwendungen. • Diagonalisierbare Gruppen und Tori. • Rigidität von diagonalisierbaren Gruppen. • Satz von Lie-Kolchin. • Struktur der affinen auflösbaren Gruppen. • Zentralisatoren von halbeinfachen Elementen algebraischer Gruppen. • Borel-Untergruppen und Wurzelsysteme. • Struktur und Klassifikation von halbeinfachen algebraischen Gruppen.		

Qualifikationsziele

Die Studierenden haben eine große Klasse wichtiger Gruppen und algebraischer Varietäten kennengelernt, die in vielen mathematischen Gebieten eine wesentliche Rolle spielen. Sie haben gelernt, wie Methoden der Gruppentheorie und der algebraischen Geometrie sich gegenseitig ergänzen und zu einem tieferen Verständnis führen können. Sie haben den Ansatz der Klassifikation mathematischer Objekte an einer wichtigen Beispielklasse kennengelernt und haben dabei in Methodenkenntnisse erworben, die auch bei der Klassifikation in ganz anderen mathematischen Bereichen eine tragende Rolle spielen. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Algebraische Gruppen	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur

Exemplarische Literatur:

- James E. Humphreys: Linear Algebraic Groups. Springer 1975. 21, Springer-Verlag 1981.
- Armand Borel: Linear algebraic groups. Springer 1991.

Verwendbarkeit

Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Das Modul kann wegen der großen inhaltlichen Überschneidungen nicht zusammen mit den Modulen 'Algebraische Transformationsgruppen' eingebracht werden.

Teilnahmevoraussetzungen

Kenntnisse aus den Modulen Kommutative Algebra und Algebraische Geometrie sind hilfreich, aber nicht zwingend Voraussetzung für die Teilnahme am Modul Algebraische Gruppen.

Modulverantwortliche

Victor Batyrev, Jürgen Hausen

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-45-18**	**Modultitel:** Cox Ringe		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Divisorielle Algebren. • Cox Ringe. • Charakteristische Räume. • Gute Quotienten. • Geometrische Invariantentheorie. • Gale-Dualität. • Verbindungen zur torischen Geometrie. • Definierende Daten für Varietäten mit endlich erzeugtem Cox Ring. • Singularitäten. • Picardgruppe. • Basisorte. • Ampleness. • Kanonische Klasse. • Intrinsische Quadriken. • k*-Flächen. • Varietäten mit Torusoperation.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben ihre Kenntnis und ihr Verständnis der zentralen Begriffe, Ergebnisse und Methoden der modernen algebraischen Geometrie in ihrem Wechselspiel zwischen Geometrie und Algebra und Kombinatorik vertieft. Sie haben mit den Cox Ring als algebraisches Objekt zur Untersuchung spezieller Klassen von geometrischen Räumen kennen gelernt. Sie erweitern dabei das Wechselspiel von Algebra und Geometrie um eine weitere wichtige methodische Komponente. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Cox Ringe	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Ivan Arzhantsev, Ulrich Derenthal, Jürgen Hausen, Antonio Laface: Cox Rings. CUP 2014.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Es werden Kenntnisse aus der kommutativen Algebra und der algebraischen Geometrie im Umfang des Moduls Einführung in die kommutative Algebra und algebraische Geometrie vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Jürgen Hausen

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-45-19	**Modultitel:** Reelle Algebraische Geometrie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	6		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 3 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Dieser Kurs zielt darauf ab, in verschiedene Aspekte des Studiums der Topologie reeller algebraischer Varietäten einzutauchen. Dabei geht es um Fragen im Zusammenhang mit dem 16. Hilbert-Problem: Wir befassen uns mit Obstruktionen für die Existenz topologischer Typen reeller algebraischer Varietäten und mit deren Realisierung mittels verschiedener Konstruktionstechniken, mit besonderem Augenmerk auf niedrigdimensionalen Fällen.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden lernen einige fundamentale Unterschiede der Algebraischen Geometrie über den komplexen und reellen Zahlen kennen. Sie sind vertraut mit der Anwendung topologischer und algebraischer Methoden zur Untersuchung reeller algebraischer Varietäten. Sie haben erfahren, wie moderne Methoden genutzt werden können um ungelöste wissenschaftliche Fragen des ausgehenden 19. Jahrhunderts zu untersuchen und zu beantworten. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungenstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Reelle Algebraische Geometrie	V	f	3	4,5	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	ü	f	1	1,5					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Frederice Mangolte: Real Algebraic Varieties. Springer 2020. • Robert Silhol: Real Algebraic Surfaces. Springer 1989. • Riccardo Benedetti, Jean-Jacques Risler: Real Algebraic and Semi-algebraic Sets. Editions Herrmann 1990. • Alex Degtyarev, Viatcheslav Kharlamov: Topological properties of real algebraic varieties: du côté de chez Rokhlin. arXiv:math/0004134.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunkts gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Grundlegende Kenntnisse in Algebraischer Geometrie oder Algebraischer Topologie sind hilfreich, aber nicht zwingend erforderlich.
Modul-verantwortliche	Hannah Markwig

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-45-20**	**Modultitel:** Einführung in die Berkovich Geometrie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 3 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Nicht-Archimedische Körper, Bewertungen, und Betragsfunktionen. • Ultra-metrische Dreiecksangleichung und induzierte Topologie. • Affinoide Bereiche. • Berkovich affine und projektive Gerade. • Analytifizierung algebraischer Varietäten.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die wichtigsten Beispiele für nicht-Archimedische Körper kennengelernt und haben sich mit deren induzierter Topologie vertraut gemacht. Dabei haben sie die fundamentalen Probleme im Hinblick auf eine Theorie der analytischen Geometrie über diesen Körpern verstanden und Berkovichs Ansatz zur Überwindung dieser Probleme kennengelernt. Die Studierenden haben die projektive Gerade in Berkovichs Sprache sowohl mengentheoretisch als auch topologisch detailliert untersucht. Dabei haben die Studierenden eine Art von geometrischem Raum kennen gelernt, welcher sich grundlegend von anderen Beispielen aus dem Studium (Vektorräume, Varietäten, Mannigfaltigkeiten, etc.) unterscheidet. Bezüge zur algebraischen Geometrie via des Analytifizierungsfunktors sind ihnen vertraut. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Einführung in die Berkovich Geometrie	V	f	3	4,5	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Annette Werner: Nichtarchimedische Geometrie. Vorlesungsskript.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* und *Analysis und Differntialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Grundlegende Kenntnisse topologischer Begriffe werden vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Hannah Markwig

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-45-21	**Modultitel:** Algebraische Zahlentheorie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Ganzzahlringe. • Klassenzahlen. • Der Dirichletsche Einheitensatz. • Erweiterungen von Dedekindringen. • Bewertungstheorie. • Lokale Körper. • Adele und Idele.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die zentralen Begriffe, Ergebnisse und Methoden der algebraischen Zahlentheorie kennengelernt. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Algebraische Zahlentheorie	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Jürgen Neukirch: Algebraische Zahlentheorie. Springer 2007. • Alexander Schmidt: Einführung in die algebraische Zahlentheorie. Springer 2007. • Andre Weil: Basic number theory. Springer 1995.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modulverantwortliche	Victor Batyrev, Anton Deitmar, Jürgen Hausen

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-45-22**	**Modultitel:** Zahlentheorie und Kryptographie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • RSA-Kryptosystem, Primzahltests, AKS-Algorithmus. • Faktorisierungsverfahren, Zahlkörpersieb. • Quadratische Reziprozität in der Kryptographie. • Berechnung des diskreten Logarithmus. • Dynamische Systeme und die Pollard-Rho-Methode. • Elliptische-Kurven-Kryptographie. • Gitter und Post-Quanten-Kryptographie. • Zero-Knowledge-Beweis, digitale Signaturen und Hashfunktionen.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die grundlegenden Begriffe der elementaren Zahlentheorie und ihre Anwendungen auf die Kryptographie kennengelernt. Sie haben ihre Kenntnisse über Nachbardisziplinen vertieft und erweitert: Sie begegnen Methoden der Theorie dynamischer Systeme und lernen elliptische Kurven über endlichen Körpern kennen. Sie verstehen, wie grundlegende kryptographische Protokolle funktionieren. Durch die Beschäftigung mit zahlreichen offenen Problemen der Kryptographie, deren Lösungsansätze überraschenderweise aus unterschiedlichsten Bereichen der Mathematik stammen können, üben die Studierenden kritisch zu denken. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

<table>
<tr><td rowspan="4">Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Number Theory and Cryptography</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180 o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
<tr><td colspan="10">In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Literatur</td><td colspan="10">Exemplarische Literatur:
• Jeffrey Hoffstein, Jill Pipher, Joseph H. Silverman: An introduction to mathematical cryptography. Springer 2008.
• Stefan Müller-Stach, Jens Piontkowski: Elementare und algebraische Zahlentheorie. Vieweg+Teubner 2011.
• Joseph H. Silverman, John T. Tate: Rational points on elliptic curves. Springer 1992.
• Nigel Smart: Cryptography: An introduction. McGraw-Hill 2003. (online version: https://www.cs.bris.ac.uk/~nigel/Crypto_Book/).
• Lawrence C. Washington: Elliptic curves: Number theory and cryptography. Chaman & Hall/CRC 2008.</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="10">Das Modul gehört zum Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten Studienschwerpunkt, Vertiefungswissen Mathematik oder Freier Wahlbereich einbringbar.
Das Modul kann wegen der großen inhaltlichen Überschneidungen nicht zusammen mit den Modulen ’Elliptische Kurven und Kryptographie’ eingebracht werden.</td></tr>
<tr><td>Teilnahmevoraussetzungen</td><td colspan="10">Die Inhalte des Moduls Algebra aus dem Studiengang Bachelor of Science werden vorausgesetzt.</td></tr>
<tr><td>Modulverantwortliche</td><td colspan="10">Elena Klimenko, Thomas Markwig</td></tr>
</table>

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-45-23</td><td colspan="2">Modultitel:
Modulformen</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Modulformen für die Modulgruppe und ihre Kongruenzuntergruppen.
• Beispiele: Eisenstein-Reihen, Dedekindsche Etafunktion, Theta-Reihen.
• Modulkurven als Riemannsche Flächen.
• Arithmetische Anwendungen und Vermutungen.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden lernen die grundlegenden Begriffe, Ergebnisse und Methoden der klassischen Theorie der Modulformen kennen. Sie kennen analytische, algebraische und geometrische Aspekte von Modulformen. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Modulformen</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Henri Cohen, Fredrik Stromberg: Modular forms. A classical approach. AMS Graduate Studies of Mathematics 2017. • Fred Diamond, Jerry Shurman: A first course in modular forms. Springer 2005. • Max Koecher, Aloys Krieg: Elliptische Funktionen und Modulformen. Springer 2007. • Toshitsune Miyake: Modular forms. Springer 1989.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen, grundlegende Kenntnisse aus der Algebra und der Funktionentheorie sind aber hilfreich.
Modulverantwortliche	Anton Deitmar, Anna von Pippich

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-45-24**	**Modultitel:** Elliptische Funktionen und Elliptische Kurven		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Elliptische Funktionen, Weierstrass-P-Funktion, Riemannsche Flächen, komplexe Tori. • Ebene projektive Kurven, Satz von Bezout, elliptische Kurven. • Kurven über endlichen Körpern, rationale Punkte. • Anwendungen in der Kryptographie. • Zudem eine Auswahl aus den folgenden Themen: – Modulformen; – Klassifikation elliptischer Kurven; – Modulräume.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben ihre Kompetenzen zum mathematisch-interdisziplinären Arbeiten vertieft. Sie haben elliptische Kurven als eine Klasse mathematischer Objekte kennengelernt, die übergreifend in einem weiten Spektrum mathematischer Teilgebiete eine wichtige Rolle spielt. Sie haben die für diesen Kontext relevanten Begriffe, Methoden und Ergebnisse aus den Disziplinen Funktionentheorie, Algebraische Geometrie, Zahlentheorie, Topologie und Kryptographie kennengelernt und ihre Wechselwirkung verstanden. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Elliptische Funktionen und Elliptische Kurven	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur

Exemplarische Literatur:

- Wolfgang Fischer, Ingo Lieb: Funktionentheorie. Vieweg 2005.
- Gerd Fischer: Ebene algebraische Kurven. Vieweg 1994.
- Joseph H. Silverman: The arithmetic of elliptic curves. Springer 2009.
- Ian Blake, Gadiel Seroussi, Nigel Smart: Elliptic curves in cryptography. CUP 1999.

Verwendbarkeit

Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* und *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.

Teilnahmevoraussetzungen

Inhaltlich wird die Einführung in die Funktionentheorie vorausgesetzt.

Modulverantwortliche

Jörg Zintl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-45-25**	**Modultitel:** Elementare Zahlentheorie	**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	6	
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 180 h; Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester	
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig	
Fachsemester	1-3	
Unterrichtssprache	Deutsch	
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS	

Modulinhalt

Inhalte:

- Teilbarkeit in den ganzen Zahlen.
- Primzahlen.
- Kongruenzen.
- Quadratische Reste.
- Arithmetische Funktionen.
- Multiplikative Funktionen.
- Klassische Sätze.
- Anwendungen.

Qualifikationsziele

Die Studierenden vertiefen Grundkenntnisse über die ganzen Zahlen und erleben das Anwenden auf mathematische Probleme unterschiedlicher Art. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Elementare Zahlentheorie	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Friedhelm Padberg: Elementare Zahlentheorie. Spektrum Akademischer Verlag 2001. • Stefan Mueller-Stach, J. Piontkowski: Elementare und algebraische Zahlentheorie. Vieweg 2006.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Inhaltlich werden nur Grundkenntnisse aus der Linearen Algebra zu Gruppen und Ringen vorausgesetzt.
Modulverantwortliche	Victor Batyrev, Thomas Markwig

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-45-26	**Modultitel:** Einführung in die Analytische Zahlentheorie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Arithmetische Funktionen und Dirichlet-Reihen, • Primzahlsatz und Dirichletscher Primzahlsatz, • Nullstellen der Riemannschen Zetafunktion, Riemann-Hypothese und die Explizite Formel.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden verstehen das Zusammenspiel von Analysis und Zahlentheorie. Sie können analytische Methoden auf zahlentheoretische Probleme anwenden. Sie verstehen den Mechanismus analytischer Fortsetzung durch Integraldarstellung und haben gelernt, ihn selbständig auf andere Fälle, wie automorphe L-Funktionen, zu übertragen. Sie haben ein Verständnis für die Riemann-Hypothese gewonnen, die als schwierigstes Problem der gesamten Mathematik gilt und verstehen ihre Tiefe. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Einführung in die Analytische Zahlentheorie	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Komaravolu Chandrasekharan: Introduction to Analytic Number Theory. Springer 1968.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* sowie *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.

Teilnahme-voraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modul-verantwortliche	Anton Deitmar

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-45-27**	**Modultitel:** Elliptische Kurven und Kryptographie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Grundlegende Konzepte der Kryptographie. • Symmetrische Kryptosysteme, Public Key Systeme, diskreter Logarithmus, RSA. • Primfaktorzerlegung, Angriffe auf Kryptosysteme. • Grundlegende Konzepte der projektiven Geometrie. • Elliptische Kurven als abelsche Gruppen. • Kurven über endlichen Körpern, Frobenius Morphismus, Endomorphismenring. • Punkte Zählen, Hasse-Schranke, Weil Vermutungen, Schoofs Algorithmus. • Kryptosysteme auf elliptischen Kurven, Algorithmen und Angriffe.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden kennen die grundlegenden Aufgabenstellungen und Konzepte der Kryptographie. Sie verstehen die kryptographisch motivierten Fragestellungen an elliptische Kurven, und haben Einblick in die fortgeschrittenen algebraischen und geometrischen Techniken zu deren Beantwortung. Sie verstehen die Herausforderungen der algorithmischen Umsetzung und kennen Standardalgorithmen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

<table>
<tr><td rowspan="4">Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Elliptische Kurven und Kryptographie</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
<tr><td colspan="10">In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Literatur</td><td colspan="10">Exemplarische Literatur:
• Albrecht Beutelspacher, Jörg Schwenk, Klaus-Dieter Wolfenstetter: Moderne Verfahren in der Kryptographie. Springer 2015.
• Joseph H. Silverman: The arithmetic of elliptic curves. Springer 2009.
• Ian Blake, Gadiel Seroussi, Nigel Smart: Elliptic curves in cryptography. CUP 1999.</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="10">Das Modul gehört zu den Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie und Analysis und Differentialgeometrie. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten Studienschwerpunkt, Vertiefungswissen Mathematik oder Freier Wahlbereich einbringbar.
Das Modul kann wegen der großen inhaltlichen Überschneidungen nicht zusammen mit den Modulen 'Zahlentheorie und Kryptographie' eingebracht werden.</td></tr>
<tr><td>Teilnahme-voraussetzungen</td><td colspan="10">Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.</td></tr>
<tr><td>Modul-verantwortliche</td><td colspan="10">Jörg Zintl</td></tr>
</table>

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer:	**Modultitel:**	**Art des Moduls:**
MAT-45-28	Elliptische Kurven und Taniyama-Shimura	Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit

ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		

Modulinhalt

Inhalte:

- Gruppen-Gesetz, Arithmetik elliptischer Kurven.
- Modulare Kurven und Formen.
- Riemannsche Flächen, abelsche Differentiale, Jakobische.
- Geometrische Version der Taniyama-Shimura-Vermutung (Wilesscher Modularitätssatz) erklärt.
- Zusammenhang mit Fermats letztem Satz.
- L-Reihen.

Qualifikationsziele

Die Studierenden haben das Zusammenspiel von Methoden der Algebra, der Zahlentheorie und der Geometrie zur Beantwortung tiefliegender mathematischer Fragestellungen am Beispiel der Vermutung von Taniyama-Shimura und ihrer Anwendung zum Beweis des Fermatschen Satzes kennen- und verstehen gelernt. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Elliptische Kurven und Taniyama-Shimura	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Joseph H. Silverman: The Arithmetic of Elliptic Curves. Springer 2009.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* und *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus den Modulen Einführung in Riemannsche Flächen und Algebraische Zahlentheorie werden vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Ivo Radloff

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-45-29</td><td colspan="2">Modultitel:
Einführung in Modulformen</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">3</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
90 h</td><td>Kontaktzeit:
30 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte: Das Studium der modularen Formen hat seine Wurzeln im späten 19. und frühen 20. Jahrhundert bei Gauß, Eisenstein und Ramanujan und ist eine faszinierende Mischung aus Analysis und Algebra. Sie haben viele überraschende Anwendungen in der Zahlentheorie, einschließlich eines schönen Beweises des Satzes der vier Quadrate von Lagrange und des bahnbrechenden Beweises des letzten Satzes von Fermat im Jahr 1995. Dieser Kurs soll ein einführendes Verständnis für dieses umfassende Thema vermitteln.
Modulformen für die Modulgruppe und ihre Kongruenzuntergruppen.
Beispiele: Eisenstein-Reihen, Ramanujansche Delta Funktion, Theta-Reihen.
Arithmetische Anwendungen und Vermutungen.
Hecke-Operatoren und Eigenformen.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden haben die grundlegenden Begriffe, Ergebnisse und Methoden der klassischen Theorie der Modulformen kennen gelernt. Sie kennen analytische, algebraische und geometrische Aspekte von Modulformen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td>Einführung in Modulformen</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td>nein</td><td>K o. mP</td><td>90-180
o. 20-30</td><td>b</td><td>100</td></tr>
</table>
Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Henri Cohen, Fredrik Stromberg: Modular forms. A classical approach. AMS Graduate Studies of Mathematics 2017. • Fred Diamond, Jerry Shurman: A first course in modular forms. Springer 2005. • Max Koecher, Aloys Krieg: Elliptische Funktionen und Modulformen. Springer 2007. • Toshitsune Miyake: Modular forms. Springer 1989. • Lloyd James Peter Kilford: Modular forms: A classical and computational introduction. Imperial College Press 2015. • Deitmar Anton: Automorphic forms. Springer 2013.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. Das Modul kann wegen der großen inhaltlichen Überschneidungen nicht zusammen mit dem Modul 'Modulformen' eingebracht werden.
Teilnahmevoraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen, grundlegende Kenntnisse aus der Algebra und der Funktionentheorie sind aber hilfreich.
Modulverantwortliche	Anton Deitmar

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-45-31</td><td colspan="2">Modultitel:
Darstellungstheorie endlicher Gruppen</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">6</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
180 h</td><td>Kontaktzeit:
60 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Gruppen und Gruppenwirkungen.
• Darstellungen, Irreduzibilität, Schursches Lemma.
• Halbeinfachheit, Satz von Maschke.
• Charaktere, Orthogonalitätsrelationen.
• Isotypische Zerlegung, Charaktertafeln.
• Darstellungen der symmetrischen Gruppe.
• halbeinfache Artinsche Algebren.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden lernen in der Vorlesung die Grundzüge der Darstellungstheorie und entwickeln ein Verständnis für das Zusammenwirken geometrischer und algebraischer Methoden. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Darstellungstheorie endlicher Gruppen</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180 o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • William Fulton, Joe Harris: Representation theory. Springer 1991. • Bertram Huppert: Character theory of finite groups. De Gruyter 1998. • Serge Lang: Algebra. Springer 2002. • Jean-Pierre Serre: Linear representations of finite groups. Springer 1977.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. Das Modul kann wegen der großen inhaltlichen Überschneidungen nicht zusammen mit den Modulen 'Group Representations in Physics' eingebracht werden.
Teilnahmevoraussetzungen	Inhaltlich werden nur Grundkenntnisse aus der Linearen Algebra vorausgesetzt.
Modulverantwortliche	Victor Batyrev, Jürgen Hausen, Milena Wrobel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-45-40</td><td colspan="2">Modultitel:
Einführung in die Kombinatorische Birationale Geometrie</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:

Glatte projektive torische Fläche P_Δ zu einem Gitterpolygon Δ. Die Momentenabbildung für eine Fläche X über den komplexen Zahlen. Die rationale Äquivalenz auf Randdivisoren. Die Divisorklassengruppe $Cl(X)$ und die bilineare Schnittpaarung auf $Cl(X)$.
Cartier-Divisoren, Geradenbündel, invertierbare Garben. Der kanonische Divisor einer normalen Varietät. Ample und sehr ample Divisoren.
Nicht-entartete algebraische Kurven in torischen Flächen. Blow-ups von torischen Flächen. Birationale Modifikation einer Fläche durch Blow-ups und Blow-downs.
Der Kegel der Kurven einer Fläche. Die Zariski-Zerlegung. Birationale Cremona-Transformationen.
Desingularisierung von nicht-entarteten Kurven D auf glatten torischen Flächen X durch Blow ups. Kombinatorische Konstruktion von Minimalmodellen von Paaren (X, D) für normale torische Flächen X.
Zyklischen Quotientensingularitäten von Flächen und ihre kombinatorische minimale Desingularisierung.
Endliche Untergruppen von $SU(2)$ und Oberflächen-Du-Val-Singularitäten und ihre minimale Desingularisierung.
Birationale Klassifikation von nicht-entarteten Flächen in 3-dimensionalen torischen Varietäten über das feine Innere $F(\Delta)$ ihrer Newton-Polytope Δ.
Die Kodaira-Dimension von algebraischen Varietäten. Kombinatorische Konstruktion von Minimalmodellen von nicht-entarteten Flächen.
Kombinatorische Formeln für die Hodge-Zahlen von Minimalmodellen.
</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden lernen in der Vorlesung wie man Begriffe, Ergebnisse und Methoden der konvexen Geometrie anwendet, um sich wichtige Klassen algebraischer Flächen zu untersuchen. Sie lernen dabei komplexe algebro-geometrische Konstruktionen kennen und zu berechnen. Sie sind mit einem interessanten und tiefliegenden Klassifikationsproblem, den Minimalmodellen für algebraische Flächen, vertraut. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
</table>

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Einführung in die Kombinatorische Birationale Geometrie	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur

Exemplarische Literatur:

- Laurent Buse, Fabrizio Catanese, Elisa Postinghel: Algebraic Curves and Surfaces: A History of Shapes. Springer 2023.
- Klaus Hulek: Elementare Algebraische Geometrie. Springer 2012.
- Tadao Oda: Convex Bodies and Algebraic Geometry: An Introduction to the Theory of Toric Varieties. Springer 1988.
- Robin Hartshorne: Algebraic Geometry. Springer 1977.

Verwendbarkeit

Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.

Teilnahmevoraussetzungen

Es werden Kenntnisse aus der Kommutativen Algebra und der Algebraischen Geometrie vorausgesetzt: einige für den Kurs wesentliche Begriffe aus diesen Gebieten werden zu Beginn der Lehrveranstaltung kurz wiederholt.

Modulverantwortliche

Victor Batyrev

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-45-41**	**Modultitel:** Einführung in die Kombinatorische Spiegelsymmetrie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	6		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • 3-dimensionale Quintiken im 4-dimensionalen projektiven Raum und ihre Spiegel. • Torische Varietäten mittels Fächern von rationalen polyedrischen Kegeln. Torische Varietäten mittels Gitterpolyedern. Glattheit. • Auflösung von Singularitäten. Kohomologieringe von glatten projektiven torischen Varietäten. • Konstruktion von Calabi-Yau-Varietäten als Hyperflächen in torischen Varietäten mittels reflexiver Polyeder. • Eine kombinatorische Formel für Hodge-Zahlen von Calabi-Yau 3-dimensionalen Varietäten. Monomial-Divisor-Correspondence. • Kombinatorische Spiegelkonstruktion für Calabi-Yau vollständige Durchschnitte. Spiegel von starren Calabi-Yau-Varietäten. • Berechnung von Perioden von Calabi-Yau-Hyperflächen unter Verwendung verallgemeinerter hypergeometrischer Funktionen. • Stringy Hodge Zahlen von singulären Calabi-Yau Varietäten. • Modul-Räume. Randpunkte in Modul-Räumen von Calabi-Yau-Hyperflächen und Sekundärpolytope. • Berechnung von Gromov-Witten-Invarianten von Calabi-Yau vollständigen Durchschnitten. • Ein kombinatorischer Ansatz zur Berglund-Hübsch-Spiegelsymmetrie. Die kombinatorische Spiegelsymmetrie schlägt einen rein kombinatorischen Ansatz für die Spiegelsymmetrie vor, der auf der polaren Dualität in der Klasse reflexiver Gitterpolytope beruht. Die platonischen Körper liefern die berühmtesten Beispiele für polare Dualpaare von Polyedern: Würfel-Oktaeder, Ikosaeder-Dodekaeder. Bei der kombinatorischen Spiegelsymmetrie ist ein wesentlicher Umstand, dass die Eckpunkte der betrachteten reflexiven Polyeder Δ Elemente des Gitters M sind und die Eckpunkte der dualen reflexiven Polyeder Δ^* dem dualen Gitter N angehören. Das Gitter M kann mit dem Gitter der Zeichen eines algebraischen Torus T identifiziert werden, und das duale Gitter N wird zum Gitter der Ein-Parameter-Untergruppen in T. Aus diesem Grund ist das Hauptwerkzeug des kombinatorischen Ansatzes die Theorie der torischen Varietäten. Die kombinatorische Spiegelsymmetrie ermöglicht es uns, die von Physikern entdeckte Spiegelsymmetrie für 3-dimensionale Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten zu interpretieren, indem wir von M zu N und von Δ zu Δ^* übergehen. Ziel des Moduls ist es, den Zusammenhang zwischen reflexiven Polyedern und Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten auf möglichst verständliche Weise zu erklären und die Studierenden über weitere Ergebnisse zu informieren, die mit Hilfe dieser kombinatorischen Dualität erzielt wurden.		

Qualifikationsziele

Die Studierenden sind mit den komplexen Fragestellungen der Spiegelsymmetrie vertraut, die eine Dualität zwischen Mannigfaltigkeiten der symplektischen und der algebraischen Geometrie herstellt und zuerst von Physikern postuliert wurde. Sie haben gelernt, wie für sehr wichtige Klassen von Calabi-Yau-Varietäten Methoden der torischen Geometrie und der diskreten Mathematik genutzt werden können, um die Spiegel der Mannigfaltigkeiten und ihre Invarianten konkret zu berechnen. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Einführung in die Kombinatorische Spiegelsymmetrie	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur

Exemplarische Literatur:

- Victor Batyrev: Dual Polyhedra and Mirror Symmetry for Calabi-Yau Hypersurfaces in Toric Varieties. J. Alg. Geom. 3 (1994), no. 3, 493–535.
- Victor Batyrev, Duco van Straten: Generalized hypergeometric functions and rational curves on Calabi-Yau complete intersections in toric varieties. Comm. Math. Phys., 168:3 (1995), 493–533.
- Victor Batyrev and Lev A. Borisov: Dual cones and mirror symmetry for generalized Calabi-Yau manifolds. Mirror Symmetry II, AMS/IP Stud. Adv. Math. 1, Amer. Math. Soc., Providence, RI (1997), 71–86.
- David Cox, Sheldon Katz: Mirror Symmetry and Algebraic Geometry. Mathematical Surveys and Monographs, Vol. 68, AMS, 1999.
- Israil Gelfand, Mikhail Kapranov, Andrei Zelevinsky: Discriminants, Resultants and Multidimensional Determinants. Springer-Birkhäuser 1994.
- Masao Jinzenji: Classical Mirror Symmetry. SpringerBriefs in Mathematical Physics, Band 29, 2018.

Verwendbarkeit

Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.

Teilnahmevoraussetzungen

Kenntnisse aus den Modulen Kommutative Algebra und Algebraische Geometrie werden vorausgesetzt.

Modulverantwortliche

Victor Batyrev

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-50-02	**Modultitel:** Konvexe Geometrie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Kegel, Polytope, Polyeder, Fächer, Polyederkomplexe. • Normalenfächer von Polygonen. • Triangulierungen, Unterteilungen, Sekundärfächer, Diskriminanten.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden lernen in der Vorlesung grundlegende Begriffe, Ergebnisse und Methoden der konvexen Geometrie kennen. Sie entwickeln ein vertieftes Verständnis für den Begriff der Dualität mathematischer Objekte am Beispiel von Polytopen und Fächern. Ferner schulen sie ihr geometrisches Anschauungs- und ihr räumliches Vorstellungsvermögen. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Konvexe Geometrie	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur

Exemplarische Literatur:

- Günter M. Ziegler: Lectures on Polytopes. Springer 1998.

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modulverantwortliche	Hannah Markwig

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-50-03</td><td colspan="2">Modultitel:
Tropische Geometrie</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Tropische Zahlen und Polynome.
• Tropische Hyperflächen und Varietäten.
• Tropische torische Varietäten.
• Matroid-Fächer und abstrakte tropische Varietäten.
• Tropische Modifikationen, stabile Schnitte und rationale Äquivalenz.
• Tropische Kurven und lineare Systeme.
• Tropische (p, q)-Homologie.
• Korrespondenzsätze.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden kennen und verstehen die genannten Begriffe der tropischen Geometrie und die grundlegenden Techniken im Umgang mit ihnen. Sie sind zu einem vertieften Verständnis insbesondere der konvexen Geometrie gelangt und haben beispielhaft erfahren, wie Konzepte aus der Kombinatorik in der algebraischen Geometrie Anwendung finden. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
</table>

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Tropische Geometrie	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur

Exemplarische Literatur:

- Grigory Mikhalkin, Johannes Rau: Tropical geometry. Manuscript 2018.
- Diane Maclagan, Bernd Sturmfels: Introduction to tropical geometry. AMS 2015.

Verwendbarkeit

Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.

Teilnahmevoraussetzungen

Es gibt keine weiteren Voraussetzungen, Kenntnisse aus Modulen Algebraische Geometrie und Differentialgeometrie sind aber hilfreich.

Modulverantwortliche

Hannah Markwig, Johannes Rau

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-50-04**	**Modultitel:** Tropische Enumerative Geometrie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Enumerative Geometrie von algebraischen Kurven, besonders in der Ebene. • Tropische Enumerative Probleme und Multiplizitäten. • Kombinatorische Methoden, Etagendiagramme und Gitterpfade. • Korrespondenzsätze für Kurven in der Ebene durch vorgegebene Punkte. • Tropische und klassische Gromov-Witten-Theorie in Geschlecht 0. • Reelle Zählungen, Welschinger Invarianten und polynomiale Invarianten. • Hurwitzzahlen. • Tropische Korrespondenzen für Hurwitzzahlen. • Reelle Hurwitzzahlen und Zigzag Zahlen.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden kennen grundlegende Begriffe, Ergebnisse und Methoden der enumerative Geometrie im Zusammenhang mit Methoden der tropischen Geometrie. Sie entwickeln ein vertieftes Verständnis für Möglichkeiten und Beschränkungen des tropischen Zugangs im Zusammenhang mit komplexeren Fragestellungen. Ferner vertiefen sie ihr Wissen im Bereich der algebraischen Geometrie in Richtung von Modulräumen und Gromov-Witten-Theorie. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

<table>
<tr><td rowspan="4">Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Tropische Enumerative Geometrie</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
<tr><td colspan="10">In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Literatur</td><td colspan="10">Exemplarische Literatur:
• Grigory Mikhalkin, Johannes Rau: Tropical geometry. Manuscript 2018.</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="10">Das Modul gehört zum Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten Studienschwerpunkt, Vertiefungswissen Mathematik oder Freier Wahlbereich einbringbar.</td></tr>
<tr><td>Teilnahme-voraussetzungen</td><td colspan="10">Inhaltlich wird das Modul Tropische Geometrie vorausgesetzt.</td></tr>
<tr><td>Modul-verantwortliche</td><td colspan="10">Hannah Markwig, Johannes Rau</td></tr>
</table>

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-50-05**	**Modultitel:** Einführung in die Tropische Enumerative Geometrie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	5		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Enumerative Geometrie von algebraischen Kurven, besonders in der Ebene. • Tropische Enumerative Probleme und Multiplizitäten. • Kombinatorische Methoden, Etagendiagramme und Gitterpfade. • Korrespondenzsätze für Kurven in der Ebene durch vorgegebene Punkte. • Reelle Zählungen, Welschinger Invarianten und polynomiale Invarianten.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden kennen grundlegende Begriffe, Ergebnisse und Methoden der enumerative Geometrie im Zusammenhang mit Methoden der tropischen Geometrie. Sie entwickeln ein vertieftes Verständnis für Möglichkeiten und Beschränkungen des tropischen Zugangs im Zusammenhang mit komplexeren Fragestellungen. Ferner vertiefen sie ihr Wissen im Bereich der algebraischen Geometrie in Richtung von Modulräumen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Einführung in Tropische Enumerative Geometrie	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	1	2					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Grigory Mikhalkin, Johannes Rau: Tropical geometry. Manuscript 2018.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. Das Modul ist inhaltlich Teil des Moduls Tropische Enumerative Geometrie und kann nicht mit diesem zusammen eingebracht werden.
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse in Tropischer Geometrie sind hilfreich, aber nicht erforderlich.
Modul-verantwortliche	Hannah Markwig

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-50-06**	**Modultitel:** Tropische Enumerative Geometrie - Teil 2		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	5		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Ebene Kurven höheren Geschlechts. • Multiplizitäten. • Welschinger Invarianten. • Gitterwege. • Stockwerkdiagramme. • Hurwitzzahlen. • Tropische Modulräume.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden vertiefen ihre Kenntnisse zur Kombinatorik ebener tropischer Kurven. Sie sind ebenso vertraut mit verschiedenen Methoden, tropische Kurven zu zählen, wie mit unterschiedlichen enumerativen Problemen, die mit Hilfe der tropischen Geometrie gelöst werden können. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Tropische Enumerative Geometrie - Teil 2	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	1	2					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Diane Maclagan, Bernd Sturmfels: Introduction to tropical geometry. AMS 2015. • Grigory Mikhalkin, Johannes Rau: Tropical geometry. Manuscript 2018.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. Das Modul ist inhaltlich Teil des Moduls Tropische Enumerative Geometrie und kann nicht mit diesem zusammen eingebracht werden.
Teilnahmevoraussetzungen	Inhaltlich wird das Modul Einführung in die Tropische Enumerative Geometrie vorausgesetzt.
Modulverantwortliche	Hannah Markwig

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-50-10</td><td colspan="2">Modultitel:
Geometrie von Mannigfaltigkeiten 1</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Mannigfaltigkeiten und Untermannigfaltigkeiten.
• Vektorfelder und Flüsse.
• Metriken, Grundlagen der Riemannschen Geometrie.
• Vektorbündel und Zusammenhänge.
• Komplexe Strukuren.
• Satz von Gauß-Bonnet auf Flächen.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden kennen und verstehen die genannten Begriffe der reellen und komplexen Differentialgeometrie und die grundlegenden Techniken im Umgang mit ihnen. Sie sind zu einem vertieften Verständnis insbesondere der Differential- und Integralrechnung gelangt und haben beispielhaft erfahren, wie die mathematischen Konzepte in natürlicher Weise in der Geometrie Anwendung finden. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Geometrie von Mannigfaltigkeiten 1</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180 o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Sylvestre Gallot, Dominique Hulin, Jacques Lafontaine: Riemannian Geometry. Springer 2004. • John M. Lee: Introduction to Smooth Manifolds. Springer 2012. • Liviu I. Nicolaescu: Lectures On The Geometry Of Manifolds. World Scientific 1996. • Clifford Henry Taubes: Differential Geometry: Bundles, Connections, Metrics and Curvature. Oxford University Press 2011.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* und *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. Das Modul kann wegen der großen inhaltlichen Überschneidungen nicht zusammen mit dem Modul 'Geometry in Physics' eingebracht werden.
Teilnahme-voraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modul-verantwortliche	Christoph Bohle, Frank Loose

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-50-11	**Modultitel:** Geometrie von Mannigfaltigkeiten 2		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Globale Aspekte der Riemannschen Geometrie. • Kohomologie von Mannigfaltigkeiten. • Analysis von Differentialoperatoren auf Mannigfaltigkeiten. • Anwendung auf Riemannsche Flächen (und komplexe Mannigfaltigkeiten).		
Qualifikationsziele	Die Studierenden sind mit den grundlegenden Fragestellungen der globalen reellen und komplexen Differentialgeometrie vertraut. Sie sind zu einem vertieften Verständnis differentialgeometrischer Methoden gelangt und haben beispielhaft erfahren, wie lokale und globale Aspekte in der Geometrie zusammenspielen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Geometrie von Mannigfaltigkeiten 2	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Sylvestre Gallot, Dominique Hulin, Jacques Lafontaine: Riemannian Geometry. Springer 2004. • John M. Lee: Introduction to Smooth Manifolds. Springer 2012. • Liviu I. Nicolaescu: Lectures On The Geometry Of Manifolds. World Scientific 1996. • Clifford Henry Taubes: Differential Geometry: Bundles, Connections, Metrics and Curvature. Oxford University Press 2011. • John Milnor: Morse Theory. PUP 1963. • Donu Arapura: Algebraic Geometry over the Complex Numbers. Springer 2012. • Sundararaman Ramanan: Global Calculus. AMS 2005.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* und *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich wird das Modul 'Geometrie von Manigfaltigkeiten 1' oder alternativ das Modul 'Geometry in Physics' vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Christoph Bohle, Frank Loose

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-50-12	**Modultitel:** Informationsgeometrie	**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3	
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h; Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester	
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig	
Fachsemester	1-3	
Unterrichtssprache	Deutsch	
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS	

Modulinhalt

Inhalte:

- Grundlagen der Informationsgeometrie (z.B. Fisher-Informationsmetrik und duale Zusammenhänge für parametrische statistische Modelle, Kullback-Leibler Divergenz, natürlicher Gradient).
- Anwendung auf neuronale Datenverarbeitung (insbesondere SSupervised Learningïn künstlichen neuronalen Netzen).

Qualifikationsziele

Die Studierenden haben ein elementares Verständnis davon, wie man Konzepte der Differentialgeometrie auf Probleme der Informationstheorie und Statistik anwenden kann. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Informationsgeometrie	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur

Exemplarische Literatur:

- Shun-Ichi Amari, Hiroshi Nagaoka: Methods of Information Geometry. AMS 2001.
- Anthony C. C. Coolen, Reimer Kuehn, Peter Sollich: Theory of Neural Information Processing Systems. OUP 2005.
- Shun-Ichi Amari: Natural Gradient works Efficiently in Learning. Neural Computation 1998.
- Yann Ollivier: Riemannian Metrics for Neural Networks I - Feedforward Networks. Information and Inference, IMA 2015.

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie*, *Analysis und Differentialgeometrie* und *Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Grundlegende Kenntnisse aus der Differentialgeometrie (Riemannsche Metriken, Zusammenhänge und Krümmung, Geodätische) und der Stochastik werden vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Christoph Bohle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-50-13	**Modultitel:** Informationsgeometrie und neuronale Datenverarbeitung 2		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		

Modulinhalt

Inhalte:

- Weitere Grundlagen der Informationsgeometrie (z.B. duale flache Strukturen für exponentielle Familien, Satz von Pythagoras und Informationsprojektionen, em-Algorithmus).
- Anwendung auf neuronale Datenverarbeitung (insbesondere *Unsupervised Learning* in künstlichen neuronalen Netzen, z.B. Boltzmann- und Helmholtz-Maschinen).

Qualifikationsziele

Die Studierenden haben ein elementares Verständnis davon, wie man Konzepte der Differentialgeometrie auf Probleme der Informationstheorie und Statistik anwenden kann. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Informationsgeometrie und neuronale Datenverarbeitung 2	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur

Exemplarische Literatur:

- Shun-Ichi Amari, Hiroshi Nagaoka: Methods of Information Geometry. AMS 2001.
- Anthony C. C. Coolen, Reimer Kuehn, Peter Sollich: Theory of Neural Information Processing Systems. OUP 2005.
- Shun-Ichi Amari: Natural Gradient works Efficiently in Learning. Neural Computation 1998.
- Yann Ollivier: Riemannian Metrics for Neural Networks I - Feedforward Networks. Information and Inference, IMA 2015.

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie*, *Analysis und Differentialgeometrie* und *Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Das Modul Informationsgeometrie und neuronale Datenverarbeitung wird vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Christoph Bohle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer:	**Modultitel:**		**Art des Moduls:**
MAT-50-14	Mathematische Aspekte der Neuronalen Informationsverarbeitung 1		Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Künstliche neuronale Netze und deren Training mittels Backpropagation / stochastischen Gradientenverfahren. • Dynamische Interpretation als Fluss der Daten / Aktivierungen durch das Netz (schnelle Dynamik) und Änderung der Gewichte beim Training (langsame Dynamik). • Einfache neurowissenschaftliche Modelle zur Dynamik neuronaler Netze. • Aktuelle Arbeiten zur theoretischen Fundierung des Deep Learning sowie zum biologisch plausiblen maschinellen Lernen. • In einer Fortsetzung der Vorlesung soll es um den Fall der Verarbeitung von Daten gehen, die selbst einen dynamische Ursprung haben, z.B. Zeitreihen.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die Grundlagen der Informationsverarbeitung mittels künstlicher neuronaler Netze und biologisch plausiblere Alternativen kennen gelernt. Dynamische Systeme als ein möglicher Rahmen für theoretische und mathematische Untersuchungen sind ihnen vertraut. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Mathematische Aspekte der Neuronalen Informationsverarbeitung 1	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville: Deep Learning. MIT 2016. • Anthony C. C. Coolen, Reimer Kühn, Peter Sollich: Theory of Neural Information Processing Systems. OUP 2005. • Dmitry Krotov, John J. Hopfield: Unsupervised learning by competing hidden units. PNAS 2019. • Guan-Horng Liu, Evangelos A. Theodorou: Deep Learning Theory Review - An Optimal Control and Dynamical Systems Perspective. arXiv:1908.10920.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* und *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse der Theorie der Gewöhnlichen Differentialgleichungen und der Stochastik sind erforderlich, wie sie in den ersten beiden Studienjahres B.Sc. Mathematik vermittelt werden.
Modul-verantwortliche	Christoph Bohle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-50-15**	**Modultitel:** Einführung in Riemannsche Flächen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	5		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Überlagerungen und Fundamentalgruppen. • Topologische Klassifikation der Flächen. • Satz von Riemann-Hurwitz. • Differentialformen und Integration. • Garben und Kohomologie. • Satz von Riemann-Roch. • Serre-Dualität. • Kobayashi Metrik. • Großer Satz von Picard.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden entwickeln einen Zugang zu abstrakten Flächen und verstehen Klassifikationstechniken, die auf lokal-zu-global-Schlussweisen beruhen. Sie erfassen im Begriff der Holomorphie die Rigiditätsprinzipien, die sich aus analytischen Eigenschaften ergeben. Die Studierenden sehen am Grabenbegriff, wie grundlegende Fragestellungen in natürlicher Weise zu zunehmend abstrakteren Begriffsbildungen führen und wie mit diesen letztlich die Fragestellungen beantwortet werden können. Sie lernen dabei, wie Geometrie und Analysis zusammenhängen und vielfach einander bedingen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Einführung in Riemannsche Flächen	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	1	2					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt. – Das Modul kann vom ausnahmsweise Dozenten auch ohne Übungen angeboten werden; in diesem Fall werden für das Modul statt 5 nur 3 Leistungspunkte vergeben.

Literatur

Exemplarische Literatur:

- Hershel M. Farkas, Irwin Kra: Riemann Surfaces. Springer 1992.
- Otto Forster: Riemannsche Flächen. Springer 1977.
- Klaus Lamotke: Riemannsche Flächen. Springer 2009.
- Jürgen Jost: Compact Riemann surfaces. Springer 2006.

Verwendbarkeit

Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* sowie *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Das Modul kann wegen der großen inhaltlichen Überschneidungen nicht zusammen mit dem Modul 'Riemannsche Flächen' eingebracht werden.

Teilnahmevoraussetzungen

Inhaltlich wird die Veranstaltung Einführung in die Funktionentheorie vorausgesetzt.

Modulverantwortliche

Anton Deitmar, Reiner Schätzle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-50-16	**Modultitel:** Riemannsche Geometrie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	6		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Riemannsche Mannigfaltigkeiten. • Gedäten. • Krümmung. • Geometrie von Untermannigfaltigkeiten.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die wesentlichen Begriffe und Beispiele Riemannscher Mannigfaltigkeiten vom klassischen Standpunkt aus kennengelernt und verstanden. Zudem sind sie vertraut mit dem Konzept der Geodäten und wichtiger geometrischer Resultate, die für das Verständnis ihrer Rolle in verschiedenen Bereichen der Differentialgeometrie essentiell sind. Sie haben eine gute Intuition für unterschiedliche Begriffe der Krümmung entwickelt und sind vertraut mit Rechentechniken der Differentialgeometrie. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Riemannsche Geometrie	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt. – Das Modul kann vom Dozenten ausnahmsweise auch ohne Übungen angeboten werden; in diesem Fall werden für das Modul statt 6 nur 3 Leistungspunkte vergeben.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • John M. Lee: Riemannian manifolds: An introduction to curvature. Springer 1997. • Barret O'Neill: Semi-Riemannian geometry. With applications to relativity. Academic Press 1983.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den Studienschwerpunkten *Algebra und Geometrie*, *Analysis und Differentiageometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich wird das Modul Geometry in Physics vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Carla Cederbaum, Gerhard Huisken

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-50-17</td><td colspan="2">Modultitel:
Introduction to Integrable Systems (Classical Mechanics, Riemann Surfaces, and Spectral Theory)</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Integrable systems are differential or difference equations with extraordinarily large symmetry group. The course will focus on equations related to the Korteweg de Vries (KdV) equation and discrete counterparts. Originally a mathematical model for the soliton phenomenon discovered during a famous horse ride along a canal, equations of KdV type have now many applications and the underlying theory involves various mathematical disciplines.
A fundamental idea for understanding and solving KdV type equations is their interpretation as spectrum preserving deformations of underlying auxiliary linear operators - in the simplest case symmetric matrices.
We study an important class of explicit solutions that includes solitons and finite gap (or algebro-geometric) solutions. This class of solutions can be described using a combination of Riemann surface theory and classical mechanics. The relevant parts of classical mechanics, Riemann surface theory, and spectral theory will be explained in the lecture. We will also briefly touch upon an integrable systems interpretation of the QR-algorithm of numerical linear algebra.
The KdV equation is related to geometry in several different ways: for example, it can be interpreted as a dynamical system on the space of parametrized curves in the plane; it is deeply related to the geometry of Lie algebras and Lie groups; the special solutions discussed in the lecture are related to the geometry of Riemann surfaces...
In a sequel to the lecture, it is planed to explain how infinite dimensional projective geometry allows to interpret generalizations of the KdV equation as quadratic equations and to finally linearize their dynamics.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">The students have seen and understood relations between classical topics like Riemann surfaces, mechanics, and spectral theory – as well as other branches of mathematics – that were discovered mainly in the second half of the twentieth century during the emergence of a branch of mathematics sometimes called soliton theory or integrable mathematics. The students can name and prove the central results of the lecture and they can explain their intrinsic connections.
In the exercise classes they have acquired a confident, precise and independent handling of the terms, statements and methods of the lecture. They have learned to transfer the methods to new problems, to analyse them and to work on solution strategies on their own or in a team. They are capable of presenting their results and if applicable to argue for it in a critical discourse.</td></tr>
</table>

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Introduction to Integrable Systems	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur

Exemplarische Literatur:

- Olivier Babelon, Denis Bernard, Michel Talon: Introduction to classical integrable systems. CUP 2004.
- Leonid A. Dickey: Soliton equations and Hamiltonian systems. World Scientific 2003.
- Alan C. Newell: Solitons in mathematics and physics. SIAM 1985.
- Sergei P. Novikov, Sergei V. Manakov, Lev P. Pitaevskii, Vladimir E. Zakharov: Theory of Solitons - The Inverse Scattering Method. Consultants Bureau 1984).

Verwendbarkeit

Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie*, *Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.

Teilnahmevoraussetzungen

The module Introduction to Complex Analysis and Ordinary Differential Equations is required. Basic knowledge of differential geometry (manifolds, differential shapes) is helpful, but not necessary.

Modulverantwortliche

Christoph Bohle, Frank Loose

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer:	**Modultitel:**		**Art des Moduls:**
MAT-50-18	Integrable Systems (and Infinite Dimensional Lie Algebras)		Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Integrable systems are differential or difference equations with extraordinarily large symmetry group. The course will focus on equations related to the Korteweg de Vries (KdV) equation and discrete counterparts. Originally a mathematical model for the soliton phenomenon discovered during a famous horse ride along a canal, equations of KdV type have now many applications and the underlying theory involves various mathematical disciplines. A fundamental idea for understanding and solving KdV type equations is their interpretation as spectrum preserving deformations of underlying auxiliary linear operators - in the simplest case symmetric matrices. This lecture is the continuation of the lecture called Introduction to Integrable Systems (Classical Mechanics, Riemann Surfaces, and Spectral Theory). This continuation will investigate integrable equations using sl(2,C)–loop algebras. In particular, we will study explicit solutions that can be described using the theory of hyperelliptic Riemann surfaces.		
Qualifikationsziele	The students have aquired a uniform point of view on integrable equations related to the loop algebra of sl(2,C). The students can name and prove the central results of the lecture and they can explain their intrinsic connections. In the exercise classes they have acquired a confident, precise and independent handling of the terms, statements and methods of the lecture. They have learned to transfer the methods to new problems, to analyse them and to work on solution strategies on their own or in a team. They are capable of presenting their results and if applicable to argue for it in a critical discourse.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Integrable Systems (and Infinite Dimensional Lie Algebras)	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Olivier Babelon, Denis Bernard, Michel Talon: Introduction to classical integrable systems. CUP 2004. • Leonid A. Dickey: Soliton equations and Hamiltonian systems. World Scientific 2003. • Alan C. Newell: Solitons in mathematics and physics. SIAM 1985. • Sergei P. Novikov, Sergei V. Manakov, Lev P. Pitaevskii, Vladimir E. Zakharov: Theory of Solitons - The Inverse Scattering Method. Consultants Bureau 1984).
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie*, *Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Basic knowledge from the module Introduction to Integrable Systems (Classical Mechanics, Riemann Surfaces, and Spectral Theory) is assumed.
Modulverantwortliche	Christoph Bohle, Frank Loose

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-50-19</td><td colspan="2">Modultitel:
Mathematische Aspekte der Neuronalen Informationsverarbeitung 2</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">3</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
90 h</td><td>Kontaktzeit:
30 h</td><td>Selbststudium:
60 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Fortgeschrittene Anwendungen künstlicher neuronaler Netze, z.B. Verarbeitung von zeitabhängigen Daten.
• Dynamische Interpretation von Verfahren der neuronalen Datenverarbeitung als Fluss der Daten/Aktivierungen durch das Netz (schnelle Dynamik) und Änderung der Gewichte beim Training (langsame Dynamik).
• Einfache neurowissenschaftliche Modelle zur Dynamik neuronaler Netze. Aktuelle Arbeiten zum biologisch plausiblen maschinellen Lernen.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden haben die Grundlagen der Informationsverarbeitung mittels künstlicher neuronaler Netze und biologisch plausiblere Alternativen kennen gelernt. Dynamische Systeme als ein möglicher Rahmen für theoretische und mathematische Untersuchungen sind ihnen vertraut. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td>Mathematische Aspekte der Neuronalen Informationsverarbeitung 2</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td>nein</td><td>K o. mP</td><td>90-180 o. 20-30</td><td>b</td><td>100</td></tr>
</table>
Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Literatur</td><td colspan="3">Exemplarische Literatur:
• Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville: Deep Learning. MIT 2016.
• Anthony C. C. Coolen, Reimer Kühn, Peter Sollich: Theory of Neural Information Processing Systems. OUP 2005.
• Simon Haykin: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. Pearson 1998.</td></tr>
</table>

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* und *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Inhaltlich wird das Modul Dynamische Systeme und Informationsverarbeitung 1 vorausgesetzt.
Modulverantwortliche	Christoph Bohle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-50-20	**Modultitel:** Topologie	**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	6	
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 180 h / Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester	
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig	
Fachsemester	1-3	
Unterrichtssprache	Deutsch	
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS	

Modulinhalt

Inhalte:

- Rückblick auf metrische Räume: Abgeschlossene Mengen, Umgebung, Stetigkeit, vollständige metrische Räume, Kompaktheit in metrischen Räumen.
- Mengentheoretische Topologie: Topologische Räume, Stetigkeit und Konvergenz, Kompaktheit, Trennungsaxiome.
- Räume stetiger Funktionen: Das Lemma von Urysohn und Anwendungen, Stone-Cech-Kompaktifizierung, der Satz von Stone-Weierstraß, Konvergenzbegriffe in Funktionenräumen, Kompaktheit in Funktionenräumen.
- Bairesche Räume und die Anwendung der Baireschen Theorie: Bairesche Funktionenklassen, Existenzsätze.
- Ausblick auf die algebraische Topologie.

Qualifikationsziele

Die Studierenden haben die zentralen Begriffe, Ergebnisse und Methoden der mengentheoretischen Topologie kennengelernt und verstanden, dass man mit Hilfe dieser Theorie viele Phänomene in verschiedenen Teilgebieten der Mathematik beschreiben kann. Sie vernetzen so ihr Wissen zu sehr unterschiedlichen Teilgebieten der Mathematik. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Topologie	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Felix Hausdorff: Grundzüge der Mengenlehre. Von Veit & Comp. 1914. • Boto von Querenburg: Mengentheoretische Topologie. Springer 2001. • Volker Runde: A Taste of Topology. Springer 2005.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* sowie *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Es sind keine weiteren Voraussetzungen erforderlich.
Modul-verantwortliche	Rainer Nagel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-50-21</td><td colspan="2">Modultitel:
Algebraische Topologie 1</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Mengentheoretische Topologie.
Grundlagen der Kategorientheorie.
Die Fundamentalgruppe eines punktierten topologischen Raumes.
Überlagerungstheorie.
Grundlagen der singulären Homologietheorie.
Anwendungen.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden erlernen, wie man Ideen in der Topologie, z. B. das Detektieren von Löchern bei topologischen Räumen, auch mit einer anspruchsvollen Technik in eine präzise Theorie umsetzen kann. Dabei erkennen sie insbesondere, wie abstrakte Begriffsbildungen, z. B. aus der Kategorientheorie und der Homologischen Algebra, effektive Sprechweisen zur Verfügung stellen, die es ermöglichen, die Ideenbildung auch adäquat umzusetzen. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Algebraische Topologie</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Allen Hatcher: Algebraic topology. Cambridge University Press 2009. • Horst Schubert: Topologie. Teubner 1971. • Edwin H. Spanier: Algebraic topology. McGraw-Hill 1966. • Ralph Stöcker, Heiner Zieschang: Algebraische Topologie. Teubner 1994.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* sowie *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modulverantwortliche	Anton Deitmar, Frank Loose

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-50-22</td><td colspan="2">Modultitel:
Algebraische Topologie 2</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Ausbau der singulären Homologietheorie.
• Simpliziale Komplexe und ihre simpliziale Homologie.
• CW-Räume und ihre zelluläre Homologie.
• Axiomatische Homologie.
• Homologische Algebra.
• Cohomologie.
• Homologie und Cohomologie mit Koeffizienten.
• Produktstrukturen in der Homologie und Cohomologie.
• Der Dualitätssatz von Poincaré für topologische Mannigfaltigkeiten.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden bauen ihre Fähigkeiten aus, konkrete topologische Problemstellungen in algebraische Konstruktionen umzusetzen. Sie vertiefen dabei ihre Kenntnisse in abstrakten mathematischen Disziplinen, um auch technisch sehr anspruchsvolle Aufgaben meistern zu können. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
</table>

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
	Algebraische Topologie 2	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
		Ü	f	2	3					
	In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Zudem können weitere Leistungen als Studienleistung erforderlich sein. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.									

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Allen Hatcher: Algebraic topology. Cambridge University Press 2009. • Horst Schubert: Topologie. Teubner 1971. • Edwin H. Spanier: Algebraic topology. McGraw-Hill 1966. • Ralph Stöcker, Heiner Zieschang: Algebraische Topologie. Teubner 1994.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* sowie *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Inhaltlich ist das Modul Algebraische Topologie 1 Voraussetzung für die Teilnahme an diesem Modul.
Modulverantwortliche	Frank Loose

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-50-23</td><td colspan="2">Modultitel:
Algebraische Topologie 3</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">3</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
90 h</td><td>Kontaktzeit:
30 h</td><td>Selbststudium:
60 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Eine Auswahl aus den folgenden Themengebieten wird behandelt werden:
Grundzüge der Homotopietheorie;
Homotopiegruppen von Sphären;
Spektralsequenzen;
K-Theorie;
Charakteristische Klassen.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden werden mit den vertieften Kenntnissen in Algebraischer Topologie, die sie sich angeeignet haben, nun in aktuelle Forschungsgebiete eingeführt und sie gehen selbst ein kleines Forschungsprojekt an, was etwa zu einer Masterarbeit führen kann. Es werden außerdem die Voraussetzungen für eine mögliche Promotion in der Algebraischen Topologie gelegt. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3"><table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td>Algebraische Topologie 3</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td>nein</td><td>P</td><td></td><td>b</td><td>100</td></tr>
</table>
Wie das Portfolio zu führen ist, wird von der Prüferin oder dem Prüfer zu Beginn der Veranstaltung erläutert.</td></tr>
<tr><td>Literatur</td><td colspan="3">Exemplarische Literatur:
Allen Hatcher: Algebraic topology. Cambridge University Press 2009.
Allen Hatcher: Vector bundles and K-theory. Manuskript 2009.
John W. Milnor, James D. Stasheff: Characteristic classes. Princeton University Press 1974.
John W. Milnor: Lectures on the h-cobordism theorem. Princeton University Press 1965.</td></tr>
</table>

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* sowie *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Inhaltlich sind die Module Algebraische Topologie 1 und 2 Voraussetzung für die Teilnahme an diesem Modul.
Modulverantwortliche	Frank Loose

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-50-24	**Modultitel:** Einführung in die K-Theorie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Vektorbündel. • Topologische K-Theorie. • Künneth-Formel und Bott-Periodizität. • Charakteristische Klassen. • Chern-Charakter. • Algebraische K-Theorie • Plus-Konstruktion.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben ein wichtiges mathematisches Gebiet kennengelernt, das Analysis, Geometrie, Algebra und Zahlentheorie miteinander verbindet. Sie haben gelernt, Zusammenhänge zwischen verschiedenen Gebieten zu erkennen und zu nutzen. Sie können Begriffe wie Vektor- oder Faserbündel oder kategorische K-Gruppen verstehen und anwenden. Sie haben gelernt, in großen Zusammenhängen zu denken. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Einführung in die K-Theorie	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Literatur

Exemplarische Literatur:

- Michael Atiyah: K-theory. Addison-Wesley 1989.
- Max Karoubi: K-theory. Springer 2008.
- Emilio Lluis-Puebla, Jean-Louis Loday, Henri Gillet, Christophe Soule, Victor Snaith: Higher algebraic K-theory: an overview. Springer 1992.

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* und *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modulverantwortliche	Anton Deitmar

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-50-25	**Modultitel:** Angewandte Topologie 1			**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3			
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h		Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester			
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig			
Fachsemester	1-3			
Unterrichtssprache	Deutsch			
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS			
Modulinhalt	**Inhalte:** • Simplizialkomplexe und ihre Homologie. • Persistente Homologie. • Grundbegriffe der topologischen Datenanalyse.			
Qualifikationsziele	Die Studierenden sind mit Grundkonzepten der algebraischen Topologie und deren Anwendung im Kontext der topologischen Datenanalyse vertraut. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.			

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Angewandte Topologie 1	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Herbert Edelsbrunner, John L. Harer: Computational Topology. AMS 2010. • Robert Ghrist: Elementary Applied Topology. Create Space 2014. • Sergey V. Matveev: Lectures on Algebraic Topology. EMS 2006.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie*, *Analysis und Differentialgeometrie* und *Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.

Teilnahme-voraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modul-verantwortliche	Christoph Bohle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-50-26	**Modultitel:** Angewandte Topologie 2		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Fortgeschrittene Aspekte der persistenten Homologie (z.B. Stabilität). • Angewandte Morsetheorie. • Angewandte Garbentheorie.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden sind mit fortgeschrittenen Aspekten der angewandten Topologie und der topologischen Datenanalyse vertraut. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Angewandte Topologie 2	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Herbert Edelsbrunner, John L. Harer: Computational Topology. AMS 2010. • Robert Ghrist: Elementary Applied Topology. Create Space 2014. • Sergey V. Matveev: Lectures on Algebraic Topology. EMS 2006.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie*, *Analysis und Differentialgeometrie* und *Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.

Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich werden Kenntnisse aus dem Modul 'Angewandte Topologie 1' vorausgesetzt. Zudem werden Grundlagen aus der Differentialgeometrie erwartet, die ggf. parallel erworben werden können.
Modul-verantwortliche	Christoph Bohle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-50-27</td><td colspan="2">Modultitel:
Topologische Vektorräume und Distributionen</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">6</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
180 h</td><td>Kontaktzeit:
60 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Eine Auswahl aus den folgenden Themengebieten wird behandelt werden:
• Lokalkonvexe topologische Vektorräume, Frechet-Räume, LF-Räume und LB-Räume.
• Dualität: Satz von Hahn-Banach, Dualraum, Topologien auf dem Dualraum.
• Verallgemeinerte Funktionen, Radon Maße und Distributionen.
• Eigenschaften von Distributionen und Operationen auf dem Raum der Distributionen.
• Anwendungen und Beispiele.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden beherrschen die Grundprinzipien und Techniken der Theorie topologischer Vektorräume und verstehen dieses auf die Theorie der verallgemeinerten Funktionen nach L. Schwartz anzuwenden. Die Studierenden sind zudem in der Lage, die wesentlichen Anwendungen der Theorie zu benennen und aufzuzeigen, welche klassischen Fragestellungen der mathematischen Physik damit behandelt werden können. Die sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Topologische Vektorräume und Distributionen</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180 o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Gerald Folland: Real Analysis. Wiley 1999. • Helmut H. Schäfer: Topological Vector Spaces. Springer 1999. • Laurant Schwartz: Theorie des Distributions. Hermann 1998. • Laurant Schwartz: Mathematics for the Physical Sciences. Dover 2008. • Francois Trèves: Topological Vector Spaces, Distributions and Kernel. Dover 1967.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Funktionalanalysis sowie Grundkenntnisse der mengentheoretischen Topologie werden vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Ulrich Groh, Rainer Nagel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-50-28</td><td colspan="2">Modultitel:
Uniformisierung Riemannscher Flächen</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">5</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
150 h</td><td>Kontaktzeit:
45 h</td><td>Selbststudium:
105 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Uniformisierung Riemannscher Flächen</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden haben gelernt, wie durch sukzessives Lösen geeigneter Differentialgleichungen die einfach zusammenhängenden Riemannschen Flächen bestimmt werden. Sie können damit im Anschluss Riemannsche Flächen unter geeigneten Bedingungen klassifizieren. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Uniformisierung Riemannscher Flächen</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>1</td><td>2</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt. – Das Modul kann vom ausnahmsweise Dozenten auch ohne Übungen angeboten werden; in diesem Fall werden für das Modul statt 5 nur 3 Leistungspunkte vergeben.</td></tr>
<tr><td>Literatur</td><td colspan="3">Exemplarische Literatur:
• Hershel M. Farkas, Irwin Kra: Riemann Surfaces. Springer 1992.</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="3">Das Modul gehört zu den Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie sowie Analysis und Differentialgeometrie. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten Studienschwerpunkt, Vertiefungswissen Mathematik oder Freier Wahlbereich einbringbar.</td></tr>
<tr><td>Teilnahme-voraussetzungen</td><td colspan="3">Das Modul Einführung in Riemannsche Flächen sowie die Pflichtmodule des Studiengangs Bachelor of Science Mathematik zur Analysis werden vorausgesetzt.</td></tr>
</table>

Modul-verantwortliche	Reiner Schätzle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-50-29	**Modultitel:** Algebraische Kurven und Riemannsche Flächen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Kompakte Riemannsche Flächen. • Normalisierungssatz ebener Kurven. • Topologisches Geschlecht. • Überlagerungen. • Formen und Integration. • Garben und Kohomologie. • Hodge-Theorie. • Arithmetisches und geometrisches Geschlecht. • Satz von Abel. • Satz von Riemann-Roch. • Serre-Dualität. • Jacobische und abelsche Varietäten. • Riemannsche Bilinearbeziehungen. • Jacobi-Umkehrproblem. • Elliptische Kurven und Funktionen. • J-Invariante. • Uniformisierung. • Topologie nicht-kompakter Riemannsche Flächen.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden entwickeln einen Zugang zu abstrakten Flächen und verstehen Klassifikationstechniken, die auf lokal-zu-global-Schlussweisen beruhen. Sie erfassen im Begriff der Holomorphie die Rigiditätsprinzipien, die sich aus analytischen Eigenschaften ergeben. Die Studierenden sehen am Grabenbegriff, wie grundlegende Fragestellungen in natürlicher Weise zu zunehmend abstrakteren Begriffsbildungen führen und wie mit diesen letztlich die Fragestellungen beantwortet werden können. Sie lernen dabei, wie Geometrie und Analysis zusammenhängen und vielfach einander bedingen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Algebraische Kurven und Riemannsche Flächen	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt. – Das Modul kann vom Dozenten ausnahmsweise auch ohne Übungen angeboten werden; in diesem Fall werden für das Modul statt 9 nur 6 Leistungspunkte vergeben.

Literatur

Exemplarische Literatur:

- Frederice Mangolte: Real Algebraic Varieties. Springer 2020.
- Robert Silhol: Real Algebraic Surfaces. Springer 1989.
- Riccardo Benedetti, Jean-Jacques Risler: Real Algebraic and Semi-algebraic Sets. Editions Herrmann 1990.
- Alex Degtyarev, Viatcheslav Kharlamov: Topological properties of real algebraic varieties: du côté de chez Rokhlin. arXiv:math/0004134.

Verwendbarkeit

Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* sowie *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunkts gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Das Modul kann wegen der großen inhaltlichen Überschneidungen nicht zusammen mit dem Modul *Einfürung in Riemannsche Flächen* eingebracht werden.

Teilnahmevoraussetzungen

Inhaltlich werden die Veranstaltungen zur Integrations- und Maßtheorie sowie die Einführung in Funkionentheorie Gewöhnliche Differentialgleichungen vorausgesetzt.

Modulverantwortliche

Ivo Radloff

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-50-30</td><td colspan="2">Modultitel:
Geometrische Gruppentheorie</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Gruppenaktionen auf Graphen, freie Gruppen.
• Quasiisometrien.
• Wachstumstypen.
• Hyperbolische Gruppen.
• Enden.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden lernen, Eigenschaften von endlich erzeugten Gruppen mit Hilfe geometrischer Werkzeugen zu untersuchen, ausgehend vom Cayleygraphen der Gruppe. Sie sind in der Lage, die geometrischen Eigenschaften der Cayleygraphen mit Hilfe analytischer Methoden zu untersuchen und ihre Zusammenhänge zu der zugrundeliegenden Gruppe herauszuarbeiten. Die Studierenden verstehen, wie Grundlagen aus der Algebra und der Analysis zusammenwirken können, um eine neue Theorie an der Schnittstelle von Algebra und Geometrie zu entwickeln, die zu interessanten Aussagen über Gruppen führt. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Geometrische Gruppentheorie</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Clara Löh: Geometric Group Theory - an Introduction. Springer 2017. • Thorsten Camps, Volkmar Große Rebel, Gerhard Rosenberger: Einführung in die kombinatorische und die geometrische Gruppentheorie. Heldermann Verlag 2008.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* und *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modulverantwortliche	Hannah Markwig

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-50-40</td><td colspan="2">Modultitel:
Gromov-Witten-Theorie</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">6</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
180 h</td><td>Kontaktzeit:
60 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 3 SWS + Übung 1 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Enumerative Geometrie,
• Modulräume von stabilen Kurven,
• Modulräume von stabilen Abbildungen,
• universelle Familien,
• vergeßliche Abbildungen,
• Klebeabbildungen,
• Gromov-Witten-Invarianten,
• Berechnung von Gromov-Witten-Invarianten,
• Divisorgleichung,
• Kontsevichs Formel.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden werden auf der Grundlage ihrer Kenntnisse in Algebraischer Geometrie in das aktuelle Forschungsgebiet der Gromov-Witten-Theorie und enumerativen Geometrie eingeführt. Die Studierenden kennen und verstehen wichtige Beispielklassen von enumerativen Invarianten und wissen, wie sich diese als Schnittprodukte auf Modulräumen darstellen lassen. Die Studierenden beherrschen die grundlegenden Algorithmen zur Berechnung von Gromov-Witten-Invarianten. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
</table>

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
	Gromov-Witten-Theorie	V	f	3	4,5	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
		Ü	f	1	1,5					
	In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.									
Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Joachim Kock, Israel Vainsencher: An invitation to quantum cohomology: Kontsevich's formula for rational plane curves. Birkhäuser 2007. • Ravi Vakil: The moduli space of curves and Gromov-Witten theory. Enumerative invariants in algebraic geometry and string theory. Lecture Notes in Mathematics, 1947. Springer 2008.									
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.									
Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich wird das Modul Algebraische Geometrie vorausgesetzt.									
Modul-verantwortliche	Hannah Markwig									

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-50-50**	**Modultitel:** Hyperbolische Geometrie: axiomatisch, spiegelungsgeometrisch, algebraisch		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Ausgehend von einem Axiomensystem für die ebene absolute Geometrie mit den Grundbegriffen Inzidenz und Kongruenz wird die zugehörige Bachmannsche Spiegelungsgeometrie entwickelt. Nach Einführung des hyperbolischen Axioms wird diese mit spiegelungsgeometrischer Endentheorie weitergeführt. Aus den Drehungen um ein Ende und den Translationen entlang einer Geraden entsteht ein euklidischer Körper, mit dessen Hilfe die betrachtete hyperbolische Ebene algebraisch beschrieben wird.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben gelernt, ein und dasselbe mathematische Objekt (hier absolute und hyperbolische Ebenen) unter völlig verschiedenen Blickwinkeln zu betrachten und diese miteinander zu verknüpfen. Dabei haben sie insbesondere die gruppentheoretisch orientierte Bachmannsche Spiegelungsgeometrie kennen gelernt, die im Curriculum eher selten erscheint, und vertiefen so den Umgang mit Gruppen. Sie zudem ihre Kenntnis der Verschränkung von Geometrie und Algebra vertieft. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	siehe unten		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Hyperbolische Geometrie: axiomatisch, spiegelungsgeometrisch, algebraisch	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Friedrich Bachmann: Aufbau der Geometrie aus dem Spiegelungsbegriff. Springer 1959. • Robin Hartshorne: Geometry: Euclid and beyond. Springer 2000. • Helmut Karzel, Kay Sörensen, Dirk Windelberg: Einführung in die Geometrie. Vandenhoeck und Ruprecht 1973.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* und *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Geometrie sind hilfreich aber nicht erforderlich.
Modulverantwortliche	Hermann Höhl, Hannah Markwig

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-55-01**	**Modultitel:** Funktionalanalysis		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Normierte Räume, Banachräume, Dualräume. • Satz von Hahn-Banach, Prinzip der gleichmäßigen Beschränktheit. • Satz vom abgeschlossenen Graphen, Satz der offenen Abbildung, Satz von Banach-Alaoglu. • Kompakte Operatoren, normale Operatoren, Spektralsätze.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden beherrschen die Grundprinzipien und Techniken der Theorie unendlichdimensionaler Räume und können sie auf Probleme aus der Analysis und Geometrie anwenden. Sie verstehen die Problematik der Spektraltheorie und können ihre Aussagen zur Lösung analytischer Probleme nutzen. Die Studierenden sind zudem in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	siehe folgende Tabelle		

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Funktionalanalysis	V	f	4	6	ja	K o. mP o. H	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Nicolas Bourbaki: Topological vector spaces. Springer 1987. • Adam Bowers, Nigel Dalton: An introductory course in functional analysis. Springer 2014. • Harro Heuser: Funktionalanalysis. Teubner 2006. • Markus Haase: Functional analysis. American Mathematical Society 2014. • Peter D. Lax: Functional analysis. Wiley 2002. • Gert Kjaergaard Pedersen: Analysis now. Springer 1995. • Walter Rudin: Functional analysis. McGraw-Hill 1991. • Dirk Werner: Funktionalanalysis. Springer 2011. • Kosaku Yosida: Functional analysis. Springer 1995. • Hans Wilhelm Alt: Lineare Funktionalanalysis. Springer 2012.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. In Kombination mit einem der Module Numerik stationärer Differentialgleichungen oder Numerik instationärer Differentialgleichungen ist es im Studienschwerpunkt *Numerische Mathematik und Optimierung* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modul-verantwortliche	Carla Cederbaum, Anton Deitmar, Gerhard Huisken, Reiner Schätzle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-55-02**	**Modultitel:** Nichtlineare Funktionalanalysis		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Differentiation und Integration in Banachräumen. • Kompakte, koerzive, eigentliche Abbildungen und Gradientenabbildungen. • Fredholmabbildungen. • Kontinuitätsmethode. • Abbildungsgrad. • Fixpunktsätze. • Variationsungleichungen. • Monotone Operatoren.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden beherrschen die Differentiation und Integration nichtlinearer Funktionen und verschiedene funktionalanalytische Methoden zum Lösen von nichtlinearen Gleichungen in unendlich-dimensionalen Räumen. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben die Studierenden Sicherheit im technischen Umgang mit den erlernten Methoden erworben und können sie selbstständig auf andere Problemstellungen anwenden. Sie sind in der Lage, ihre Problemlösungen zu präsentieren und an Diskursen zu Problemen dieses Forschungsgebietes teilzunehmen.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Nichtlineare Funktionalanalysis	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Melvyn Berger: Nonlinearity in Functional Analysis. Elsevier 1977. • Klaus Deimling: Nonlinear Functional Analysis. Springer 1985. • Eberhard Zeidler: Nonlinear Functional Analysis and its Applications I. Fixed-Point Theorems. Springer 1986.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Das Modul Integrations- und Maßtheorie und das Modul Funktionalanalysis müssen erfolgreich abgeschlossen worden sein.
Modul-verantwortliche	Reiner Schützle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-55-03	**Modultitel:** Operatorentheorie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Operatorhalbgruppen und abstrakte Cauchyprobleme. • Satz von Hille-Yosida. • Anwendungen auf konkrete Evolutionsgleichungen. • Spektraltheorie von Halbgruppen und deren Generatoren. • Asymptotik von Halbgruppen. • Anwendungen: – Halbgruppen der gewöhnlichen und partiellen Differentialgleichungen; – Halbgruppen für das Transportproblem; – Halbgruppen in der Kontrolltheorie.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben das Konzept der operatorwertigen Exponentialfunktion verstanden. Sie sind dann in der Lage, konkrete Evolutionsgleichungen in dieser abstrakten Form zu behandeln. Sie können mittels des Hille-Yosida Theorems Wohlgestelltheit beweisen und qualitatives Verhalten der Lösungen diskutieren. Die Studierenden sind zudem in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Operatorentheorie	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur

Exemplarische Literatur:

- Bruce Blackadar: Operator algebras. Springer 2006.
- Klaus Jochen Engel, Rainer Nagel: One-parameter semigroups for linear evolution equations. Springer 2000.
- Klaus Jochen Engel, Rainer Nagel: A short course on operator semigroups. Springer 2006.
- Gert Pedersen: Analysis now. Springer 1995.

Verwendbarkeit

Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.

Teilnahmevoraussetzungen

Inhaltlich ist das Modul Funktionalanalysis Voraussetzung für die Teilnahme an diesem Modul.

Modulverantwortliche

Anton Deitmar, Rainer Nagel, Reiner Schützle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-55-04</td><td colspan="2">Modultitel:
Operatoralgebren</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Geometrie der Hilberträume.
• Operatoren auf Hilberträumen und deren spektrale Eigenschaften.
• Spektraltheorie in Banachalgebren.
• Kommutative Banachalgebren und der Darstellungssatz von Gelfand und Gelfand-Naimark.
• Der Spektralsatz für normale Operatoren eines Hilbertraums.
• Operatortopologien und der von Neumannsche Bikommutantensatz.
• Dichtesatz von Kaplansky.
• Von Neumann-Algebren und deren Klassifikation nach Murray-von Neumann, Konstruktion von Beispielen.
• Die Axiomatik der C^*- und W^*-Algebren, der Satz von Gelfand-Naimark-Segal für C^*-Algebren und der Darstellungssatz von Sakai für W^*-Algebren.
• Anwendungen und Ausblick.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden haben die zentrale Begriffe, Ergebnisse und Methoden der Theorie der Operatoralgebren kennengelernt. Dabei haben sie das tiefliegende Wechselspiel von Algebra und Topologie am Beispiel der von Neumann-Algebren und deren Klassifikation erlebt. Die Studierenden erkennen zudem, wie das Einnehmen eines höheren Standpunktes, sprich die Axiomatik der Problemstellung, es erlaubt, verschiedene Fragestellungen gleichzeitig zu behandeln und zu lösen. Sie sind zudem in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
</table>

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
	Operatoralgebren	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
		ü	f	2	3					
	In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.									

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Bruce Blackadar: Operator algebras. Springer 2006. • Ola Bratelli, Derek Robinson: Operator Algebras and Quantum Physics. Springer 1997. • Richard Kadison, John Ringrose: Fundamentals of the Theory of Operator Algebras I - IV. AMS 1997. • Gert Pedersen: Analysis now. Springer 1995. • Shoichiro Sakai: C^*- and W^*-Algebras. Springer 1998. • Masamichi Takesaki: Theory of Operator Algebras I - II. Springer 2002.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich ist das Modul Funktionalanalysis Voraussetzung für die Teilnahme an diesem Modul.
Modul-verantwortliche	Ulrich Groh, Rainer Nagel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-55-05**	**Modultitel:** Ergodentheorie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Topologische und maßtheoretische dynamische Systeme. • Rekurrenz und Mischungseigenschaften. • Ergodentheoreme von von Neumann und Birkhoff. • Spektraltheorie des Koopmanoperators. • Operatoren mit diskretem Spektrum (Halmos-von Neumann) • Anwendungen in Stochastik und Zahlentheorie.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die zentrale Begriffe, Ergebnisse und Methoden der Ergodentheorie kennengelernt. Dabei haben sie das tiefliegende Wechselspiel von Maßtheorie und Topologie am Beispiel der dynamischen Systeme und deren Klassifikation erlebt. Die funktionalanalytische Perspektive erlaubt es, verschiedene Fragestellungen gleichzeitig zu behandeln und zu lösen. Die Studierenden sind zudem in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Ergodentheorie	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Manfred Einsiedler, Thomas Ward: Ergodic Theory with a View Towards Number Theory. Springer 2011. • Tanja Eisner, Balint Farkas, Markus Haase, Rainer Nagel: Operator Theoretic Aspects of Ergodic Theory. Springer 2015. • Paul Halmos: Lectures on Ergodic Theory. Martino Fine Books 2013. • Marcelo Viana, Krerley Oliveira: Foundations of Ergodic Theory. CUP 2016.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich ist das Modul Funktionalanalysis Voraussetzung für die Teilnahme an diesem Modul.
Modul-verantwortliche	Rainer Nagel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-55-06	**Modultitel:** Kontrolltheorie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		

Modulinhalt

Inhalte:

- Einführung endlichdimensionaler linearer Kontrollsysteme mit Beispielen aus der Mechanik.
  - Kontrollierbarkeit, Beobachtbarkeit, Stabilisierbarkeit.
  - Kalmankriterium. Feedbacksysteme.
  - Stabilisierbarkeit durch Feedback.
  - Beispiele.
- Einführung in die unendlichdimensionale Kontrolltheorie.
  - Mathematischer Rahmen und Beispiele.

Qualifikationsziele

Die Studierenden erlernen wichtige Grundlagen der endlich- sowie unendlichdimensionalen Kontrolltheorie. Dabei können sie die erlernte Theorie in Anwendungsgebieten wie der Mechanik einsetzen. Die Studierenden sind zudem in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Kontrolltheorie	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Hans W. Knobloch: Lineare Kontrolltheorie. Springer 1985. • Hans W. Knobloch, Alberto Isidori, Dietrich Flockerzi: Topics in control theory. Birkhäuser 1993. • Jerzy Zabczyk: Mathematical Control Theory. Birkhäuser 1992. • Rurth F. Curtain, Hans Zwart: An Introduction to Infinite Dimensional Systems Theory. Springer 1995.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modul-verantwortliche	Rainer Nagel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-55-07**	**Modultitel:** Lineare Kontrolltheorie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	6		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	Mathematische Methoden sind für die Steuerung und Kontrolle von komplexen Systemen und Prozessen unentbehrlich. Die zugrunde liegende Theorie fasziniert aber nicht nur durch ihre vielfältigen Anwendungen, sondern auch, in ihrer abstrakten Form, durch Klarheit und Eleganz ihrer Methoden und Resultate. In dieser Vorlesung werden zunächst endlichdimensionale Systeme behandelt, wofür gute Kenntnisse der Analysis und Linearen Algebra ausreichen. Ziele sind das Kontrollierbarkeitskriterium von Kalman und die daraus folgenden Kriterien für Stabilisierbarkeit. Wenn die Zeit reicht, werden wir die Theorie auf unendlichdimensionale Systeme erweitern. In den Übungen wird die Theorie auf konkrete Beispiele angewandt.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben grundlegende Methoden der linearen Kontrolltheorie erlernt. Gleichzeitig haben sie das Zusammenwirken verschiedener theoretischer Konzepte aus der Linearen Algebra und der Analysis und deren Nutzen für konkrete Anwendungen erlebt und verstanden. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Lineare Kontrolltheorie	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Hans Wilhelm Knobloch, Huibert Kwakernaak: Lineare Kontrolltheorie. Springer 1985. • Jerzy Zabczyk: Mathematical Control Theory. Birkhäuser 1992. • Ruth F. Curtain, Hans Zwart: An Introduction to Infinite-Dimensional Systems Theory. Springer 1995.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus den Modulen Analysis und Lineare Algebra sind hinreichend.
Modul-verantwortliche	Rainer Nagel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-55-08</td><td colspan="2">Modultitel:
Spektraltheorie positiver Operatoren</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">6</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
180 h</td><td>Kontaktzeit:
60 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte: Ausgehend von den klassischen Sätzen von Perron und Frobenius über das Spektrum positiver Matrizen, werden positive lineare Abbildungen auf C^*- und W^*-Algebren und deren spektralen und algebraischen Eigenschaften untersucht. Aus diesen lassen sich dann die ergodischen Eigenschaften dieser Operatoren, d.h. die Konvergenz der Potenzen und der Mittel, herleiten. Im Anschluss besprechen wir noch die Verallgemeinerung auf Operatorhalbgruppen. Anwendungen der Theorie finden sich u.a. in der mathematischen Physik.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden erlernen die grundlegenden spektralen Eigenschaften positiver Operatoren auf C^*- und W^*-Algebren und die Zusammenhänge mit der nichtkommutativen Ergodentheorie. In dem sich an die Vorlesung anschließenden Seminar können Themen bearbeitet werden, die zu einer Masterarbeit führen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Spektraltheorie positiver Operatoren</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="2">nein</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180 o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>o</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt. – Das Modul kann vom ausnahmsweise Dozenten auch ohne Übungen angeboten werden; in diesem Fall werden für das Modul statt 5 nur 3 Leistungspunkte vergeben.</td></tr>
<tr><td>Literatur</td><td colspan="3">Exemplarische Literatur:
• Tanja Eisner, Markus Haase, Rainer Nagel : Operator Theoretic Aspects of Ergodic Theory. Springer 2015.
• Ulrich Groh: Spectral Theory of Completely Positive Maps on C^*- and W^*-Algebras. Preprint.</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="3">Das Modul gehört zu den Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie sowie Mathematische Physik. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten Studienschwerpunkt, Vertiefungswissen Mathematik oder Freier Wahlbereich einbringbar.</td></tr>
</table>

Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus der Funktionalanalysis und den Operatoralgebren werden vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Ulrich Groh, Rainer Nagel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-55-09	**Modultitel:** Nichtkommutative Ergodentheorie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Zunächst werden die wesentlichen Grundbegriffe und Eigenschaften der C^*- und W^*-Algebren vorgestellt und diskutiert. Danach werden, ausgehend von der kommutativen Theorie, nichtkommutative dynamische Systeme definiert. Mit Hilfe der sog. Kreuzprodukte wird dann gezeigt, wie man mit Hilfe der Gruppendarstellung solche nichtkommutativen dynamischen Systeme charakterisieren kann. Dabei wird stets auf die Bedeutung in der Mathematischen Physik eingegangen.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die zentralen Begriffe, Ergebnisse und Methoden der nichtkommutativen Ergodentheorie, das heißt von dynamischen Systemen auf Operatoralgebren kennengelernt. Dabei haben sie das faszinierende Zusammenspiel zwischen der Struktur der von Neumann-Algebren und dem (asymptotischen und spektraltheoretischen) Verhalten von Operatoren auf diesen Algebren erlebt. Die Studierenden haben dabei erkannt, wie ein axiomatischer und struktureller Standpunkt es erlaubt, verschiedene Fragestellungen gleichzeitig zu behandeln und zu lösen. Die Studierenden sind zudem in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbstständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Nichtkommutative Ergodentheorie	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Tanja Eisner, Balint Farkas, Markus Haase, Rainer Nagel: Operator Theoretic Aspects of Ergodic Theory. Springer 2015. • Bruce Blackadar: Operator Algebras. Springer 2006. • Alai Guichardet: Systèmes dynamiques non commutatifs. Astérisque 13-14 1974. • Dirk Werner: Funktionalanalysis. Springer 1995. • Volker Runde: A Taste of Topology. Springer 2005.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Gute Kenntnisse der Funktionalanalysis und Grundkenntnisse der Topologie. Interesse an mathematischer Quantenmechanik.
Modulverantwortliche	Rainer Nagel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-55-10	**Modultitel:** Pseudodifferentialoperatoren		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		

Modulinhalt

Inhalte:

- Fourier-Transformation und Sobolev-Räume.
- Pseudodifferentialoperatoren auf Mannigfaltigkeiten.
- Endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit.
- Fredholm Operatoren und elliptische Komplexe .
- Der Wärmeleitungskern und der lokale Indexsatz.
- Der Satz von Atiyah-Bott-Patodi.
- Von Neumann Algebren und Darstellungen.
- Der L2-Indexsatz.

Qualifikationsziele

Die Studierenden erlernen grundlegende Techniken der Theorie der elliptischen Differentialoperatoren und Spektralgeometrie. Sie verstehen den Zusammenhang zwischen Differential- und Integraloperatoren und wie beide im allgemeineren Kalkül der Pseudodifferentialoperatoren aufgehen, wie sich durch Übergang von einem zum anderen etwa Lösungstechniken für Differentialgleichungen ergeben. Sie sind im Stande, in konkreten Fällen theoretische Ansätze zur Lösung spezieller Probleme zu benutzen. Sie erlernen moderne Ansätze der L2-Theorie zu benutzen, um tiefliegende gruppentheoretische Aussagen zu beweisen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Pseudodifferentialoperatoren	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Peter B. Gilkey: Invariance theory, the heat equation, and the Atiyah-Singer index theorem. Publish or Perish 1984. • Wolfgang Lück: L2-invariants: theory and applications to geometry and K-theory. Springer 2002. • Michael Taylor: Pseudo differential operators. Springer 1974. • Man-Wah Wong: An introduction to pseudo-differential operators. World Scientific Publishing 2014.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Es werden Kenntnisse aus dem Modul Funktionalanalysis vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Anton Deitmar

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-55-11**	**Modultitel:** Einführung in die Harmonische Analyse		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Fourier-Reihen und Fourier-Transformation. • Plancherel- und Umkehrsätze. • Poissonsche Summenformel. • Temperierte Distributionen. • Zudem wird eine Auswahl aus den folgenden Themengebieten behandelt: – LCA-Gruppen; – allgemeine Fourier-Transformation; – nicht-abelsche Gruppen und Darstellungen; – Sobolev-Räume; – Singuläre Integrale; – Poisson Integrale.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden können algebraische und analytische Methoden verknüpfen und problemlösend anwenden. Sie erkennen das Wechselspiel der Eigenschaften von Funktionen und ihrer Fourier-Transformierten und können die daraus gewonnenen Erkenntnisse in Fragestellungen der Physik, Analysis bis zur Zahlentheorie anwenden. Sie verstehen die Interaktion von Gruppentheorie und Analysis und gewinnen hieraus tiefe Erkenntnisse über verschiedene Funktionenräume. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
	Einführung in die Harmonische Analyse	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
		Ü	f	2	3					
	In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.									

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Anton Deitmar: A first course in harmonic analysis. Springer 2005. • Elias M. Stein: Singular integrals and differentiability properties of functions. Princeton University Press, 1970. • Elias M. Stein, Guido Weiss: Introduction to fourier analysis on euclidean spaces. Princeton University Press 1971.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Inhaltlich ist das Modul Funktionalanalysis Voraussetzung für die Teilnahme an diesem Modul.
Modulverantwortliche	Anton Deitmar

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-55-12	**Modultitel:** Harmonische Analyse im euklidischen Raum		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Fourier-Transformation. • Überdeckungs-, Zerlegungs- und Interpolationssätze. • Singuläre Integrale, Poisson-Integrale. • Hardy- und BMO-Räume, Multiplikatorensätze, Littlewood-Paley-Theorie.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die zentralen Begriffe, Ergebnisse und Methoden der Harmonischen Analyse im euklidischen Raum kennengelernt. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	siehe unten		

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Harmonische Analyse im euklidischen Raum	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Charles L. Feffermann, Elias M. Stein: H^p spaces of several variables. Acta Mathematica 129, pp. 137-193, 1972. • Christopher D. Sogge: Fourier integrals in classical analysis. Cambridge University Press 2017. • Elias M. Stein: Singular integrals and differentiability properties of functions. Princeton University Press 1970. • Elias M. Stein: Harmonic analysis. Princeton University Press 1993. • Elias M. Stein, Guido Weiss: Introduction to Fourier analysis on Euclidean spaces. Princeton University Press 1971.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich sind die Module Funktionalanalysis und Einführung in die harmonische Analyse Voraussetzung für die Teilnahme an diesem Modul.
Modul-verantwortliche	Reiner Schützle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-55-13**	**Modultitel:** Harmonische Analyse auf abelschen Gruppen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Lokalkompakte Gruppen, Existenz- und Eindeutigkeit von Haar-Maßen. • Faltungsalgebren, Banach-Algebren, der Satz von Gelfand-Neumark. • LCA-Gruppen, Pontryagin-Dualität, Plancherel-Satz, Strukturtheorie von LCA-Gruppen.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die zentralen Begriffe und Methoden der abstrakten Harmonischen Analyse kennengelernt und können damit umgehen. Sie haben den Zusammenhang zwischen topologisch/analytisch/geometrischen Begriffen wie LCA-Gruppen und ihrem Niederschlag in algebraischen Strukturen wie C^*-Algebren kennengelernt und können diese Denkweise auf andere Theorien übertragen. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Harmonische Analyse auf abelschen Gruppen	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Anton Deitmar: A first course in Harmonic Analysis. Springer 2005. • Anton Deitmar, Siegfried Echterhoff: Principles of Harmonic Analysis. Springer 2008. • Edwin Hewitt, Kenneth Ross: Abstract harmonic analysis. Vol. I. Springer 1979. • Walter Rudin: Fourier analysis on groups. John Wiley 1990.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich ist das Modul Funktionalanalysis Voraussetzung für die Teilnahme an diesem Modul.
Modul-verantwortliche	Anton Deitmar

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-55-14</td><td colspan="2">Modultitel:
Harmonische Analyse auf allgemeinen Gruppen</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Darstellungstheorie kompakter Gruppen, Satz von Peter-Weyl.
• Darstellungstheorie allgemeiner Gruppen.
• Spurformel und Anwendungen in der Heisenberg-Gruppe und der $SL_2(\mathbb{R})$.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden haben die tieferen Begriffe und Methoden der abstrakten Harmonischen Analyse kennengelernt und können damit umgehen. Sie beherrschen die Spurformel und verstehen ihre weit-reichenden Implikationen, auch auf andere Gebiete der Mathematik. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Harmonische Analyse auf allgemeinen Gruppen</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Literatur</td><td colspan="3">Exemplarische Literatur:
• Anton Deitmar, Siegfried Echterhoff: Principles of Harmonic Analysis. Springer 2008.
• Gerald B. Folland: A course in abstract harmonic analysis. Studies in Advanced Mathematics. Boca Raton 1995.
• Michael E. Taylor: Noncommutative Harmonic Analysis. AMS 1986.</td></tr>
</table>

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich ist das Modul Harmonische Analyse auf abelschen Gruppen Voraussetzung für die Teilnahme an diesem Modul.
Modul-verantwortliche	Anton Deitmar

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-55-15</td><td colspan="2">Modultitel:
Ausgewählte Kapitel der Operatorentheorie</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Spektraltheorie beschränkter und unbeschränkter linearer Operatoren, speziell Spektralkalkül.
Spektraltheorie positiver Operatoren – Perron-Frobenius-Theorie.
Spektraltheorie für Operatoren der Ergodentheorie.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden beherrschen spektraltheoretischen Begriffe und insbesondere den abstrakten Funktionalkalkül. Das können sie dann auf konkrete Operatoren anwenden und Eigenschaften wie das asymptotische Verhalten diskutieren. Außerdem sind sie in der Lage, Querverbindungen zu anderen mathematischen Gebieten wie Stochastik, Ergodentheorie oder Zahlentheorie zu erkennen. Die Studierenden sind zudem in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Ausgewählte Kapitel der Operatorentheorie</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Klaus Jochen Engel, Rainer Nagel: One-parameter semigroups for linear evolution equations. Springer 2000. • Markus Haase: The Functional Calculus for Sectorial Operators. Birkhäuser 2006.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Solide Kenntnisse der Operatorentheorie, insbesondere der Hille-Yosida Theorie für Operatorhalbgruppen werden vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Rainer Nagel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-55-21**	**Modultitel:** Einführung in Partielle Differentialgleichungen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		

Modulinhalt

Inhalte:

- Harmonische Funktionen.
- Maximumprinzipien.
- Sobolev-Räume.
- L^2-Theorie.
- Wichtige Beispiele (Laplace-Gleichung, Wellengleichung, Wärmeleitungsgleichungen).
- Fundamentallösungen (elliptische Situation).
- Schwache Lösungen elliptischer Gleichungen.

Qualifikationsziele

Die Studierenden haben ein zentrales Gebiet der Analysis kennengelernt, dessen Begriffe und Methoden grundlegend für viele andere Gebiete sind, etwa für die Numerik und die Stochastik. Des Weiteren werden auch Evolutionsgleichungen thematisiert, die starke Verbindungen zur Geometrie haben. Die Studierenden sind mit den zentralen Begriffen, Ergebnissen und Methoden der Linearen Partiellen Differentialgleichungen vertraut und können diese Methoden in den weitergehenden Veranstaltungen erfolgreich anwenden. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Einführung in Partielle Differentialgleichungen	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Lawrence C. Evans: Partial differential equations. American Mathematical Society 2010. • David Gilbarg, Neil S. Trudinger: Elliptic partial differential equations of second order. Springer 2001. • Olga A. Ladyzenskaja, Vsevolod A. Solonnikov, Nina N. Uralceva: Linear and quasilinear equations of parabolic type. AMS 1968.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. In Kombination mit einem der Module Numerik stationärer Differentialgleichungen oder Numerik instationärer Differentialgleichungen ist es im Studienschwerpunkt *Numerische Mathematik und Optimierung* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modulverantwortliche	Gerhard Huisken, Reiner Schätzle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-55-22**	**Modultitel:** Partielle Differentialgleichungen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Schauder-Abschätzungen. • Calderon-Zygmund-Abschätzungen. • Harnack-Ungleichung. • Hölder-Regularität. • Viskositätslösungen. • Existenz von Lösungen nach Perron. • Satz von Evans-Krylov.		
Qualifikationsziele	Nachdem die Studenten die grundlegenden Begriffe und Methoden in Einführung in Partielle Differentialgleichungen erlernt haben, werden diese Kenntnisse vertieft. Die Studenten werden auf aktuelle Fragen der Forschung vorbereitet und an diese herangeführt werden. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Partielle Differentialgleichungen	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Luis Angel Caffarelli, Xavier Cabre: Fully nonlinear elliptic equations. American Mathematical Society 1995. • Michael G. Crandall, Hitoshi Ishii, Pierre-Louis Lions: User's Guide to Viscosity Solutions of second Order Partial Differential Equations. Bulletin of the American Mathematical Society 27, No. 1, pp. 1-67, 1992. • David Gilbarg, Neil S. Trudinger: Elliptic partial differential equations of second order. Springer 2001. • Olga A. Ladyzenskaja, Vsevolod A. Solonnikov, Nina N. Uralceva: Linear and quasilinear elliptic equations.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunkts gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. In Kombination mit einem der Module Numerik stationärer Differentialgleichungen oder Numerik instationärer Differentialgleichungen ist es im Studienschwerpunkt *Numerische Mathematik und Optimierung* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Inhaltlich ist das Modul Einführung in Partielle Differentialgleichungen Voraussetzung für die Teilnahme an diesem Modul.
Modulverantwortliche	Gerhard Huisken, Reiner Schützle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-55-24**	**Modultitel:** Nichtlineare elliptische partielle Differentialgleichungen in minimaler Flächentheorie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Der Kurs behandelt PDE-Aspekte von Minimalflächen, beginnend mit der Existenztheorie für Minimalgraphen mit vorgegebenen Randdaten. Der Schwerpunkt wird auf der De Giorgi-Nash-Schätzung liegen, die eine der wichtigsten Errungenschaften der Mathematik des 20. Jahrhunderts darstellt und für die Untersuchung quasilinearer elliptischer und parabolischer Gleichungen von grundlegender Bedeutung ist. Wir werden auch Verbindungen zwischen minimalen Oberflächen und der Allen-Cahn-Gleichung untersuchen, einer semilinearen Gleichung aus der Theorie der Phasenübergänge. Hier liegt der Schwerpunkt auf Starrheitsresultaten für ganze Lösungen (namentlich das Bernstein-Problem und die eng verwandte De-Giorgi-Vermutung) und deren Verwendung beim Nachweis der Regularität durch Reskalierung.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden erwerben fortgeschrittene Kenntnisse der Theorie nichtlinearer elliptischer PDEs und ein Verständnis für die Zusammenhänge zwischen dieser Theorie und tiefgreifenden Problemen der Geometrie. Sie erwerben eine Reihe neuer Techniken zur quantitativen und qualitativen Kontrolle von Objekten, die durch nichtlineare Differentialgleichungen geregelt werden. Zu diesen Techniken gehören fortgeschrittene Anwendungen der Sobolev-Theorie, Reskalierungs- und Kompaktheitsargumente, Stampacchia-Iteration, Moser-Iteration und die Verwendung von Monotonizitätsformeln. Die Studierenden sind in der Lage zu beurteilen, ob und wann diese Techniken auf ein bestimmtes Problem anwendbar sind. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen und Begriffe aus der Vorlesung zu benennen und zu belegen sowie die in der Vorlesung erarbeiteten Zusammenhänge zu erläutern und in einen größeren Rahmen einzuordnen. Sie können zudem den den aktuellen Stand der Forschung auf dem Gebiet beschreiben und kritisch hinterfragen. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	<table><tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr><tr><td rowspan="2">Nichtlineare elliptische partielle Differentialgleichungen in minimaler Flächentheorie</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180 o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr><tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr></table> In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.
Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Lawrence C. Evans: Partial Differential Equations. AMS 2010. • David Gilbarg, Neil Trudinger: Elliptic partial differential equations of second order. Springer 1083. • David Kinderlehrer, Guido Stampacchia: An introduction to variational inequalities and their applications. Siam 2000.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Grundlegende Kenntnisse linearer elliptischer partieller Differentialgleichungen (Schauder-Theorie, Existenzaussagen für das Dirichlet-Problem) sind wünschenswert, aber nicht zwingend erforderlich.
Modul-verantwortliche	Gerhard Huisken

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-55-25**	**Modultitel:** Einführung in Partielle Differentialgleichungen – Teil 1		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	5		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte: Inhalte:** • Harmonische Funktionen. • Maximumprinzipien. • Sobolev-Räume.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben ein zentrales Gebiet der Analysis in seinen ersten Grundzügen kennengelernt, dessen Begriffe und Methoden grundlegend für viele andere Gebiete sind, etwa für die Numerik und die Stochastik. Die Studierenden sind mit zentralen Begriffen, Ergebnissen und Methoden der Linearen Partiellen Differentialgleichungen vertraut und können diese Methoden in den weitergehenden Veranstaltungen erfolgreich anwenden. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Einführung in Partielle Differentialgleichungen - Teil 1	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	1	2					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Lawrence C. Evans: Partial differential equations. American Mathematical Society 2010. • David Gilbarg, Neil S. Trudinger: Elliptic partial differential equations of second order. Springer 2001. • Olga A. Ladyzenskaja, Vsevolod A. Solonnikov, Nina N. Uralceva: Linear and quasilinear equations of parabolic type. AMS 1968.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. In Kombination mit einem der Module Numerik stationärer Differentialgleichungen oder Numerik instationärer Differentialgleichungen ist es im Studienschwerpunkt *Numerische Mathematik und Optimierung* einbringbar. Das Modul ist inhaltlich Teil des Moduls Einführung in Partielle Differentialgleichungen und kann nicht mit diesem zusammen eingebracht werden.
Teilnahmevoraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modulverantwortliche	Gerhard Huisken, Reiner Schätzle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-55-27	**Modultitel:** Voll-nichtlineare elliptische Gleichungen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	5		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Lösung allgemeiner voll-nichlinearer gleichmäßig elliptischer Gleichungen. • Lösung der Monge-Ampere-Gleichung.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die Techniken erlernt, sukzessive das Supremum, den Gradienten und die zweiten Ableitungen einer gegebenen Lösung einer voll-nichtlinearen elliptischen Gleichung abzuschätzen. Sie erfahren wie anschließend der Stetigkeitsmodul der zweiten Ableitungen durch den Satz von Evans-Krylov abgeschätzt wird und erlernen die Kontinuitätsmethode, die zur Existenz einer Lösung führt. Sie können die Methoden insbesondere auf allgemeine gleichmäßig elliptische Gleichungen und auf die spezielle, nicht gleichmäßig elliptische Monge-Ampere-Gleichung anwenden. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Voll-nichtlineare elliptische Gleichungen	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	1	2					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt. – Das Modul kann vom ausnahmsweise Dozenten auch ohne Übungen angeboten werden; in diesem Fall werden für das Modul statt 5 nur 3 Leistungspunkte vergeben.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Luis A. Caffarelli, Joseph Kohn, Joel Spruck: The Dirichlet problem for nonlinear second-order elliptic equations. I. Monge-Ampere equation. In: Communications on Pure and Applied Mathematics 37,3 pp. 369-402. • Luis A. Caffarelli, Joseph Kohn, Luis Nirenberg, Joel Spruck: The Dirichlet problem for nonlinear second-order elliptic equations. II. Complex Monge-Ampere, and uniformly elliptic, equations. In: Communications on Pure and Applied Mathematics 38,2 pp. 209-252. • David Gilbarg, Neil S. Trudinger: Elliptic Partial Differential Equations of Second Order. Springer 1998.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. Das Modul kann wegen zu großer inhaltlicher Überschneidungen nicht zusammen mit dem Modul MAT-60-36 Fully nonlinear elliptic and parabolic partial differential equations eingebracht werden.
Teilnahmevoraussetzungen	Für die Teilnahme werden die Module Einführung in die partiellen Differentialgleichungen und Partielle Differentialgleichungen vorausgesetzt.
Modulverantwortliche	Reiner Schätzle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-55-28	**Modultitel:** Morse-Theorie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Topologie differenzierbarer Mannigfaltigkeiten. • Riemannsche Metriken auf differenzierbaren Mannigfaltigkeiten. • Dynamische Systeme auf differenzierbaren Mannigfaltigkeiten. • Homotopietyp von differenzierbaren Mannigfaltigkeiten. • Hauptsätze der Morsetheorie. • Ausblick auf Morse-Homologie.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden erlernen, wie man mit Mitteln der Analysis, hier vor allem der Theorie der Dynamischen Systeme, Probleme in der Differentialtopologie von differenzierbaren Mannigfaltigkeiten untersuchen kann. Insbesondere erlernen sie, wie man durch die Niveauflächen von nicht-degenerierten Funktionen, so genannten Morsefunktionen, Aussagen über den Homotopietyp von Mannigfaltigkeiten erzielen kann. Sie schlagen damit auch eine Brücke in die Algebraische Topologie, die die Topologie (von Mannigfaltigkeiten) mit Hilfe algebraischer Methoden untersucht. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Morse-Theorie	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • John Milnor: Morse Theory. Annals of Math. Studies, Number 51. Princeton University Press 1961. • Morris W. Hirsch: Differential Topology. Graduate Texts in Mathematics 33. Springer 1988.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Algebra und Geometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Kenntnisse zu differenzierbaren Mannigfaltigkeiten und über Dynamische Systeme sind hilfreich.
Modulverantwortliche	Frank Loose

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-55-32**	**Modultitel:** Ausgewählte Kapitel aus der Theorie dynamischer Systeme		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Eine Auswahl aus den folgenden Themengebieten wird behandelt werden: • Dynamische Systeme als Lösungsflüsse gewöhnlicher und partieller Differentialgleichungen; • Isomorphieinvarianten dynamischer Systeme, insbesondere das diskrete Spektrum; • lineare Schiefproduktflüsse; • Anwendungen in Zahlentheorie, Kombinatorik und Stochastik.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden sind mit qualitativen Fragen der Theorie gewöhnlicher und partieller Differentialgleichungen und den Methoden zu deren Untersuchung vertraut. Auf der Basis solider Kenntnisse aus Funktionalanalysis, Operatorentheorie und Ergodentheorie haben sie die vielfältige Anwendbarkeit abstrakter mathematischer Konzepte erfahren. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Ausgewählte Kapitel aus der Theorie dynamischer Systeme	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur

Exemplarische Literatur:

- Tanja Eisner, Balint Farkas, Markus Haase, Rainer Nagel: Operator theoretic aspects of ergodic theory. Springer 2015.
- Manfred Einsiedler, Thomas Ward: Ergodic theory: with a view towards Number Theory. Springer 2011.
- David Kerr, Hanfeng Li: Ergodic theory: independence and dichotomies. Springer 2016.

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich ist das Modul Dynamische Systeme Voraussetzung für die Teilnahme an diesem Modul.
Modul-verantwortliche	Rainer Nagel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-55-33	**Modultitel:** Abstrakte Dynamische Systeme		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Es werden die zentralen Eigenschaften topologischer dynamischer Systeme wie z.B. Minimalität, Rekurrenz und (topologische) Ergodizität wiederholt. Anschließend werden die dort bewiesenen Aussagen auf kategorientheoretische Fundamente gesetzt. Wichtige Strukturresultate wie die Jacobs-deLeeuw-Glicksberg Zerlegung, der Satz von Halmos-von Neumann und die Furstenberg-Zimmer Strukturtheorie werden diskutiert und verallgemeinert. In diesem Zusammenhang werden aktuelle Forschungsthemen aufgegriffen und eine kategorientheoretische Perspektive entwickelt. Unter anderem wird die Anwendung der Ergodentheorie auf Zahlentheorie und Kombinatorik vorgestellt.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben erfahren, wie aus konkreten Fragen (in der Zahlentheorie) abstrakte Theorien (hier dynamische Systeme, Koopmansysteme) entwickelt und weiter abstrahiert werden können. Sie können die in diesen Gebieten entwickelten Techniken anwenden, um konkrete (z.B. zahlentheoretische oder ergodentheoretische) Probleme zu behandeln. Damit haben die Studierenden wichtige Beispiele für die Nützlichkeit abstrakter mathematischer Theorien kennengelernt. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Abstrakte Dynamische Systeme	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Tanja Eisner et al.: Operator theoretic aspects of ergodic theory. Springer 2015. • Jan de Vries: Topological dynamical systems. An introduction to the dynamics of continuous mappings. De Gruyter 2014. • Saunders Mac Lane: Categories for the working mathematician. Springer 1998. • Helmut H. Schaefer: Banach lattices and positive operators. Springer 1978.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. Das Modul kann wegen der großen inhaltlichen Überschneidungen nicht zusammen mit dem Modul 'Einführung in Dynamische Systeme' eingebracht werden.
Teilnahme-voraussetzungen	Solide Kenntnisse in Topologie, Funktionalanalysis und Operatorentheorie, insbesondere Spektraltheorie positiver Operatoren werden vorausgesetzt. Grundlagen aus Ergodentheorie und Kategorientheorie sind ebenfalls sehr nützlich, jedoch nicht strikt notwendig.
Modul-verantwortliche	Rainer Nagel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-55-34	**Modultitel:** Einführung in Dynamische Systeme		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Die Keplerschen Gesetze. • Gleichgewichtslagen. • Stabilität. • Räuber-Beute-Modell. • Satz von Poincaré-Bendixson. • Limesmengen. • Periodische Bahnen. • Himmelsmechanik.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden können qualitative Fragen über die Lösungen von gewöhnliche Differentialgleichungen stellen und untersuchen, wie z. B.: Wie lange existiert die maximale Lösung? Gibt es Gleichgewichtslagen oder periodische Bahnen? Wann sind Bahnen stabil? Sie sind mit den dafür notwendigen Techniken vertraut. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Einführung in Dynamische Systeme	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Morris W. Hirsch, Stephen Smale: Differential equations, dynamical systems, and linear algebra. Academic Press 1974. • Vladimir I. Arnold: Mathematical methods of classical mechanics. Springer 2010. • Carl Ludwig Siegel, Jürgen Moser: Lectures on celestial mechanics. Springer 1995.

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. Das Modul kann wegen der großen inhaltlichen Überschneidungen nicht zusammen mit dem Modul 'Dynamische Systeme' eingebracht werden.
Teilnahme-voraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modul-verantwortliche	Frank Loose

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-55-41**	**Modultitel:** Einführung in Geometrische Maßtheorie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Maße, Überdeckungssätze, Differentiation von Maßen, Hausdorff-Maße und -Dichten. • Isodiametrische Ungleichung. • Sätze von Rademacher und Whitney. • Flächen- und Koflächenformel. • Abzählbar rektifizierbare Mengen, rektifizierbare Varifaltigkeiten.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben ein wichtiges mathematisches Gebiet kennengelernt, das Analysis und Geometrie verbindet und dessen Begriffe und Methoden bei verschiedenen Problemen erfolgreich angewandt werden können. Sie haben die grundlegenden Begriffe, Ergebnisse und Methoden der Geometrischen Maßtheorie kennengelernt und können diese Methoden in den weitergehenden Veranstaltungen erfolgreich anwenden. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	siehe Tabelle unten		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Einführung in Geometrische Maßtheorie	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Lawrence C. Evans, Ronald F. Gariepy: Measure theory and fine properties of functions. CRC Press 1992. • Herbert Federer: Geometric measure theory. Springer 1969. • Leon Simon: Lectures on geometric measure theory. Australian National University 1984.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modulverantwortliche	Reiner Schätzle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-55-42</td><td colspan="2">Modultitel:
Geometrische Maßtheorie</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Erste und Zweite Variation für Varifaltigkeiten.
Monotonieformel.
Integralkompaktheitssatz von Allard.
Lipschitzapproximation.
tilt-excess-Abstieg.
Regularitätssatz von Allard.
Allgemeine und rektifizierbare Ströme.
Deformationssatz.
Flächeninhaltsminimierende Ströme.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Nachdem die Studierenden die grundlegenden Begriffe und Methoden in Einführung in Geometrische Maßtheorie erlernt haben, werden diese Kenntnisse vertieft. Die Studierenden werden auf aktuelle Fragen der Forschung vorbereitet und an diese herangeführt werden. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
</table>

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
	Geometrische Maßtheorie	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
		Ü	f	2	3					
	In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.									
Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Herbert Federer: Geometric measure theory. Springer 1969. • Enrico Giusti: Minimal surfaces and functions of bounded variation. Birkhäuser 1984. • Leon Simon: Lectures on geometric measure theory. Australian National University 1984.									
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.									
Teilnahmevoraussetzungen	Inhaltlich ist das Modul Einführung in Geometrische Maßtheorie Voraussetzung für die Teilnahme am Modul Geometrische Maßtheorie.									
Modulverantwortliche	Reiner Schätzle									

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-55-43</td><td colspan="2">Modultitel:
Flächeninhaltsminimierende Ströme</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">5</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
150 h</td><td>Kontaktzeit:
45 h</td><td>Selbststudium:
105 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Kompaktheitssatz für integrale Ströme.
• Regularität von flächeninhaltsminimierenden Strömen.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Nachdem die Studierenden wesentliche Begriffe und Methoden der Geometrischen Maßtheorie erlernt haben, werden diese Kenntnisse vertieft. Sie werden auf aktuelle Fragen der Forschung vorbereitet und an diese herangeführt werden. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Flächeninhaltsminimierende Ströme</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>1</td><td>2</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Literatur</td><td colspan="3">Exemplarische Literatur:
• Herbert Federer: Geometric measure theory. Springer 1969.
• Enrico Giusti: Minimal surfaces and functions of bounded variation. Birkhäuser 1984.
• Leon Simon: Lectures on geometric measure theory. Australian National University 1984.</td></tr>
</table>

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich werden die Module Einführung in die Geometrische Maßtheorie und Geometrische Maßtheorie vorausgesetzt
Modul-verantwortliche	Reiner Schätzle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-55-44</td><td colspan="2">Modultitel:
Einführung in Geometrische Maßtheorie – Maßtheoretische Methoden</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">5</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
150 h</td><td>Kontaktzeit:
45 h</td><td>Selbststudium:
105 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Maße, Überdeckungssätze, Differentiation von Maßen, Hausdorff-Maße und -Dichten.
• Isodiametrische Ungleichung.
• Sätze von Rademacher und Whitney.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden haben ein wichtiges mathematisches Gebiet kennengelernt, das Analysis und Geometrie verbindet und dessen Begriffe und Methoden bei verschiedenen Problemen erfolgreich angewandt werden können. Sie haben die grundlegenden Begriffe, Ergebnisse und maßtheoretischen Methoden der Geometrischen Maßtheorie kennengelernt und können diese Methoden in den weitergehenden Veranstaltungen erfolgreich anwenden. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Einführung in Geometrische Maßtheorie – Maßtheoretische Methoden</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180 o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>1</td><td>2</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Lawrence C. Evans, Ronald F. Gariepy: Measure theory and fine properties of functions. CRC Press 1992. • Herbert Federer: Geometric measure theory. Springer 1969. • Leon Simon: Lectures on geometric measure theory. Australian National University 1984.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. Das Modul ist inhaltlich Teil des Moduls Einführung in die Geometrische Maßtheorie und kann nicht mit diesem zusammen eingebracht werden.
Teilnahme-voraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modul-verantwortliche	Reiner Schätzle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-55-45</td><td colspan="2">Modultitel:
Einführung in Geometrische Maßtheorie – Varifaltigkeiten</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">5</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
150 h</td><td>Kontaktzeit:
45 h</td><td>Selbststudium:
105 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Flächen- und Koflächenformel.
Abzählbar rektifizierbare Mengen, rektifizierbare Varifaltigkeiten.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden haben ein wichtiges mathematisches Gebiet kennengelernt, das Analysis und Geometrie verbindet und dessen Begriffe und Methoden bei verschiedenen Problemen erfolgreich angewandt werden können. Sie haben grundlegende Begriffe, Ergebnisse und Methoden der Geometrischen Maßtheorie kennengelernt und können diese Methoden in den weitergehenden Veranstaltungen erfolgreich anwenden. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Einführung in Geometrische Maßtheorie – Varifaltigkeiten</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>1</td><td>2</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Lawrence C. Evans, Ronald F. Gariepy: Measure theory and fine properties of functions. CRC Press 1992. • Herbert Federer: Geometric measure theory. Springer 1969. • Leon Simon: Lectures on geometric measure theory. Australian National University 1984.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. Das Modul ist inhaltlich Teil des Moduls Einführung in die Geometrische Maßtheorie und kann nicht mit diesem zusammen eingebracht werden.
Teilnahme-voraussetzungen	Das Modul Integrations- und Maßtheorie aus dem B.Sc. Mathematik oder ein gleichwertiges Modul muss im Verlauf des Studiums erfolgreich abgeschlossen worden sein.
Modul-verantwortliche	Reiner Schätzle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-55-46	**Modultitel:** Elastische Kurven		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Klassifikation elastischer Kurven nach Langer und Singer. • Ordnungsreduktion der Euler-Lagrange Gleichung der elastischen Energie einer Kurve. • Qualitatives Verhalten einer elastischen Kurve. • Lösen der Willmore Gleichung unter Axialsymmetrie mit variationellen Methoden.		
Qualifikationsziele	Die Studenten lernen anhand des Beispiels der elastischen Energie einer Kurve den Umgang mit einem geometrisch relevanten Funktional und dessen kritischen Punkten. So erhalten sie einen Einblick in die Theorie von elliptischen Differentialgleichungen vierter Ordnung, bei denen vertraute Techniken, wie zum Beispiel das Maximum-Prinzip, nicht mehr verwendet werden können. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Elastische Kurven	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Filippo Gazzola, Hans-Christoph Grunau, Guido Sweers: Polyharmonic Boundary Value Problems, Springer 2010. • David Gilbarg, Neil S. Trudinger: Elliptic partial differential equations of second order. Springer 1998. • Joel Langer, David A. Singer: The total squared curvature of closed curves, J. Differential Geom. Band 20, Nummer 1, Seiten 1-22, 1984. • John M. Lee: Introduction to smooth manifolds. Springer 2013. • Michael Struwe: Variational Methods. Springer 2008.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich werden Kenntnisse aus dem Modul Einführung in die partiellen Differentialgleichungen sowie Grundkenntnisse aus der Differentialgeometrie vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Reiner Schützle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-55-47**	**Modultitel:** Geometrische Maßtheorie – Varifaltigkeiten		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	5		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Erste und Zweite Variation für Varifaltigkeiten. • Monotonieformel. • Integralkompaktheitssatz von Allard. • Lipschitzapproximation. • tilt-excess-Abstieg. • Regularitätssatz von Allard.		
Qualifikationsziele	Nachdem die Studierenden die grundlegenden Begriffe und Methoden in Einführung in Geometrische Maßtheorie erlernt haben, werden diese Kenntnisse mit Blick auf Varifaltigkeiten vertieft. Die Studierenden werden auf aktuelle Fragen der Forschung vorbereitet und an diese herangeführt werden. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Geometrische Maßtheorie – Varifaltigkeiten	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	1	2					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Herbert Federer: Geometric measure theory. Springer 1969. • Enrico Giusti: Minimal surfaces and functions of bounded variation. Birkhäuser 1984. • Leon Simon: Lectures on geometric measure theory. Australian National University 1984.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. Das Modul ist inhaltlich Teil des Moduls Geometrische Maßtheorie und kann nicht mit diesem zusammen eingebracht werden.
Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich ist das Modul Einführung in Geometrische Maßtheorie Voraussetzung für die Teilnahme.
Modul-verantwortliche	Reiner Schätzle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-55-48**	**Modultitel:** Geometrische Maßtheorie – Ströme		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	5		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Allgemeine und rektifizierbare Ströme. • Deformationssatz. • Flächeninhaltsminimierende Ströme.		
Qualifikationsziele	Nachdem die Studierenden die grundlegenden Begriffe und Methoden in Einführung in Geometrische Maßtheorie erlernt haben, werden diese Kenntnisse mit besonderem Blick auf Ströme vertieft. Die Studierenden werden auf aktuelle Fragen der Forschung vorbereitet und an diese herangeführt werden. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Geometrische Maßtheorie – Flüsse	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	1	2					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Herbert Federer: Geometric measure theory. Springer 1969. • Enrico Giusti: Minimal surfaces and functions of bounded variation. Birkhäuser 1984. • Leon Simon: Lectures on geometric measure theory. Australian National University 1984.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. Das Modul ist inhaltlich Teil des Moduls Geometrische Maßtheorie und kann nicht mit diesem zusammen eingebracht werden.
Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich ist das Modul Einführung in Geometrische Maßtheorie Voraussetzung für die Teilnahme.
Modul-verantwortliche	Reiner Schätzle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-55-49	**Modultitel:** Variationsrechnung		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	5		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Direkte Methode der Variationsrechnung. • Euler-Lagrange Gleichungen. • Palais-Smale Bedingung. • Mountain-Pass Lemma nach Ambrosetti-Rabinowitz.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben im ersten Teil der Veranstaltung die direkte Methode der Variationsrechnung erlernt, welche in erster Linie zum Nachweis der Existenz von schwachen Lösungen partieller Differentialgleichungen dient, aber auch Anwendungen in z.B. der Differentialgeometrie besitzt. Sie haben sich zudem die dafür nötigen Grundlagen aus der Funktionalanalysis und den partiellen Differentialgleichungen erarbeitet und können diese auch in einem anderen Kontext, z.B. der geometrischen Analysis, verwenden. Im zweiten Teil der Veranstaltung haben die Studierenden ein sogenanntes Mountain-Pass Lemma kennengelernt. Mit dessen Hilfe können sie Nichteindeutigkeiten bei der Existenz von Lösungen partieller Differentialgleichungen untersuchen. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Variationsrechnung	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	1	2					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Michael Struwe: Variational Methods, Springer 2008. • David Gilbarg, Neil S. Trudinger: Elliptic Partial Differential Equations of Second Order, Springer 1998. • Walter Rudin: Functional Analysis, Mc Graw Hill Education 1991.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Kenntnisse aus den Modulen Einführung in partielle Differentialgleichungen und Funktionalanalysis sind von Vorteil, sind aber nicht zwingend erforderlich.
Modulverantwortliche	Reiner Schätzle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-55-51**	**Modultitel:** Lie-Gruppen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Mannigfaltigkeiten und Lie-Gruppen. • Lie-Algebren und Exponentialabbildung. • Überlagerungen und Klassifikation von Lie-Gruppen durch ihre Lie-Algebren. • Klassische Lie-Gruppen. • Operationen von Lie-Gruppen und Homogene Räume.		
Qualifikationsziele	Lie-Gruppen liegen an der Schnittstelle zwischen Geometrie, Algebra und Analysis. Sie sind geeignet, Symmetrien von geometrischen Objekten, aber auch algebraischen Gleichungen oder Lösungen von Differentialgleichungen zu beschreiben, insbesondere, wenn diese Symmetrien eine kontinuierliche Schar bilden. Die Studierenden lernen hier an einem prominenten Beispiel, wie verschiedene Disziplinen der Mathematik außerordentlich erfolgreich zusammenwirken können und wie ein überzeugender Formalismus entwickelt wird, der eine Vielzahl von Symmetriephänomenen präzise beschreiben kann. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Lie-Gruppen	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Joachim Hilgert, Karl-Hermann Neeb: Liegruppen und Lie-Algebren. Vieweg 1991. • Gerhard P. Hochschild: The structure of Lie groups. Holden-Day 1965. • Frank W. Warner: Foundations of differentiable manifolds and Lie groups. Springer 1983.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* und *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modulverantwortliche	Anton Deitmar, Frank Loose

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-55-52	**Modultitel:** SL2(R)	**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3	
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h; Kontaktzeit: 30 h; Selbststudium: 60 h	
Moduldauer	1 Semester	
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig	
Fachsemester	1-3	
Unterrichtssprache	Deutsch und Englisch	
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS	
Modulinhalt	**Inhalte:** • Strukturtheorie der Lie-Gruppe $SL_2(\mathbb{R})$. • Einführung in die Darstellungstheorie der $SL_2(\mathbb{R})$. • Bestimmung des unitären Duals. • Beweis der expliziten Plancherel-Formel.	
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben mit der $SL_2(\mathbb{R})$ beispielhaft eine wichtige Lie-Gruppe im Detail studiert und sich dabei mit den Grundzügen der Darstellungstheorie von Lie-Gruppen vertraut gemacht. Sie haben dabei die gelernt, mit den Grundelementen der hyperbolischen Geometrie umzugehen, Darstellungen zu konstruieren, zu zerlegen und zu klassifizieren. Zudem sind sie in der Lage, diese Methoden auch auf andere Lie-Gruppen zu übertragen und haben ein vertieftes Verständnis für die Theorie der Lie-Gruppen entwickelt. Sie verstehen die Analysis hinter dem Plancherel-Satz verstehen und können diese anwenden. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.	
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	siehe Tabelle unten	
Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Anthony Knapp: Representation theory of semisimple groups. PUP 2001. • Serge Lang: SL2(R). Springer 1985.	
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* und *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.	

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
$SL_2(\mathbb{R})$	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Teilnahme-voraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modul-verantwortliche	Anton Deitmar

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-55-53	Modultitel: Automorphe Formen		Art des Moduls: Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	5		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Modulformen für die Modulgruppe und ihre Kongruenzuntergruppen. • Beispiele: Eisenstein-Reihen, Ramanujansche Delta Funktion, Theta-Reihen. • Modulkurven. • Arithmetische Anwendungen und Vermutungen. • Hecke Operatoren. • Die L-Funktion eines Modulforms und ihre Verbindungen mit Elliptischen Kurven.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die zentralen Begriffe und Methoden der Theorie der Automorphen Formen in Beispielen kennengelernt und können damit umgehen. Sie haben den Zusammenhang zwischen modularen, reell-darstellungstheoretischen und adelischen L-Funktionen erfasst. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Automorphe Formen	V	f	2	3	ja	K o. mP o. H	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	1	2					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Deitmar, Anton: Automorphic Forms. Springer 2012. • Goldfeld, Dorian: Automorphic forms and L-functions for the group GL(n,R). Cambridge University Press 2015. • Serre, Jean-Pierre: A course in arithmetic. Springer 1973.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* und *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. Das Modul ist inhaltlich Teil des Moduls Einführung in die Geometrische Maßtheorie und kann nicht mit diesem zusammen eingebracht werden.
Teilnahme-voraussetzungen	Grundkenntnisse aus der Funktionentheorie werden vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Anton Deitmar

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-55-60**	**Modultitel:** Einführung in die Mathematische Logik		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Aussagenlogik. • Sprachen erster Stufe: – Vollständigkeit und Kompaktheit. • Berechenbarkeitstheorie: – Registermaschinen; – Gödelisierung. • Unvollständigkeit der Arithmetik: – Erster und zweiter Unvollständigkeitssatz. • Mengenlehre: – Ordinal- und Kardinalzahlen; – Unvollständigkeit der Mengenlehre.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden können mathematische Sätze und Theorien im Kontext mathematischer Logik erfassen. Sie verstehen die Grenzen möglicher mathematischer Erkenntnis, erkennen den Unterschied zwischen Wahrheit und Beweisbarkeit und können grundlegende modelltheoretische Denkweisen auf mathematische Inhalte anwenden. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Einführung in die Mathematische Logik	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Rautenberg, Wolfgang: Einführung in die Mathematische Logik. Vieweg+Teubner 2008. • Ziegler, Martin: Mathematische Logik. Birkhäuser 2016.
Verwendbarkeit	Das Modul ist keinem Studienschwerpunkt zuzuordnen. Es ist gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modul-verantwortliche	Anton Deitmar

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-55-61	**Modultitel:** Kohomologie und Garben		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Es wird gezeigt, wie man verschiedene Kohomologietheorien (Singuläre, de Rham, Cech) alle als Ableitungen des Schnittfunktors aus der Garbentheorie verstehen kann und damit ihre Gleichheit (nach Koeffizientenerweiterung) sehr leicht zeigen kann: • Einführung in die Kategorientheorie. • Vorstellung der gängigen Kohomologietheorien. • Garben, abgeleitete Funktoren, Garbenkohomologie. • Vergleich der Kohomologietheorien.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden sehen und verstehen die Verbindungen zwischen scheinbar weit auseinander liegenden Theorien. Sie verstehen Mechanismen, die algebraische, geometrische und analytische Methoden vereint. Sie haben gelernt, beliebige mathematische Theorien kategorientheoretisch zu abstrahieren, Kohomologietheorie als allgemeine Hindernis-Theorie in Anwendungen zu würdigen und Garben als Verallgemeinerungen von Funktionenräumen für topologische Fragestellungen einzusetzen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Kohomologie und Garben	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt. – Das Modul kann vom Dozenten ausnahmsweise auch ohne Übungen angeboten werden; in diesem Fall werden für das Modul statt 9 nur 6 Leistungspunkte vergeben.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Saunders Mac Lane: Categories for the working mathematician. Springer-Verlag 1971. • Allen Hatcher: Algebraic topology. Cambridge University Press 2002. • Glen Bredon: Sheaf theory. Springer-Verlag 1997. • Joseph Rotman: An introduction to homological algebra. Springer-Verlag 2008.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* sowie *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich werden lediglich Grundkenntnisse der Analysis und Linearen Algebra vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Anton Deitmar

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-55-62</td><td colspan="2">Modultitel:
Widerspruchsfreiheitsbeweise</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">6</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
180 h</td><td>Kontaktzeit:
60 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Historische Beispiele zur Frage der Widerspruchsfreiheit (Grenzwerte; Parallelenaxiom; mengentheoretische Paradoxien).
Philosophische Grundlegungsprogramme (Logizismus; Formalismus; Intuitionismus).
Das Hilbertsche Programm und die Gödelschen Sätze.
Gentzens transfiniter Widerspruchsfreiheitsbeweis für die Zahlentheorie.
Alternative Ansätze zur Widerspruchsfreiheit (u.a. Gödels T).
Aktuelle Situation der Widerspruchsfreiheitsbeweise.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden lernen den historischen Kontext, aus dem sich die Frage nach der Widerspruchsfreiheit formaler mathematischer Theorien ergab, kennen sowie die maßgeblichen modernen Techniken, um diese Frage mathematisch zu untersuchen. Sie sind in der Lage, das Problem der Widerspruchsfreiheit in der Mathematik sowohl historisch-philosophisch einordnen zu können. Zudem haben sie das mathematische Rüstzeug an die Hand erworben, entsprechende Widerspruchsfreiheitsbeweise nachvollziehen zu können und in einem gewissen Umfang auch selbst führen zu können. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td rowspan="4">Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Widerspruchsfreiheitsbeweise</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
<tr><td colspan="10">In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Literatur</td><td colspan="10">Exemplarische Literatur:
• Kurt Gödel: Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. Monatsh. f. Mathematik und Physik 38, 173-198 (1931).
• Gerhard Gentzen: Die Widerspruchsfreiheit der reinen Zahlentheorie. Math. Ann. 112, 493-565 (1936).
• Reinhard Kahle, Michael Rathjen (Hrsg.): Gentzen’s Centenary: The quest for consistency. Springer 2015.
• Reinhard Kahle, Michael Rathjen (Hrsg.): The Legacy of Kurt Schütte. Springer 2020.</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="10">Das Modul gehört zu den Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie sowie Analysis und Differentialgeometrie. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten Studienschwerpunkt, Vertiefungswissen Mathematik oder Freier Wahlbereich einbringbar.</td></tr>
<tr><td>Teilnahme-voraussetzungen</td><td colspan="10">Mathematische Grundkenntnisse im Umfang der Grundvorlesungen werden vorausgesetzt. Vorkenntnisse in der mathematischen Logik sind hilfreich, aber nicht notwendig.</td></tr>
<tr><td>Modul-verantwortliche</td><td colspan="10">Reinhard Kahle</td></tr>
</table>

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-55-63	**Modultitel:** Einführung in die Mengenlehre		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** •		
Qualifikationsziele	Die Studierenden können ... . Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Einführung in die Mengenlehre	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Literatur	**Exemplarische Literatur:** •
Verwendbarkeit	Das Modul ist keinem Studienschwerpunkt zuzuordnen. Es ist gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modul-verantwortliche	Frank Loose

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-55-64	**Modultitel:** Mathematische Beweistheorie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	6		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Axiomatische Theorien, Unvollständigkeit. • Gentzens Konsistenzbeweis für die Arithmetik. • Ordinalzahlanalyse. • Beweisbar rekursive Funktionen. • Prädikative Analysis. • Theorien induktiver Definitionen.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden sind mit den Methoden und Resultaten der modernen Beweistheorie vertraut, insbesondere mit Kalkülen zu mathematischen Theorien und deren metamathematischen Eigenschaften. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	siehe unten		

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Mathematische Beweistheorie	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Wolfram Pohlers. Proof Theory. Springer 2009.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* sowie *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Mathematische Grundkenntnisse im Umfang der Grundvorlesungen werden vorausgesetzt. Vorkenntnisse in der mathematischen Logik sind hilfreich, aber nicht notwendig.
Modul-verantwortliche	Reinhard Kahle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-55-65</td><td colspan="2">Modultitel:
Explizite Mathematik</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">6</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
180 h</td><td>Kontaktzeit:
60 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Applikative Theorien.
Explizite Mathematik.
Universen in expliziter Mathematik.
Anwendungen in der Beweistheorie.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden sind mit einem alternativen logischen Theorierahmen für Arithmetik und Subsysteme der Analysis vertraut und kennen deren Funktion in beweistheoretischen Untersuchungen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Explizite Mathematik</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. – Das Modul kann vom Dozenten ausnahmsweise auch ohne Übungen angeboten werden; in diesem Fall werden für das Modul statt 6 nur 3 Leistungspunkte vergeben.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Solomon Feferman: A language and axioms for explicit mathematics, in Algebra and Logic. Lecture Notes in Mathematics, 450, pp. 87-139, Springer-Verlag, Berlin, 1975. • Solomon Feferman: Constructive theories of functions and classes. In Logic Colloquium ?78, (Proc. Mons Colloq.), pp. 159-224, North-Holland, Amsterdam, 1979. • Gerhard Jäger, Reinhard Kahle, Thomas Strahm: On applicative theories. In Andrea Cantini, Ettore Casari, and Pierluigi Minari, editors, Logic and Foundations of Mathematics, pages 83–92, Kluwer, 1999. • Reinhard Kahle: The applicative realm. Textos de Matematica, 40, Departamento de Matemática, Universidade de Coimbra, 2007. • Gerhard Jäger, Reinhard Kahle, Thomas Studer: Universes in explicit mathematics. Annals of Pure and Applied Logic, 109(3),141-162, 2001.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* sowie *Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Grundkenntnisse in mathematischer Logik.
Modul-verantwortliche	Reinhard Kahle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-55-70	**Modultitel:** Ausgewählte Kapitel der Funktionalanalysis		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	6		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		

Modulinhalt

Inhalte:
Eine Auswahl aus den folgenden Themengebieten wird behandelt werden:

- Topologische Vektorräume und Dualitätstheorie.
- (LB)- und (LF)-Räume und Distributionen.
- Kompaktheitsbegriffe (Satz von Eberlein, Banach-Alaoglu, Krein-Milman, Smulian).
- Sätze aus der Topologie (Tietze, Urysohn, Stone-Cech) und deren Anwendungen in der Funktionalanalysis.
- Uniforme Räume.

Qualifikationsziele

Die Studierenden sind mit den Grundbegriffen topologischer Vektorräume vertraut und haben gelernt, deren Methoden und Ergebnisse auf konkrete Beispiele aus dem Umfeld der Funktionalanalysis anzuwenden, etwa auf die Theorie der Distributionen. Sie haben dabei vielfältige Querverbindungen zu anderen Teilen der Mathematik, etwa der Maßtheorie oder der Topologie erkannt und verstanden. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Ausgewählte Kapitel der Funktionalanalysis	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Gerald Folland: Real Analysis. Wiley 1999. • Helmut H. Schäfer: Topological Vector Spaces. Springer 1999. • Volker Runde: A Taste of Topology. Springer 2005. • Gert K. Pedersen: Analysis Now. Springer 1989. • Paul R. Halmos: Measure Theory. Springer 1950.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Funktionalanalysis werden vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Ulrich Groh, Rainer Nagel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-55-71</td><td colspan="2">Modultitel:
Operatoralgebren und ihre Anwendungen in Statistischer Mechanik</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">6</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
180 h</td><td>Kontaktzeit:
60 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 3 SWS + Übung 1 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Grundlagen zu Operatoralgebren (C*-Algebren, algebraische Zustände, induktive Grenzen).
Einführung in die algebraische Deformationsquantisierung (allgemeiner Aufbau, kohärente Zustände, Beispiele).
Anwendungen auf den klassischen Grenzwert der Quantenmechanik und statistischen Mechanik einschließlich asymptotischer Emergenz (Phasenübergänge, große Abweichungen (Entropie), spontane Symmetriebrüche).</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden haben vertiefte Kenntnisse in Auswahlfragen der algebraischen Quantentheorie mit Schwerpunkt auf der algebraischen Deformationsquantisierung und deren Anwendungen auf die klassische Grenze der Quantenmechanik und der statistischen Mechanik erworben. Sie haben algebraische Techniken gelernt, um abstrakte Strukturen zu entwickeln, die die Eigenschaften einer physikalischen Theorie kodieren. Sie sind mit Techniken vertraut, um Existenzresultate von Grenzwerten von durch algebraische Zustände kodierten Sequenzen/Netzen zu beweisen, diese zu untersuchen und in eine allgemeine Perspektive zu stellen. Darüber hinaus verstehen sie die physikalische Relevanz der Ergebnisse und sind in der Lage, diese mit Merkmalen der Gleichgewichtsthermodynamik, wie Phasenübergängen und spontanen Symmetriebrechungen, in Beziehung zu setzen. Sie sind in der Lage, den aktuellen Stand der Forschung auf dem jeweiligen Gebiet zu beschreiben. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
</table>

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
	Operatoralgebren und ihre Anwendungen in Statistischer Mechanik	V	f	3	4,5	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
		Ü	f	1	1,5					
	In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.									
Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Klaas Landsman: Foundations of Quantum Theory, From Classical Concepts to Operator Algebras. Springer 2017.									
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie*, *Mathematische Physik* und *Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.									
Teilnahmevoraussetzungen	Grundlegende Kenntnisse in Funktionalanalysis und C*-Algebren sowie in Thermodynamik werden vorausgesetzt.									
Modulverantwortliche	Andreas Prohl									

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-60-01</td><td colspan="2">Modultitel:
Geometrische Evolutionsgleichungen</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">3</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
90 h</td><td>Kontaktzeit:
30 h</td><td>Selbststudium:
60 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Beispiele geometrischer Evolutionsgleichungen wie Mean curvature flow, Ricci flow, Inverse mean curvature flow.
Parabolische Maximumsprinzipien.
Regularitätstheorie für parabolische Evolutionsgleichungen.
Reskalierungstechniken und Beschreibung von Singularitäten.
Asymptotisches Verhalten von Lösungen.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden lernen, ihre Kenntnisse in Differentialgeometrie und partiellen Differentialgleichungen zu verknüpfen und auf konkrete Problemstellungen bei ausgewählten geometrischen Evolutionsgleichungen anzuwenden. Sie erlernen Techniken für die Kontrolle von Lösungen nichtlinearer Evolutionsgleichungen, die ihnen den Beginn eines ersten eigenen Forschungsprojektes ermöglicht, etwa im Rahmen einer Masterarbeit, oder im Hinblick auf eine Promotion. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3"><table><tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr><tr><td>Geometrische Evolutionsgleichungen</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td>nein</td><td>K o. mP</td><td>90-180 o. 20-30</td><td>b</td><td>100</td></tr></table>Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="3">Das Modul gehört zum Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten Studienschwerpunkt, Vertiefungswissen Mathematik oder Freier Wahlbereich einbringbar.
In Kombination mit einem der Module Numerik instationärer Differentialgleichungen oder Numerik von Differentialgleichungen auf Oberflächen ist es im Studienschwerpunkt Numerische Mathematik und Optimierung einbringbar.</td></tr>
</table>

Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Einführung in die partiellen Differentialgleichungen sowie Grundlegende Kenntnisse in Differentialgeometrie sind erforderlich.
Modul-verantwortliche	Gerhard Huisken

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-60-02	**Modultitel:** Geometrische Variationsprobleme		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Beispiele geometrischer Variationsprobleme wie Minimalflächen, Kapillarflächen, Harmonische Abbildungen und zugehöriger Randwertprobleme. • Direkte Methoden der Variationsrechnung. • Regularitätstheorie für Lösungen von Variationsproblemen. • Zusammenhang zwischen Variationsproblemen und Partiellen Differentialgleichungen. • Stabilitätseigenschaften von Lösungen.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden lernen, ihre Kenntnissen in Differentialgeometrie und Analysis zu verknüpfen und auf konkrete Problemstellungen bei ausgewählten geometrischen Variationsproblemen anzuwenden. Sie erlernen Techniken zum Nachweis von Lösungen zu verschiedenen Variationsproblemen und zur Untersuchung der Eigenschaften von Lösungen, die eine Grundlage zum selbständigen wissenschaftlichen Arbeiten legen, etwa in einer Masterarbeit. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Geometrische Variationsprobleme	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Analysis und Differentialgeometrie*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Einführung in die partiellen Differentialgleichungen sowie grundlegende Kenntnisse in Differentialgeometrie sind erforderlich.
Modul-verantwortliche	Carla Cederbaum, Gerhard Huisken

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-60-03</td><td colspan="2">Modultitel:
Topics in Mathematical Relativity</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">3</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
90 h</td><td>Kontaktzeit:
30 h</td><td>Selbststudium:
60 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">regelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Auswahl konkreter Modellbildungen der Mathematischen Relativitätstheorie, wie z. B. Schwarze Löcher, Statische Metriken, Physikalische Invarianten isolierter Systeme, Positivitätsabschätzungen für Energie und Masse.
Geometrische und analytische Struktur der Modelle, Existenz und Eigenschaften von konkreten Modellen als Lösungen der Einstein-Gleichungen.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden erwerben vertiefte Kenntnisse zu ausgewählten Fragestellungen der Mathematischen Relativitätstheorie. Sie erlernen analytische und geometrische Techniken zum Nachweis und zur Untersuchung von Lösungen der Einstein-Gleichungen und können die physikalische Relevanz der mathematischen Ergebnisse einordnen. Die Studierenden werden durch die Vorlesung hingeführt zum ersten selbständigen wissenschaftlichen Arbeiten, etwa in einer Masterarbeit. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3"><table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td>Topics in Mathematical Relativity</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td>nein</td><td>K o. mP</td><td>90-180
o. 20-30</td><td>b</td><td>100</td></tr>
</table>
Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="3">Das Modul gehört zu den Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie und Mathematische Physik. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten Studienschwerpunkt, Vertiefungswissen Mathematik oder Freier Wahlbereich einbringbar.</td></tr>
<tr><td>Teilnahme-voraussetzungen</td><td colspan="3">Die Module Mathematical Relativity und Einführung in partielle Differentialgleichungen werden inhaltlich vorausgesetzt.</td></tr>
<tr><td>Modul-verantwortliche</td><td colspan="3">Carla Cederbaum, Gerhard Huisken</td></tr>
</table>

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-60-04</td><td colspan="2">Modultitel:
Raumartige Hyperflächen in Lorentz-Mannigfaltigkeiten</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">6</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
180 h</td><td>Kontaktzeit:
60 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte: Raumartige Hyperflächen in Lorentz-Mannigfaltigkeiten spielen eine entscheidende Rolle im Studium von Lösungen der Einstein-Gleichung, die einige Phänomene der Allgemeinen Relativitätstheorie modelliert. Es wird untersucht, wie die geometrische Wahl von raumartigen Hyperflächen, wie maximalen Flächen, konstanten mittleren Krümmungsflächen oder Lösungen zum mittleren Krümmungsfluss oder zum inversen mittleren Krümmungsfluss, genutzt werden können, um eine Spaltung von Raum und Zeit zu erreichen, die sowohl geeignet ist für das Studium isolierter Gravitationssysteme als auch für das Studium der kosmologischen Raumzeit.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden erwerben vertiefte Kenntnisse zu ausgewählten Fragestellungen der Mathematischen Relativitätstheorie. Sie erlernen analytische und geometrische Techniken zum Nachweis und zur Untersuchung von Lösungen der Einstein Gleichungen und können die physikalische Relevanz der mathematischen Ergebnisse einordnen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Raumartige Hyperflächen in Lorentz-Mannigfaltigkeiten</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Barrett O'Neill: Semi-Riemannian Geometry - With applications to Relativity. Academic Press 1983. • Andrejs E. Treibergs: Entire space-like hypersurfaces of constant mean curvature in Minkowski space. Inventiones Math. 66, (1982) 39–56. • Klaus Ecker, Gerhard Huisken: Parabolic methods for the construction of spacelike slices of prescribed mean curvature in cosmological spacetimes. Comm. Math. Phys. 135 (1991), 595–613. • Helmut Friedrich, Alan Rendall: The Cauchy Problem for the Einstein Equations. In: Schmidt B.G. (eds) Einstein's Field Equations and Their Physical Implications. Lecture Notes in Physics, vol 540. Springer 1999. • Hans Ringström: The Cauchy Problem in General Relativity. European Math. Society 2009.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich werden Kenntnisse aus dem Modul Mathematische Relativitätstheorie vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Gerhard Huisken

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-60-05	**Modultitel:** Grenzwerte von Räumen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	6		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 3 SWS + Übung 1 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Grundlegende Konzepte der metrischen Geometry, u.a. Geodäten, Dopplungseigenschaft und Hausdorffmaß. • Verallgemeinerte Krümmungsschranken im Sinne von Alexandrov und Busemann. • Gromov-Hausdorff- und Utrakonvergenz. • Gromovs Präkompaktheitssatz und Stabilitätssätze.		
Qualifikationsziele	Die Studierende verallgemeinern Ihre Kenntnisse der Analysis zu und sind in der Lage, sie auf konkrete Problemstellungen in der metrischen Geometrie anzuwenden. Sie erarbeiten sich verschiedene Grenzwertbegriffe und können einschätzen, welche Eigenschaften im Grenzwertprozess erhalten bleiben. Die Studierenden sind mit synthetischen und anschaulichen Krümmungsbegriffen vertraut, die ein besseres Verständnis der Krümmungsbegriffe der Differentialgeometrie und der Allgemeinen Relativitätstheorie ermöglichen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Grenzwerte von Räumen	V	f	3	4,5	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	1	1,5					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Jeff Cheeger, David Ebin: Comparison Theorems in Riemannian Geometry. AMS 1975. • Dimitri Burago, Yuri Burago, Sergei Ivano: A Course in Metric Geometry. AMS 2001. • Mikhail Gromov: Metric Structures for Riemannian and Non-Riemannian Spaces. Springer 2007.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Grundkenntnisse der Analysis und der Maßtheorie werden vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Carla Cederbaum, Gerhard Huisken

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-60-06</td><td colspan="2">Modultitel:
Der Ricci-Fluss Riemannscher Metriken</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">6</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
180 h</td><td>Kontaktzeit:
60 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Die Vorlesung führt ein in die grundlegenden Eigenschaften des Ricci-Flusses und entwickelt die notwendigen Techniken, z.B. Tensor-Maximumprinzipien und Regularitäts-Abschätzungen. Es werden die Langzeit-Existenz von Lösungen und resultierende Klassifikationen für Metriken positiver Krümmung dargestellt. Schließlich wird die Monotonie von Funktionalen nach Perelman hergeleitet und für die Klassifikation möglicher Singularitäten benutzt, mit einem Ausblick auf die Chirurgie-Methoden von Hamilton und Perelman, die zum Beweis der Poincaré- und Geometrisierungsvermutungen geführt haben.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden haben grundlegende Methoden für die Behandlung geometrischer Evolutionsgleichungen in der Riemannschen Geometrie erlernt. Gleichzeitig haben sie das Zusammenspiel lokaler geometrischer Annahmen an die Krümmungseigenschaften einer Metrik mit analytischen Techniken für die Untersuchung parabolischer Gleichungen erlebt und haben gelernt und verstanden, wie aus den lokalen Annahmen globale Konsequenzen für die Geometrie und Topologie der zugrunde liegenden Mannigfaltigkeiten folgen. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Der Ricci-Fluss Riemannscher Metriken</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="2">nein</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180 o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>ü</td><td>o</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt. – Das Modul kann vom ausnahmsweise Dozenten auch ohne Übungen angeboten werden; in diesem Fall werden für das Modul statt 6 nur 3 Leistungspunkte vergeben.</td></tr>
<tr><td>Literatur</td><td colspan="3">Exemplarische Literatur:
Simon Brendle: Ricci-flow and the sphere theorem. AMS 2010.
Peter Topping: Lectures on the Ricci-Flow. Lecture Notes 2006.
Richard Hamilton: Riemannian 3-manifolds with positive Ricci curvature. J. Diff. Geom. 17, 1982.</td></tr>
</table>

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunkts gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Einführung in die partiellen Differentialgleichungen sowie grundlegende Kenntnisse in Differentialgeometrie sind erforderlich.
Modulverantwortliche	Carla Cederbaum, Gerhard Huisken

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-60-07	**Modultitel:** Special Relativity		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Herleitung der Minkowski Metrik aus grundlegenden physikalischen Annahmen. • Physikalische Konsequenzen der Relativität wie die Länge der Kontraktion, Zeit Dilatation und einige beliebte Paradoxa.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die Herleitung der Speziellen Relativitätstheorie und wichtige Konzepte wie Längenkontraktion und Zeitdilatation kennen gelernt und verstanden. Sie sind mit wichtigen sich ergebenden Paradoxa vertraut. Die Studierenden haben eine Intuition für verschiedene Aspekte der Relativitätstheorie entwickelt. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Special Relativity	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Albert Einstein: Relativity: the special and general theory. Public domain 1920. • Thomas A. Moore: Six ideas that shaped physics: unit R. McGraw-Hill 2003. • Robert Resnick: Introduction to Special Relativity. Wiley 2007. • Bernard Schutz: A First Course in General Relativity. Cambridge University Press 2009.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.

Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Einführung in die partiellen Differentialgleichungen sowie grundlegende Kenntnisse in Differentialgeometrie sind erforderlich.
Modul-verantwortliche	Carla Cederbaum, Gerhard Huisken

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-60-08**	**Modultitel:** Nullgeometrie in allgemeiner Relativitätstheorie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	5		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 150 h	Kontaktzeit: 45 h	Selbststudium: 105 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Dieses Modul bietet eine Einführung in die Nullgeometrie. Themen sind dabei die Eigenschaften von lichtartigen Vektorfeldern und Kurven, sowie die Geometrie von lichtartigen Hyperflächen, die eine degenerierte, induzierte Metrik tragen. Ein weiteres größeres Thema stellt die extrinsische Krümmung von raumartigen Flächen in höherer Kodimension dar, welche insbesondere entlang von lichtartigen Hyperflächen betrachtet werden. Optional können zusätzlich geometrische Flüsse entlang von lichtartigen Hyperflächen behandelt werden.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden kennen und verstehen die genannten Begriffe und Methoden und können mit ihrer Hilfe bekannte und neue Fragestellungen aus der Nullgeometrie analysieren. Weiterhin verknüpfen sie physikalische Fragestellungen der Kosmologie und Astrophysik und ihre mathematische Modellierung durch differentialgeometrische Methoden und sind in der Lage, die Relevanz und Adäquatheit der mathematischen Modellierung und der aus ihr abgeleiteten mathematischen Resultate zu hinterfragen. Dabei bauen sie insbesondere die im Modul MAT-65-11 erlernten Methoden aus und vernetzen ihr Methoden- und Fachwissen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Nullgeometrie in allgemeiner Relativitätstheorie	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	ü	f	1	2					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt. – Das Modul kann vom ausnahmsweise Dozenten auch ohne Übungen angeboten werden; in diesem Fall werden für das Modul statt 5 nur 3 Leistungspunkte vergeben.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Barrett O'Neill: Semi-Riemannian Geometry. Academic Press 1983. • Johannes Sauter: Foliations of Null hypersurfaces and the Penrose Inequality. Dissertation (ETH Zürich), url: https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/150826.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* sowie *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Inhaltlich wird das Modul Geometry in Physics vorausgesetzt.
Modulverantwortliche	Carla Cederbaum

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-60-09</td><td colspan="2">Modultitel:
The Einstein Constraint Equations</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">6</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
180 h</td><td>Kontaktzeit:
60 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Introduction to GR and the Einstein equations:
– The Einstein equations, special solutions and geometric constructions;
– The Cauchy problem for the Einstein equations.
• The constraint equations and the conformal method:
– The conformal method;
– Review of elliptic theory on closed manifolds;
– Constant mean curvature classification on closed manifolds.
• Asymptotically Euclidean (AE) initial data:
– AE manifolds and elliptic operators;
– Constructions of AE initial data sets.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden können mittels konformer Methoden die Einsteinschen Zwangsbedingungen in ein System elliptischer partieller Differentialgleichungen transformieren und so Teile der Lösungsräume der Einsteingleichungen beschreiben und Eigenschaften der zugehörigen Lösungen analysieren. Sie haben Verbindungen der Theorie zu Fragestellungen der Geometrischen Analysis wie die skalare Krümmungsvorgabe und das Yambe-Problem kennen gelernt und sind mit dem Zusammenspiel von Methoden der Riemannschen Geometrie, der Geometrischen Analysis und der Physik zur Beantwortung von Fragen der Allgemeinen Relativitätstheorie vertraut. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
</table>

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
	The Einstein Constraint Equations	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
		Ü	f	2	3					
	In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt. – Das Modul kann vom Dozenten ausnahmsweise auch ohne Übungen angeboten werden; in diesem Fall werden für das Modul statt 5 nur 3 Leistungspunkte vergeben.									
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* sowie *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.									
Teilnahmevoraussetzungen	Es werden Grundkenntnisse in Differentialgeometrie und Riemannscher Geometrie vorausgesetzt. Vorkenntnisse über partielle Differentialgleichungen sind von Vorteil, aber nicht unbedingt erforderlich. Auch Vorkenntnisse über die allgemeine Relativitätstheorie sind nützlich, aber die notwendigen Begrifflichkeiten werden auch in der Vorlesung behandelt.									
Modulverantwortliche	Carla Cederbaum									

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-60-10</td><td colspan="2">Modultitel:
Ausgewählte Themen zu Evolutionsgleichungen für Untermannigfaltigkeiten (mit Übungen)</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">6</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
180 h</td><td>Kontaktzeit:
60 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Die Studierenden lernen neuere Ergebnisse aus der Theorie von geometrischen Evolutionsgleichungen kennen, mit denen Kurven, Hyperflächen und andere Untermannigfaltigkeiten eines ambienten Raumes deformiert werden. Beispiele sind der Fluss von Hyperflächen entlang der mittleren Krümmung oder Flüsse mit anderen geometrisch definierten Geschwindigkeiten.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden haben Techniken für die Kontrolle von Lösungen nichtlinearer parabolischer Evolutionsgleichungen erlernt, die ihnen den Beginn eines ersten eigenen Forschungsprojektes ermöglichen, etwa im Rahmen einer Masterarbeit, oder im Hinblick auf eine Promotion. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbstständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Special Topics in Evolution Equations for Submanifolds</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Literatur</td><td colspan="3">Exemplarische Literatur:
• Klaus Ecker: Regularity theory for mean curvature flow. Birkhäuser 2004.</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="3">Das Modul gehört zu den Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie und Mathematische Physik. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten Studienschwerpunkt, Vertiefungswissen Mathematik oder Freier Wahlbereich einbringbar.</td></tr>
</table>

Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Einführung in die partiellen Differentialgleichungen sowie Grundlegende Kenntnisse in Differentialgeometrie sind erforderlich.
Modul-verantwortliche	Gerhard Huisken

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-60-11</td><td colspan="2">Modultitel:
Ausgewählte Themen zu Evolutionsgleichungen für Untermannigfaltigkeiten (ohne Übungen)</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">6</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
180 h</td><td>Kontaktzeit:
60 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Die Studierenden lernen neuere Ergebnisse aus der Theorie von geometrischen Evolutionsgleichungen kennen, mit denen Kurven, Hyperflächen und andere Untermannigfaltigkeiten eines ambienten Raumes deformiert werden. Beispiele sind der Fluss von Hyperflächen entlang der mittleren Krümmung oder Flüsse mit anderen geometrisch definierten Geschwindigkeiten.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden haben Techniken für die Kontrolle von Lösungen nichtlinearer parabolischer Evolutionsgleichungen erlernt, die ihnen den Beginn eines ersten eigenen Forschungsprojektes ermöglichen, etwa im Rahmen einer Masterarbeit, oder im Hinblick auf eine Promotion. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td>Special Topics in Evolution Equations for Submanifolds</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td>nein</td><td>K o. mP</td><td>90-180 o. 20-30</td><td>b</td><td>100</td></tr>
</table>
Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Literatur</td><td colspan="3">Exemplarische Literatur:
• Klaus Ecker: Regularity theory for mean curvature flow. Birkhäuser 2004.</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="3">Das Modul gehört zu den Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie und Mathematische Physik. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten Studienschwerpunkt, Vertiefungswissen Mathematik oder Freier Wahlbereich einbringbar.</td></tr>
<tr><td>Teilnahme-voraussetzungen</td><td colspan="3">Kenntnisse aus dem Modul Einführung in die partiellen Differentialgleichungen sowie Grundlegende Kenntnisse in Differentialgeometrie sind erforderlich.</td></tr>
<tr><td>Modul-verantwortliche</td><td colspan="3">Gerhard Huisken</td></tr>
</table>

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-60-30</td><td colspan="2">Modultitel:
Gravitational Collapse and Singularities in General Relativity</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">3</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
90 h</td><td>Kontaktzeit:
30 h</td><td>Selbststudium:
60 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Content:
The course is divided into three parts: First, we will study the causal structure of spacetime in general relativity, the causal hierarchy and various theorems related to causality. Then we will study singularities and the celebrated singularity theorems by Penrose and Hawking. And finally we will study Penrose's cosmic censorship conjecture, some properties of black holes, the phenomenon of gravitational collapse, which is the reason for the formation of singularities, and some examples of gravitational collapse that apparently does not obey the cosmic censorship conjecture. The content is as follows:
Causality theory:
Time orientation, causal hierarchy, global hyperbolicity.
Singularities:
Raychoudhuri's equations, conjugate points, singularity theorems.
Black holes:
Cosmic censorship, properties of black holes, naked singularities.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Students have acquired in-depth knowledge of causality theory and singularity theorems in general relativity. They will learn to apply topological methods in causality theory and in proving singularity theorems. They will also get an overview of cosmic censorship conjecture and naked singularities. They are able to name and prove the main statements of the lecture as well as categorise and explain the relationships presented. Students will be able to reproduce and critically scrutinise the current state of research in the specialist area addressed.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td>Gravitational Collapse and Singularities in General Relativity</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td>nein</td><td>K o. mP</td><td>90-180 o. 20-30</td><td>b</td><td>100</td></tr>
</table>
Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Robert M. Wald: General Relativity. The University of Chicago Press 1984. • Stephen W. Hawking and George F. R. Ellis: The large scale structure of spacetime. Cambridge Monographs on Mathematical Physics 1973. • Pankaj S. Joshi: Gravitational collapse and spacetime singularities. Cambridge University Press 2007. • Barret O'Neill: Semi-Riemannian Geometry with applications to relativity. Academic Press 1983.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Basic knowledge of relativity is required to follow the course.
Modulverantwortliche	Carla Cederbaum, Gerhard Huisken

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-60-35</td><td colspan="2">Modultitel:
Nichtlineare elliptische und parabolische partielle Differentialgleichungen</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">6</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
180 h</td><td>Kontaktzeit:
60 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Semilineare und quasilineare elliptische und parabolische partielle Differentialgleichungen;
Minimalflächenoperator und Flächen vorgeschriebener mittlerer Krümmung;
Parabolische geometrische Gleichungen, z.B. Fluss entlang der mittleren Krümmung;
Hölder-Stetigkeit nach De Giorgi und Nash;
Innere Regularität und Randregularität von Lösungen.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden haben analytische Methoden erlernt, die zentral sind für die Behandlung nichtlinearer partieller Differentialgleichungen zweiter Ordnung vom elliptischen und parabolischen Typus. Anhand konkreter Beispiele partieller Differentialgleichungen der Mathematischen Physik und der Differentialgeometrie wurden Techniken erlernt, um Existenz und Regularität von Lösungen solcher Gleichungen zu beweisen. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben die Studierenden Sicherheit im technischen Umgang mit den erlernten Methoden erworben und können sie selbstständig auf andere Problemstellungen anwenden. Sie sind in der Lage, ihre Problemlösungen zu präsentieren und an Diskursen zu Problemen dieses Forschungsgebietes teilzunehmen.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Nichtlineare elliptische und parabolische partielle Differentialgleichungen</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Lawrence C. Evans, Partial Differential Equations: Chapters on Sobolev Spaces and elliptic PDEs. AMS 1998. • Gary Lieberman: Second order parabolic differential equations. World Scientific 1996. • Fritz John: Introduction to Partial Differential Equations. Springer 1982. • Jürgen Jost: Partielle Differentialgleichungen. Springer 1998. • David Kinderlehrer, Guido Stampacchia: An introduction to variational inequalities and their applications, Pure and Applied Mathematics, Vol. 88. Academic Press 1980.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Inhaltlich wird das Modul Einführung in die Partiellen Differentialgleichungen vorausgesetzt.
Modulverantwortliche	Gerhard Huisken

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-60-36**	**Modultitel:** Voll nichtlineare elliptische und parabolische partielle Differentialgleichungen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Die Vorlesung untersucht stark nicht-lineare elliptische und parabolische partielle Differentialgleichungen zweiter Ordnung. Klassische Beispiele sind die Monge-Ampère Gleichung, die Gleichung vorgeschriebener Gauß-Krümmung und allgemeiner Gleichungen, bei denen skalare Invarianten der Krümmung einer Hyperfläche vorgeschrieben werden. Auch in Problemen der stochastischen Kontrolltheorie und in der Theorie des Optimal Transport treten Gleichungen von diesem Typus auf. Die Vorlesung beschreibt grundlegende Techniken für die Lösung der zugehörigen Dirichlet- und Neumann-Randwertprobleme. Insbesondere werden die notwendigen a priori Abschätzungen für Lösungen untersucht.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben analytische Methoden erlernt, die zentral sind für die Behandlung stark nichtlinearer partieller Differentialgleichungen zweiter Ordnung vom elliptischen und parabolischen Typus. Anhand konkreter Beispiele solcher Differentialgleichungen wurden Techniken erlernt, um Existenz und Regularität von Lösungen solcher Gleichungen und der zugehörigen Randwertprobleme zu beweisen. Die Studierenden können die erlernten Methoden selbständig auf andere Problemstellungen und verwandte Gleichungen anwenden. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben die Studierenden Sicherheit im technischen Umgang mit den erlernten Methoden erworben und können sie selbständig auf andere Problemstellungen anwenden. Sie sind in der Lage, ihre Problemlösungen zu präsentieren und an Diskursen zu Problemen dieses Forschungsgebietes teilzunehmen.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Voll nichtlineare elliptische und parabolische partielle Differentialgleichungen	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • David Gilbarg, Neil S. Trudinger: Elliptic partial differential equations of second order. Springer 2001. • Lawrence C. Evans, Partial Differential Equations: Chapters on Sobolev Spaces and elliptc PDEs. AMS 1998. • Gary Lieberman: Second order parabolic differential equations. World Scientific 1996. • Ilya J. Bakelman: Convex functions and nonlinear geometric elliptic equations. Springer 1994. • Luis Caffarelli, Xavier Cabrè: Fully nonlinear elliptic equations. AMS 1995.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar. Das Modul kann wegen zu großer inhaltlicher Überschneidungen nicht zusammen mit dem Modul MAT-55-27 Voll-nichtlineare elliptische Gleichungen eingebracht werden.
Teilnahme-voraussetzungen	Zumindest eine Vorlesung zu partiellen Differentialgleichungen, Basiswissen in Differentialgeometrie.
Modul-verantwortliche	Gerhard Huisken

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-65-05</td><td colspan="2">Modultitel:
Groups and Representations</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Gruppen: Untergruppen, Homomorphismen, Isomorphismen, Gruppenoperationen, Bahnen, Stabilisatoren, Äquivalenzklassen, Normalteiler, Restklassen, Faktorgruppen.
Darstellungen: Treue, unitäre und irreduzible Darstellungen, Reduzibilität, Charaktere, Schurs Lemmata, Orthogonalität irreduzibler Darstellungen.
Anwendungen: Symmetrien und Degenerationen in der Quantenmechanik, Auswahlregeln.
Darstellungen endlicher Gruppen: Gruppenalgebra, reguläre Darstellung, Ideale, Idempotente.
Symmmetrische Gruppen: Young-Tableaus, Young-Operatoren, Dimension und Charaktere.
Anwendungen: Identische Teilchen in Quantentheorien.
Lie-Gruppen: Haar-Maße, Darstellungen, Lie-Algebren.
Tensordarstellungen klassischer Gruppen: Symmetrieklassen, Young-Tableaus.
Anwendungen: SU(2) und SU(3) in der Teilchenphysik (Spin, Isospin, Flavour).
Zudem eine Auswahl aus dem Folgenden:
Irreduzible Darstellung der Lorentz und Poincare Gruppen;
Anwendungen: Begriff der Teilchen in Quantentheorien;
Wurzeln und Gewichte, Killing-Cartan-Klassifikation halbeinfacher Lie-Algebren.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden kennen die grundlegenden Konzepte der Gruppen- und Darstellungstheorie. Sie sind in der Lage, diese abstrakten algebraischen Begriffsbildungen neu im Kontext der theoretischen Physik anzuwenden und entwickeln so ein vertieftes Verständnis für die Zusammenhänge der Mathematik und Physik. Die Studierenden sind vertraut mit einer Vielzahl komplexer Beispiele für Anwendungen der Darstellungstheorie von Gruppen in der Physik. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
</table>

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Groups and Representations	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur

Exemplarische Literatur:

- Irene Verona Schensted: A course on the Application of Group Theory to Quantum Mechanics. NEO Press 1976.
- Barry Simon: Representations of Finite and Compact Groups. AMS 1996.
- Wu-Ki Tung: Group Theory and Physics. World Scientific 1985.

Verwendbarkeit

Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Das Modul kann wegen der großen inhaltlichen Überschneidungen nicht zusammen mit dem Modul 'Darstellungstheorie endlicher Gruppen' eingebracht werden.

Teilnahmevoraussetzungen

Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.

Modulverantwortliche

Stefan Keppeler

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-65-31	**Modultitel:** Mathematical Methods for Condensed Matter Physics		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	6		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** The course provides an introduction, with an analytic perspective, to the basic mathematical tools necessary to have a deeper understanding of the mathematical theories of topological insulators. In particular, the course will cover the following topics: • Direct integral of Hilbert spaces. • Stability theorems for relatively bounded perturbations. • Bloch-Floquet transform and its application to periodic Schrödinger operators. • Introduction to the theory of vector bundles and Chern classes. • Definition of Bloch bundle.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden kennen, verstehen und sind vertraut mit den Begriffen der Vorlesung. Sie haben insbesondere ein tieferes Verständnis dafür entwickelt, wie mathematische Begriffe in natürlicher Weise in der Festkörperphysik angewandt werden. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Mathematical Methods for Condensed Matter Physics	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Inhaltlich werden Kenntnisse aus den Grundvorlesungen der ersten beiden Studienjahre des B.Sc. Mathematik.
Modulverantwortliche	Stefan Teufel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-65-32	**Modultitel:** Mathematical Aspects of the Quantum Hall Effect		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	6		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		

Modulinhalt

Inhalte: The course is focused on the description of mathematical models for the quantum Hall effect. In particular, the course will cover the following topics:

- Review of the classical Hall effect and historical introduction on the quantum Hall effect.
- Analysis of the Landau Hamiltonian and of the geometry of the Landau levels.
- Linear response theory and derivation of the Kubo formula.
- Wannier functions and their relations to the Hall conductivity.
- Magnetic perturbations and Streda formula.

Qualifikationsziele

The students have learned, understood, and become familiar with the concepts explained in the lectures. In particular, they have developed a deep understanding of the mathematical aspects of the quantum Hall effect. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Mathematical Aspects of the Quantum Hall Effect	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	It is strongly recommended that the students have attended the course mathematical methods for condensed matter physics.
Modul-verantwortliche	Stefan Teufel

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-65-33**	**Modultitel:** Wellengleichungen der Relativistischen Quantenmechanik		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	6		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Klein-Gordon-Gleichung. • Diracgleichung. • Darstellungstheorie der Lorentzgruppe. • Relativistische Vielteilchensysteme (Multi-time Formalismus).		
Qualifikationsziele	Die Studierenden erwerben vertiefte Kenntnisse über Wellengleichungen in der relativistischen Quantenmechanik. Sie erlernen analytische Techniken zum Nachweis und zur Untersuchung von Lösungen der Klein-Gordon-Gleichung und der Diracgleichung und können die physikalische Relevanz der mathematischen Ergebnisse einordnen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Wellengleichungen der Relativistischen Quantenmechanik	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Bernd Thaller: The Dirac equation. Springer 1992. • Silvan S. Schweber: An introduction to relativistic quantum field theory, Chap. 2-4. Dover Books 2005. • Paul R. Garabedian: Partial differential equations. AMS 1998. • Erich Zauderer: Partial differential equations of applied mathematics. Wiley 2006.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Inhaltlich werden Kenntnisse in Quantenmechanik und Spezieller Relativitätstheorie vorausgesetzt. Zudem sind Grundkenntnisse in Funktionalanalysis und Partiellen Differentialgleichungen hilfreich, aber nicht zwingend erforderlich.
Modulverantwortliche	Roderich Tumulka

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-65-36	**Modultitel:** Quantum Information Theory		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Grundlegende Begriffe über den universellen Quantencomputer: Quantengatter, Quantenschaltungen, Universalität und Messungen. • Quantenalgorithmen: Deutsch-Jozsa, Shor und Grover. • Quantenkommunikation: No-Cloning-Theorem, Quantenteleportation und superdichte Kodierung. Quantenschlüsselverteilung. • Physikalische Realisierungen: DiVincenzo-Kriterien, Cirac-Zoller-Quantencomputer, Circuit QED. • Dekohärenz und offene Quantensysteme. • Quanten-Fehlerkorrektur. Fehlertolerante Quanteninformatik. • Alternative Modelle der Quanteninformatik: Adiabatische Quantenberechnung. • Einführung in die Theorie der Verschränkung: Definition, Kriterien und Messung der Verschränkung, mehrteilige Verschränkung.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden sind mit den grundlegenden Konzepten und theoretischen Werkzeugen der Quanteninformationsverarbeitung vertraut. Sie verstehen das Konzept von Quantenalgorithmen und Quantenschaltungen und haben gelernt, einen Quantencomputer zu programmieren. Sie verstehen die Funktionsweise wichtiger Quantenalgorithmen und können Quantenkanäle beschreiben. Sie kennen die Prinzipien der Quantenfehlerkorrektur und der Verschränkungstheorie und verstehen auch die fortgeschrittensten Konzepte der physikalischen Realisierungen von Quantencomputern. Sie sind zudem in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
	Quantum Information Theory	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
		ü	f	2	3					
	In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.									
Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Michael A. Nielsen, Isaac L. Chuang: Quantum Computation and Quantum Information. http://mmrc.amss.cas.cn/tlb/201702/W020170224608149940643.pdf • Ronald de Wolf: Quantum Computing: Lecture Notes. https://homepages.cwi.nl/~rdewolf/qcnotes.pdf • John Preskill: Quantum Computation. Lecture Notes. http://theory.caltech.edu/~preskill/ph219/index.html									
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.									
Teilnahmevoraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.									
Modulverantwortliche	Angela Capel Cuevas									

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-65-37**	**Modultitel:** Matrixanalyse und Anwendungen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	6		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 3 SWS + Übung 1 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Grundlagen der Operatoren und Matrizen: Quadratische Matrizen und Tensorprodukte. • Abbildungen und Algebren. • Positive Matrizen. • Funktionskalkül und Ableitungen. • Monotone Matrixfunktionen und Konvexität. • Matrixmittel und Ungleichungen. • Anwendungen in der Quanteninformationstheorie.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben vertiefte Kenntnisse über die Matrixanalyse aus der Sicht der Funktionalanalysis erworben. Sie haben einige Aspekte der Analysis im Zusammenhang mit Matrizen kennengelernt, darunter Themen wie monotone Matrixfunktionen, Matrixmittelwerte, Majorisierung, Entropien, Quanten-Markov-Tripletts, usw. Zudem sind sie mit mehreren typischen Anwendungen der Matrixanalyse in der Quanteninformationstheorie vertraut. Sie sind zudem in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	siehe folgende Tabelle		

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Matrixanalyse und Anwendungen	V	f	3	4,5	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	1	1,5					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Fumio Hiai, Denes Petz: Introduction to Matrix Analysis and Applications. https://math.bme.hu/~petz/matrixPD.pdf • Denes Petz: Matrix Analysis with some Applications. https://math.bme.hu/~petz/matbme.pdf • Rajendra Bhatia: Matrix Analysis. Springer 1997. • Rajendra Bhatia, Positive Definite Matrices. Princeton University Press 2007.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Grundkenntnisse in Funktionalanalysis sind wünschenswert.
Modulverantwortliche	Angela Capel Cuevas

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-65-38**	**Modultitel:** Hamiltonsche Systeme		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Das Modul gibt eine Einführung in die Theorie der Hamiltonschen Systeme, wie sie in der klassischen Mechanik verwendet werden. Dies schlägt eine Brücke zwischen den Gebieten Differentialgeometrie, der symplektischen Geometrie und der dynamischen Systeme sowie der theoretischen Physik. Die Haupteckpunkte der Vorlesung sind: • Symplektische Mannigfaltigkeiten und die kanonische 1-Form des Kotangentialbündels. • Darboux-Moser Theorem. • Lagrangesche und Hamiltonsche Systeme. • Integrable Systeme und Arnold-Liouville Theorem. • Momentenabbildungen. • Symplektische Reduktion. • Symplektische Mannigfaltigkeiten und torische Wirkungen.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden sind mit der Theorie der Hamiltonschen Systeme und ihrer Untersuchung mit Methoden der symplektischen Geometrie vertraut. Sie haben dabei das Zusammenspiel von Methoden und Fragestellungen unterschiedlicher Gebiete der Mathematik (Differentialgeometrie, symplektische Geometrie, dynamische Systeme) und der theoretischen Physik kennengelernt. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)										
	Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
	Hamiltonsche Systeme	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
		Ü	f	2	3					
	In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.									

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Vladimir I. Arnold: Mathematical methods of classical mechanics. Springer 1989. • Ana Cannas da Silva: Lectures on symplectic geometry. Springer 2001.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Mathematische Physik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Inhaltlich werden Kenntnisse aus dem Modul Geometry in Physics vorausgesetzt.
Modulverantwortliche	Carla Cederbaum

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-65-39	**Modultitel:** Propagation des Chaos		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Wechselwirkende Vielteilchensysteme (quantenmechanisch sowie klassisch), Bedeutung der Korrelationen. • Mean-field Situationen (Vlasov) und Kollisionen (Boltzmann). • Explizite Behandlung der Korrelationen. • Große Abweichungen vom Erwartungswert.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden lernen, wie verschiedenartige Vielteilchensysteme durch effektive, nichtlineare Gleichungen beschrieben werden können. Sie sind in der Lage, verschiedene Arten der Konvergenz von mikroskopischen Vielteilchensystemen gegen die effektive Theorie zu unterscheiden und zu vergleichen; dies sowohl in klassischen, als auch in quantenmechanischen Situationen. Aufbauend auf einem Argument ähnlich dem Gesetz der großen Zahlen verstehen sie, wie die Unabhängigkeit der Teilchen zur effektiven Gleichung führt. Sie lernen zu beweisen, dass die Unabhängigkeit in der Tat unter der Zeitentwicklung - zumindest näherungsweise - erhalten bleibt (Propagation des Chaos). Darauf aufbauend verstehen sie verschiedene, an die jeweilige Situation angepasste Beweisstrategien. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Propagation of Chaos	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	?	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Louis-Pierre Chaintron, Antoine Diez: Propagation of chaos: a review of models, methods and applications. arXiv:2203.00446. • Francois Golse: Mean-Field Limits in Statistical Dynamics. arXiv:2201.02005.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Mathematische Physik* und *Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Neben den Grundlagen der Analysis und der Linearen Algebra wird das Modul Stochastik inhaltlich vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Peter Pickl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-70-01**	**Modultitel:** Algorithmen der Numerischen Mathematik		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Weiterführende, große Algorithmen der Numerik (ohne Differentialgleichungen), wie etwa: • Schnelle Fourier-Transformation; • QR-Algorithmus zur Berechnung von Eigenwerten; • Verfahren der konjugierten Gradienten und allgemeinere Krylov-Raumverfahren als iterative Verfahren in der numerischen Linearen Algebra und in der nichtlinearen Optimierung; • Simplex-Verfahren und Innere-Punkt-Verfahren in der linearen Optimierung.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die zentralen Begriffe, Ergebnisse und Methoden der algorithmischen Numerischen Mathematik kennengelernt. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Algorithmen der Numerischen Mathematik	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Peter Deuflhard, Andreas Hohmann: Numerische Mathematik 1. De Gruyter 2008. • Martin Hanke-Bourgeois: Grundlagen der Numerischen Mathematik und des Wissenschaftlichen Rechnens. Vieweg 2009.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Numerische Mathematik und Optimierung* . Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modulverantwortliche	Christian Lubich, Andreas Prohl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-70-02**	**Modultitel:** Numerik stationärer Differentialgleichungen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Numerische Behandlung von Randwertproblemen stationärer (d.h. zeitunabhängiger) gewöhnlicher und elliptischer partieller Differentialgleichungen, schwerpunktmäßig Verfahren der finiten Elemente.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die zentralen Begriffe, Ergebnisse und Methoden der numerischen Behandlung von Randwertproblemen stationärer Differentialgleichungen kennengelernt. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	(siehe Tabelle unten)		

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Numerik stationärer Differentialgleichungen	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Dietrich Braess: Finite Elemente. Springer Spektrum 2013. • Wolfgang Hackbusch: Theorie und Numerik elliptischer Differentialgleichungen. Teubner 1986.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Numerische Mathematik und Optimierung* . Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.

Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Algorithmen der Numerik sind hilfreich, sind aber nicht zwingend erforderlich.
Modul-verantwortliche	Christian Lubich

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-70-03**	**Modultitel:** Numerik für instationäre Differentialgleichungen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Numerische Behandlung instationärer (d.h., zeitabhängiger) Differentialgleichungen, etwa: steife gewöhnliche Differentialgleichungen, stochastische Differentialgleichungen, parabolische und hyperbolische partielle Differentialgleichungen.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die zentralen Begriffe, Ergebnisse und Methoden der numerischen Behandlung instationärer Differentialgleichungen kennengelernt. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Numerik instationärer Differentialgleichungen	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Ernst Hairer, Gerhard Wanner: Solving Ordinary Differential Equations II. Stiff Problems. Springer 1996. • Vidar Thomee: Galerkin Finite Element Methods for Parabolic Problems. Springer 1997.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Numerische Mathematik und Optimierung* . Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.

Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Numerik stationärer Differentialgleichungen sind hilfreich, sind aber nicht zwingend erforderlich.
Modul-verantwortliche	Christian Lubich

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-70-04	**Modultitel:** Gewöhnliche Differentialgleichungen - Analysis und Numerik		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		

Modulinhalt

Inhalte:

- Nichtlineare gewöhnliche Differentialgleichungen: Sätze von Hartman-Grobman und Poincare-Bendixson, Bifurkationstheorie.
- Numerische Approximation: lineare Mehrschrittverfahren, adaptive Verfahren, geometrische Integration.

Qualifikationsziele

Die Studierenden sind mit den grundlegenden Methoden zum Studium des qualitativen Verhaltens und zur Simulation von Lösungen nichtlinearer gewöhnlicher Differentialgleichungen vertraut. Sie haben konstruktive Methoden zur Lösung kennen gelernt und sind prinzipiell in der Lage, diese mit Hilfe des Computers umzusetzen. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Gewöhnliche Differentialgleichungen - Analysis und Numerik	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur

Exemplarische Literatur:

- Lawrence Perko: Differential equations and dynamical systems. Springer 1993.
- David Griffiths, Desmond J. Higham: Numerical methods for ordinary differential equations. Springer 2010.

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* sowie *Numerische Mathematik und Optimierung* . Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Grundlegende Kenntnisse zur Theorie der gewöhnlichen Differentialgleichungen sind erforderlich, wie sie etwa im Modul Algorithmen der Numerischen Mathematik vermittelt werden.
Modul-verantwortliche	Andreas Prohl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-70-05	**Modultitel:** Optimale Kontrolle mit Gewöhnlichen Differentialgleichungen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	5		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		

Modulinhalt

Inhalte:

- Ein kurzer Überblick über die Existenz- und Eindeutigkeitstheorie für ODEs.
- Numerische Lösungen für ODEs.
- Einführung in optimale Kontrollprobleme mit ODEs.
- Existenz- und Eindeutigkeitstheorie für lineare quadratische Optimalsteuerungsprobleme (LQ-Probleme).
- Pontryagins Maximumprinzip.
- Numerische Approximation von LQ-Problemen.

Qualifikationsziele

Die Studierenden sind mit den Problemstellungen der optimalen Kontrolle mittels gewöhnlicher Differentialgleichungen und verschiedenen Ansätzen zur Lösung des Problems vertraut. Sie kennen auch qualitatives Aussagen zur eindeutigen Lösbarkeit. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Optimale Kontrolltheorie mit Gewöhnlichen Differentialgleichungen	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	ü	f	1	2					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Matthias Gerdts: Optimal Control of ODEs and DAEs. De Gruyter 2012.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Numerische Mathematik und Optimierung* . Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunkts gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Analysis und dem Teilmodul Einführung in die Gewöhnlichen Differentialgleichungen werden vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Andreas Prohl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-70-06</td><td colspan="2">Modultitel:
Numerik für Differentialgleichungen auf Oberflächen</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">6</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
180 h</td><td>Kontaktzeit:
60 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Numerische Behandlung von Differentialgleichungen auf bewegten (oder stationären) Oberflächen.
• Semi- und Volldiskretisierung von elliptischen und parabolischen Gleichungen auf Flächen, mithilfe von Oberflächen Finiten Elementen und effizienter Zeitintegratoren.
• Implementierung der Algorithmen.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden haben die grundlegenden Methoden und Techniken der Numerik für Probleme auf (bewegten) Oberflächen durchdrungen. Insbesondere sind sie vertraut mit den diskutierten Energie-Techniken, die sehr stark, allgemein und anwendungsreich sind, auch in oberflächenunabhängigen Gebieten der Numerik. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Numerik für Differentialgleichungen auf Oberflächen	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Literatur</td><td colspan="3">Exemplarische Literatur:
• Gerhard Dziuk: Finite elements for the Beltrami operator on arbitrary surfaces. 1988.
• Gerhard Dziuk, Charles M. Elliott: Finite elements on evolving surfaces. 2007.</td></tr>
</table>

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Numerische Mathematik und Optimierung* . Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Algorithmen der Numerik sind hilfreich, aber nicht zwingend erforderlich.
Modul-verantwortliche	Christian Lubich

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-70-11	**Modultitel:** Stochastische Differentialgleichungen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Stochastische Prozesse, Filtrationen, Martingale. • Wienerprozess, Random Walk, Satz von Donsker. • Diffusions-Halbgruppe, Itos Integral. • Lösung einer stochastischen Differentialgleichung. • Markov-Eigenschaft, Malliavin-Kalkül, Rough-Path-Theorie.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden beherrschen die Grundprinzipien und Techniken zur Konstruktion von Lösungen stochastischer Differentialgleichungen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erklären. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbstständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	siehe Tabelle unten		
Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Bernt Oksendal: Stochastic differtial equations. Springer 2000.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Stochastische Differentialgleichungen	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Numerische Mathematik und Optimierung* und *Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Kenntnisse aus den Modulen Stochastik und Einführung in die Integrations- und Maßtheorie aus dem Bachelor of Science werden vorausgesetzt.
Modulverantwortliche	Andreas Prohl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-70-12**	**Modultitel:** Einführung in Stochastische Differentialgleichungen - Teil 1		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	5		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 1 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Einführung in Brownsche Bewegung und stochastische Integration. • Lösungskonzepte für stochastische Differentialgleichungen. • Stabilität stochastischer Differentialgleichungen. • Numerische Approximation stochastischer Differentialgleichungen.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden beherrschen die Grundprinzipien und Techniken zur Konstruktion von Lösungen stochastischer Differentialgleichungen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Einführung in Stochastische Differentialgleichungen - Teil 1	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	1	2					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Bernt Oksendal: Stochastic differential equations. Springer 2000.

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Numerische Mathematik und Optimierung* und *Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus den Modulen Stochastik und Einführung in die Integrations- und Maßtheorie aus dem Bachelor of Science werden vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Andreas Prohl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-70-15	**Modultitel:** Numerik stochastischer Differentialgleichungen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Zufallszahlen-Generatoren, Ito-Taylor-Entwicklung. • Starke und schwache Approximation, Konsistenz. • Euler-Maruyama Verfahren, Milstein-Verfahren, stochastische Runge-Kutta-Verfahren. • Approximation gestoppter Diffusionsprozesse.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden beherrschen die Grundprinzipien und Techniken zur numerischen Approximation von Lösungen stochastischer Differentialgleichungen. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Numerik stochastischer Differentialgleichungen	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Peter E. Kloeden, Eckhard Platen: Numerical solution of stochastic differential equations. Springer 1999.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Numerische Mathematik und Optimierung* und *Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Stochastik im Bachelor of Science werden vorausgesetzt.

Modul-verantwortliche	Andreas Prohl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-70-16**	**Modultitel:** Stochastische optimale Kontrolle im Unendlich-Dimensionalen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Behandelt werden Themen aus dem Gebiet der stochastischen optimalen Kontrolle, einem Gebiet an der Schnittstelle zwischen Analysis, Optimierung, Partiellen Differentialgleichungen und Stochastik, die die Studierenden bis an die aktuelle Forschung heranführen. Bei der Auswahl der konkreten Themen werden die Vorkenntnisse der Teilnehmer berücksichtigt.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden erwerben vertiefte Kenntnisse im Bereich der stochastischen optimalen Kontrolle, die sie in ein aktuelles Forschungsgebiet einführen und ihnen ermöglichen, selbst ein kleines Forschungsprojekt anzugehen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Sochastische Optimale Kontrolle im Unendlich-Dimensionalen	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Numerische Mathematik und Optimierung* und *Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich werden Kenntnisse aus dem Modul Numerik vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Andreas Prohl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-70-20	**Modultitel:** Einführung in die Optimierung		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	6		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 3 SWS + Übung 1 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Optimalitätstheorie für glatte, konvexe und lineare Optimierungsprobleme mit Nebenbedingungen. • Grundlagen der Theorie konvexer Mengen und Funktionen. • Dualitätstheorie für konvexe und lineare Optimierungsprobleme. • Lösungsverfahren für lineare Optimierungsprobleme.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden kennen und verstehen Methoden und Algorithmen zur Lösung konvexer und linearer Optimierungsprobleme. Sie haben gelernt, die Methoden auf einfache Probleme mit wirtschaftswissenschaftlichem, technischem oder physikalischem Bezug anzuwenden. Sie können die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes der Methoden kritisch beurteilen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Einführung in die Optimierung	V	f	3	4,5	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	1	1,5					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Florian Jarre, Joseph Stoer: Optimierung: Einführung in mathematische Theorie und Methoden. Springer 2019. • Jorge Nocedal, Stephen J. Wright: Numerical optimization. Springer 2006.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Numerische Mathematik und Optimierung* . Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich werden nur Grundkenntnisse aus der Linearen Algebra und der Analysis vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Christian Lubich

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-70-21</td><td colspan="2">Modultitel:
Nichtlineare Optimierung</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">regelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Endlich-dimensionale Optimierung, Gradientenverfahren mit Armijos Regel, globalisiertes Newton-Verfahren.
Restringierte Optimierung, Lemma von Farkas, Tangentialkegel.
Abadie CQ, KKT Bedingungen, Slater Bedingungen.
Lineares Programm, Dualität, Simplexverfahren.
Penalty- und Barrieremethoden, Innere Punkte Verfahren.
Nichtlineare Programme, SQP Verfahren, nichtglatte Optimierung.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden beherrschen die Grundprinzipien und Techniken zur Analysis und Numerik restringierter Optimierungsaufgaben. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbstständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3"><table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Nichtlineare Optimierung</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">mP</td><td rowspan="2">20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Carl Geiger, Christian Kanzow: Theorie und Numerik restringierter Optimierungsaufgaben. Springer 2002.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Numerische Mathematik und Optimierung* . Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modulverantwortliche	Andreas Prohl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-70-22	**Modultitel:** Optimierung mit Differentialgleichungen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Direkte Methode in der Variationsrechnung, Euler-Lagrange Gleichung. • Brouwer-Minty Satz, nichtlineare Evolutionsgleichungen. • Gateaux- und Frechetdifferenzierbarkeit. • Existenznachweis optimaler Kontrollen, notwendige Optimalitätsbedingungen. • Adjungierte, konvergente Optimierungsmethoden in Banachräumen. • Variationelle Diskretisierungskonzepte.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden beherrschen die Grundprinzipien und Techniken zur Herleitung von Optimalitätsbedingungen für prototypische Steuerungsprobleme mit Nebenbedingungen in Form von partiellen Differentialgleichungen. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Optimierung mit Differentialgleichungen	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Michael Hinze, Rene Pinnau, Michael Ulbrich, Stefan Ullrich: Optimization with PDE constraints. Springer 2009.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Analysis und Differentialgeometrie* und *Numerische Mathematik und Optimierung* . Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunkts gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Inhaltlich ist das Modul Funktionalanalysis Voraussetzung für die Teilnahme an diesem Modul.
Modulverantwortliche	Andreas Prohl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-70-25</td><td colspan="2">Modultitel:
Numerische Optimierung</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">5</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte: Eine Einführung in numerische Methoden zur Lösung von Optimierungsproblemen in Wissenschaft und Technik mit Schwerpunkt auf kontinuierlicher Optimierung und nichtlinearer Programmierung.
Grundlegende Konzepte der Optimierung.
Unbeschränkte Optimierung und Algorithmen vom Typ Newton.
Optimierung mit Gleichungen als Bedingungen.
Optimierung mit Ungleichungen als Bedingungen.
Anwendungen:
Wirtschaft: Ressourcenzuteilung in der Logistik, Investitionen, usw.
Wissenschaft: Modellschätzung und Anpassung an Messdaten, Versuchsplanung.
Ingenieurwesen: Entwurf und Betrieb von technischen Systemen wie Brücken, Autos, Flugzeugen, digitalen Geräten, usw.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden sind mit den Problemstellungen und den numerischen Verfahren der Optimierung vertraut. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3"><table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Numerische Optimierung</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180 o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>ü</td><td>f</td><td>1</td><td>2</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Jorge Nocedal, Stephen J. Wright: Numerical Optimization. Springer 2006. • Stephen Boyd, Lieven Vandenberghe: Convex Optimization. Cambridge University Press 2004.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu dem *Studienschwerpunkt Numerische Mathematik und Optimierung* . Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modulverantwortliche	Andreas Prohl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-70-30**	**Modultitel:** Theoretical Aspects of Machine Learning		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	6		
Arbeitsaufwand **- Kontaktzeit** **- Selbststudium**	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Das Modul behandelt einige aktuelle Aspekte des theoretischen maschinellen Lernens, wie z.B.: • Die Theorie der reproduzierenden Kernel-Hilbert-Räume (RKHS). • Anwendungen der RKHS-Theorie wie SVMs, Kernel-Regression, Kernel-PCA und Kernel-Mittelwert-Einbettungen. • Approximationsfähigkeiten von neuronalen Netzen. • Dynamik neuronaler Netze und der neuronale Tangentenkern. • Neueste Fortschritte in der hochdimensionalen Statistik, insbesondere Überparametrisierung und Generalisierung.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden erlernen die mathematischen Grundlagen der Theorie des überwachten Lernens, neuronaler Netzwerke, Support-Vektor-Maschinen und Kernel-Methoden. Sie sind mit grundlegenden modernen Themen des maschinellen Lernens sowie mit deren theoretischen Grundlagen, mathematischem Ansatz und konzeptionellen Werkzeugen vertraut, die für die Diskussion und Begründung von Algorithmen erforderlich sind. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Theoretical Aspects of Machine Learning	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt. – Das Modul kann vom Dozenten ausnahmsweise auch ohne Übungen angeboten werden; in diesem Fall werden für das Modul statt 6 nur 3 Leistungspunkte vergeben.

Literatur

Exemplarische Literatur:

- Mehryar Mohri, Afshin Rostamizadeh, Ameet Talwalkar: Foundations of Machine Learning. MIT Press 2012.
- Shai Shalev-Shwartz, Shai Ben-David: Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms. CUP 2014.
- Peter L. Bartlett, Andrea Montanari, Alexander Rakhlin: Deep learning: a statistical viewpoint. Acta Numerica 2021.
- Daniel A. Roberts, Sho Yaida, Boris Hanin: The Principles of Deep Learning Theory: An Effective Theory Approach to Understanding Neural Networks. Cambridge University Press 2022.

Verwendbarkeit

Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Numerische Mathematik und Optimierung* und *Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.

Teilnahmevoraussetzungen

Neben grundlegenden Kenntnissen in Analysis, Linearer Algebra und Wahrscheinlichkeitstheorie werden einige Eigenschaften aus der Theorie der Hilbert Räume benötigt.

Modulverantwortliche

Andreas Prohl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-70-31**	**Modultitel:** Theorie des Statistischen Lernens für nicht-parametrische Regression 1		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Nicht-Parametrische Regression, Regressionsschätzer. • (Universelle) Konsistenz. • Ratenkonvergenz. • Satz von Stone. • Kernschätzer, k-NN-Schätzer. • Slow-Rate-Konvergenz, Minimax-Konvergenzraten.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden sind mit grundlegenden nicht-parametrischen Regressions-Schätzern vertraut, insbesondere mit deren universeller Konsistenz und Ratenkonvergenz. Sie beherrschen Grundprinzipien und Methoden des Stochastischen Lernens, wie sie für Anwendungen im Maschinellen Lernen benötigt werden. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erklären. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbstständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Theorie des Statistischen Lernens für nicht-parametrische Regression 1	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Laslo Györfi, Michael Kohler, Adam Krzyzak, Harro Walk: A distribution-free theory of nonparametric regression. Springer 2002.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Numerische Mathematik und Optimierung* und *Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Es werden grundlegende Kenntnisse aus der Stochastik und Wahrscheinlichkeitstheorie vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Andreas Prohl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-70-32**	**Modultitel:** Theorie des Statistischen Lernens für nicht-parametrische Regression 2		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Das uniforme Gesetz der großen Zahlen auf Funktionsklassen (Vapnik-Chervonenkis-Theorie). • Abstrakte (starke) Konsistenztheorie für *least-squares*-Regressions-Schätzer auf (approximierenden) Funktionsklassen. • Beispiele, insbesondere der *data dependent partitioning*-Schätzer sowie der *least squares neural networks*-Schätzer. • Ratenkonvergenz für *least-squares* Schätzer.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden sind mit vertieften Methoden des Stochastischen Lernens sowie ihrer Analyse vertraut, wie sie für Anwendungen im Machine Learning benötigt werden. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erklären. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbstständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		
Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)	siehe folgende Tabelle		

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Theorie des Statistischen Lernens für nicht-parametrische Regression 2	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Laslo Györfi, Michael Kohler, Adam Krzyzak, Harro Walk: A distribution-free theory of nonparametric regression. Springer 2002.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Numerische Mathematik und Optimierung* und *Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Statistisches Lernen 1 werden vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Andreas Prohl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-70-33**	**Modultitel:** Theorie und Numerik restringierter Optimierungsaufgaben		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Wir beginnen mit der unrestringierten konvexen Minimierungsaufgabe (auf Räumen), und dem Gradientenverfahren mit Schrittweitenkontrolle nach Armeijo zur approximativen Berechnung eines Minimums, sowie ihren Varianten. Das Simplexverfahren löst lineare Programme auf Polyedern. Zentral ist dann die konvexe (nichtlineare) Minimierungsaufgabe auf Mengen, und die Charakterisierung eines Minimums mit (notwendigen) Optimalitätsbedingungen (Tangentialkegel, linearisierter Tangentialkegel, Abadie Bedingung, Karush-Kuhn-Tucker Bedingungen). Zudem werden auf diesen theoretischen Konzepten basierende numerische Lösungsverfahren (innere Punkte Methode, Penalty Methoden, SQP-Verfahren) vorgestellt und analysiert.		
Qualifikationsziele	Die Teilnehmer haben relevante aktuelle Algorithmen zur Optimierung restringierter Optimierungsprobleme kennen gelernt: hierzu gehören Gradientenverfahren mit Schrittweitenkontrolle, das Simplex-Verfahren, innere Punkte-Methoden, Penalisierungs-Methoden und das SQP-Verfahren. Sie können die Algorithmen analysieren und ihren Aufwand vergleichen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erklären. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbstständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Theorie und Numerik restringierter Optimierungsaufgaben	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt. – Das Modul kann vom ausnahmsweise Dozenten auch ohne Übungen angeboten werden; in diesem Fall werden für das Modul statt 9 nur 6 Leistungspunkte vergeben.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Carl Geiger, Christian Kanzow: Theorie und Numerik restringierter Optimierungsaufgaben. Springer 2002.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Numerische Mathematik und Optimierung* . Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modulverantwortliche	Andreas Prohl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-70-40	**Modultitel:** Spieltheorie			**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3			
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h		Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester			
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig			
Fachsemester	1-3			
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch			
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS			
Modulinhalt	**Inhalte:** Im Zentrum der Betrachtung stehen Nash- und verallgemeinerte Nash-Gleichgewichtsprobleme sowie ihre numerische Lösung.			
Qualifikationsziele	Die Studierenden kennen die grundlegenden Fragestellungen der Spieltheorie. Sie sind vertraut mit analytischen und numerischen Ansätzen zu deren Untersuchung. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erklären.			

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Spieltheorie	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Christian Kanzow, Alexandra Schwartz: Spieltheorie. Birkhaeuser 2018.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Numerische Mathematik und Optimierung* . Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Es werden grundlegende Kenntnisse aus der Analysis und Numerik vorausgesetzt. Das Modul ist auch für Studierende angrenzender Gebiete mit grundlegenden mathematischen Kenntnissen geeignet.
Modul-verantwortliche	Andreas Prohl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-75-01</td><td colspan="2">Modultitel:
Wahrscheinlichkeitstheorie</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">regelmäßig im Wintersemester</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Charakteristische Funktionen und Ergänzungen zum Zentralen Grenzwertsatz.
Bedingte Erwartungen und weitere maßtheoretische Grundlagen.
Markovketten und Martingale in diskreter Zeit, Klassifikation, Asymptotik, Stoppzeiten, Stationarität, Ergodizität.
Einführung in Prozesse in kontinuierlicher Zeit wie Poissonprozesse und Brownsche Bewegung.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden können maßtheoretisch fundiert grundlegende stochastische Abhängigkeitsstrukturen von Zufallsgrößen wahrscheinlichkeitstheoretisch modellieren, analysieren und interpretieren. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Wahrscheinlichkeitstheorie</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Heinz Bauer: Wahrscheinlichkeitstheorie und Grundzüge der Maßtheorie. De Gruyter 2010. • Richard Durrett: Probability, Theory and Examples. Cambridge University Press 2010. • Hans-Otto Georgii: Stochastik. De Gruyter 2009. • Jean Jacod, Philip E. Protter: Probability essentials. Springer 2004. • Olav Kallenberg. Foundations of Modern Probability. Springer 2002. • Achim Klenke: Wahrscheinlichkeitstheorie. Springer 2013. • David Meintrup, Stefan Schäffler: Stochastik. Springer 2005. • Albert N. Shiryaev: Probability-1. Springer 2016.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modul-verantwortliche	Martin Möhle, Martin Zerner

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-75-02	**Modultitel:** Kombinatorik		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Grundlegende kombinatorische Objekte. • Erzeugende Funktionen. • Halbordnungen, Möbius-Inversion. • Methode von Polya und Redfield. • Symbolische Kombinatorik. • Transfermatrix-Methode. • Euler-Maclaurinsche Summenformel. • Asymptotische Methoden.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die Verwendung von grundlegenden kombinatorischen Methoden erlernt. Sie können diskrete Strukturen analysieren und Zählaufgaben lösen, sowie bekannte Identitäten anwenden und mit Zählkoeffizienten umgehen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Kombinatorik	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Martin Aigner: Combinatorial theory. Springer 1997. • Martin Aigner: A Course in Enumeration. Springer 2007. • Richard P. Stanley: Enumerative combinatorics. Volume 1. Cambridge University Press 2011. • Francois Bergeron, Gilbert Labelle, Pierre Leroux. Combinatorial species and tree-like structures. Cambridge University Press 1998. • Philippe Flajolet, Robert Sedgewick. Analytic Combinatorics. Cambridge University Press 2009.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* und *Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus der Algebra (Gruppenwirkungen), der Funktionentheorie (Integralformel von Cauchy) und der Grundlagen der diskreten Mathematik werden erwartet.
Modul-verantwortliche	Martin Mühle, Martin Zerner, Elmar Teufl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-75-03</td><td colspan="2">Modultitel:
Mathematische Statistik</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">regelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Statistische Modelle, Exponentialfamilien, Suffizienz.
• Sätze von Rao-Blackwell, Lehmann-Scheffe, Cramer-Rao.
• Schätzmethoden, UMVU-Schätzer, Gütekriterien, Asymptotik von Schätzern.
• Hypothesentests, Konfidenzintervalle, Neyman-Pearson Lemma.
• Testmethoden, UMPU-Tests, 1- und 2-Stichprobentests.
• Modelle mit wachsenden Dichtequotienten, nichtparametrische Modelle.
• Einführung in Regression und Varianzanalyse.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden können statistische Zusammenhänge mathematisch modellieren. Sie können statistische Schätz- und Testmethoden mathematisch konstruieren, analysieren, vergleichen und anwenden sowie deren Ergebnisse interpretieren. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung
(ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Mathematische Statistik</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Peter J. Bickel, Kjell A. Doksum: Mathematical Statistics: Basic Ideas and Selected Topics. Chapman & Hall 2016. • Hans-Otto Georgii: Stochastik. De Gruyter 2009. • Erich L. Lehmann, Joseph P. Romano: Testing statistical hypotheses. Springer 2005. • Erich L. Lehmann, George Casella: Theory of point estimation. Springer 1998. • Wiebe R. Pestman: Mathematical Statistics. De Gruyter 2009 • Helmut Pruscha: Vorlesungen über Mathematische Statistik. Springer Vieweg 2000. • Mark J. Schervish: Theory of Statistics. Springer 1995.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Wahrscheinlichkeitstheorie sind hilfreich, sind aber nicht zwingend erforderlich.
Modul-verantwortliche	Martin Mühle, Martin Zerner

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-75-04	**Modultitel:** Stochastische Prozesse		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	regelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Stochastische Prozesse in stetiger Zeit, wie z. B. • Markovprozesse; • Martingale; • Brownsche Bewegung, Poissonprozesse und allgemeine Levyprozesse; • Gaußprozesse. Betrachtet werden u.a. Existenz- und Konvergenzaussagen sowie Pfadeigenschaften dieser Prozesse.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die zentralen Begriffe, Ergebnisse, Methoden und Beispiele der Theorie der stochastischen Prozesse in stetiger Zeit kennengelernt und können damit mathematisch umgehen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erklären. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbstständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Stochastische Prozesse	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Heinz Bauer: Wahrscheinlichkeitstheorie und Grundzüge der Maßtheorie. De Gruyter 2010. • Joseph L. Doob: Stochastic Processes. Wiley 1990. • Samuel Karlin, Howard Taylor: A First Course in Stochastic Processes. Academic Press 1975. • Samuel Karlin, Howard Taylor: A Second Course in Stochastic Processes. Academic Press 1981. • Götz Kersting, Anton Wakolbinger: Stochastische Prozesse. Birkhäuser 2014. • Achim Klenke: Wahrscheinlichkeitstheorie. Springer 2013. • James R. Norris: Markov Chains. Cambridge University Press 1997.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Fundierte Kenntnisse aus dem Modul Wahrscheinlichkeitstheorie werden vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Martin Mühle, Martin Zerner

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-75-05	**Modultitel:** Perkolationstheorie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	3		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 90 h	Kontaktzeit: 30 h	Selbststudium: 60 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Kantenperkolation auf Graphen, insbesondere auf mehrdimensionalen Gittern. • Phasenübergänge. • Clusteranzahl und Clustergrößen. • Besonderheiten in zwei Dimensionen. • alternative Perkolationsmodelle.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden können spezielle räumlich indizierte Familien von Zufallsvariablen als zufällige geometrische Strukturen interpretieren und wahrscheinlichkeits theoretische Methoden zu deren Analyse anwenden. Sie lernen anhand einfacher Modelle kennen, wie mikroskopische Änderungen makroskopische Phasenübergänge zur Folge haben können. Die Studierenden sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Perkolationstheorie	V	f	2	3	nein	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Béla Bollobás, Oliver Riordan. Percolation. Cambridge University Press 2006. • Geoffrey Grimmett: Percolation. Springer 1999.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie*, *Mathematische Physik* und *Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunkts gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.

Teilnahme-voraussetzungen	Kenntnisse aus dem Modul Wahrscheinlichkeitstheorie sind hilfreich, aber nicht zwingend erforderlich.
Modul-verantwortliche	Elmar Teufl, Martin Zerner

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-75-06</td><td colspan="2">Modultitel:
Stochastische Analysis</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch oder Englisch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
Martingale und Stoppzeiten in kontinuierlicher Zeit.
Doléans-Maß, Kompensator, Doob-Meyer-Zerlegung.
Stochastisches Integral für quadratisch integrierbare Martingale (insbesondere auch für unstetige Martingale).
Semimartingale, Transformation stochastischer Integrale.
Itô-Formel (insbesondere auch für Prozesse mit Sprüngen).
Stochastische Differentialgleichungen.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden haben die zentralen Begriffe, Ergebnisse, Methoden und Beispiele der Theorie der Stochastischen Analysis kennengelernt und können damit mathematisch umgehen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Stochastische Analysis</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Fabrice Baudoin: Diffusion Processes and Stochastic Calculus. EMS 2014. • Kai Lai Chung and Ruth J. Williams: Introduction to Stochastic Integration. Birkhäuser 1990. • Richard Durrett: Stochastic Calculus. CRC Press 2006. • Albrecht Irle: Finanzmathematik. Teubner 2003. • Ioannis Karatzas, Steven Shreve: Brownian Motion and Stochastic Calculus. Springer 1991. • Michel Métivier: Semimartingales. De Gruyter 1982. • Bernt Oksendal: Stochastic Differential Equations. Springer 2007. • Nicolas Privault: Stochastic Analysis in Discrete and Continuous Settings. Springer 2009. • Daniel Revuz, Marc Yor: Continuous Martingales and Brownian Motion. Springer 1999. • Heinrich von Weizsäcker, Gerhard Winkler: Stochastic Integrals, Vieweg 1990.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Fundierte Kenntnisse zur Wahrscheinlichkeitstheorie werden vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Martin Möhle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: **MAT-75-07**	**Modultitel:** Informationstheorie		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** • Entropie und Entropieraten im diskreten Fall. • Satz von Shannon-McMillan-Breiman. • Entropieraten von Markov-Ketten. • Kolmogorov-Komplexität. • Datenkompression. • Kanalkapazität. • Differenzialentropie.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden erlernen Informationsgehalt mit Entropie und Entropierate zu beschreiben. Sie können die grundlegende Theorie auf konkrete zufällige Experimente und stochastische Prozesse anwenden. Außerdem können die Studierenden die theoretischen Begriffe auf konkrete Probleme der Kodierungstheorie anwenden. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Informationstheorie	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Robert B. Ash: Information Theory. Wiley. 1965. • Thomas M. Cover, Joy A. Thomas: Elements of Information Theory. Wiley 2006. • David J.C. MacKay: Information Theory, Inference and Learning Algorithms. Cambridge 2003. • Claude Shannon, Warren Weaver: The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press 1949.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu dem *Studienschwerpunkt Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Inhaltlich werden die Module Stochastik und Wahrscheinlichkeitstheorie vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Martin Mühle, Martin Zerner, Elmar Teufl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-75-08</td><td colspan="2">Modultitel:
Mathematische Populationsgenetik</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">6</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
180 h</td><td>Kontaktzeit:
60 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Austauschbare Populationsmodelle.
• Aussterbewahrscheinlichkeit.
• Nachkommen und Vorfahren.
• Dualität Markoffscher Prozesse.
• Coalescent-Prozesse und zugehörige Konvergenzsätze.
• Einfache Mutationsmodelle, Ewens-Sampling-Formel.
• Statistische Anwendungen, z.B. Schätzen der Mutationsrate.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden lernen in der Vorlesung die Grundzüge der Darstellungstheorie und entwickeln ein Verständnis für das Zusammenwirken geometrischer und algebraischer Methoden. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><th>Titel</th><th>Art der Lehrform</th><th>Status</th><th>SWS</th><th>ECTS</th><th>Studienleistung</th><th>Prüfungsform</th><th>Prüfungsdauer (min)</th><th>Benotungssystem</th><th>Anteil an der Modulnote</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Mathematische Populationsgenetik</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180 o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Jean Bertoin: Random Fragmentation and Coagulation Processes. Cambridge 2006. • Stewart N. Ethier, Thomas G. Kurtz: Markov Processes. Wiley 1986. • Warren J. Ewens: Mathematical Population Genetics. Springer 2004. • Jim Pitman: Combinatorial Stochastic Processes. LNM 1875. Springer 2006. • John Wakeley: Coalescent Theory. Roberts & Company Publishers 2008.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahmevoraussetzungen	Fundierte Kenntnisse zur Wahrscheinlichkeitstheorie werden vorausgesetzt.
Modulverantwortliche	Martin Mühle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-75-09</td><td colspan="2">Modultitel:
Punktprozesse</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">6</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
180 h</td><td>Kontaktzeit:
60 h</td><td>Selbststudium:
120 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Zufällige Maße, Punktprozesse, Poisson-Prozesse.
• Phasenübergänge.
• Clusteranzahl und Clustergrößen.
• Besonderheiten in zwei Dimensionen.
• alternative Perkolationsmodelle.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden haben die zentralen Begriffe, Ergebnisse, Methoden und Beispiele der Theorie der Punktprozesse kennengelernt und können damit mathematisch umgehen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. Die Studierenden können den aktuellen Forschungsstand im thematisierten Spezialgebiet wiedergeben und kritisch hinterfragen.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
<tr><td>Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td colspan="3">
<table>
<tr><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Punktprozesse</td><td>V</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
</table>
In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
</table>

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Daryl John Daley, David Vere-Jones: An Introduction to the Theory of Point Processes. Springer 2008. • Martin Jacobsen: Point Process Theory and Applications. Birkhäuser 2006. • Olav Kallenberg: Foundations of Modern Probability. Springer 2002. • John F. C. Kingman: Poisson Processes. Clarendon Press 1993. • Günter Last, Mathew D. Penrose: Lectures on the Poisson Process. Cambridge 2016.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunkts gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Fundierte Kenntnisse zur Wahrscheinlichkeitstheorie werden vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Martin Mühle

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

<table>
<tr><td>Modulnummer:
MAT-75-10</td><td colspan="2">Modultitel:
Graphentheorie</td><td>Art des Moduls:
Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit</td></tr>
<tr><td>ECTS-Punkte</td><td colspan="3">9</td></tr>
<tr><td>Arbeitsaufwand
- Kontaktzeit
- Selbststudium</td><td>Arbeitsaufwand:
270 h</td><td>Kontaktzeit:
90 h</td><td>Selbststudium:
180 h</td></tr>
<tr><td>Moduldauer</td><td colspan="3">1 Semester</td></tr>
<tr><td>Häufigkeit des Angebots</td><td colspan="3">unregelmäßig</td></tr>
<tr><td>Fachsemester</td><td colspan="3">1-3</td></tr>
<tr><td>Unterrichtssprache</td><td colspan="3">Deutsch</td></tr>
<tr><td>Lehr- / Lernformen</td><td colspan="3">Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS</td></tr>
<tr><td>Modulinhalt</td><td colspan="3">Inhalte:
• Grundbegriffe der Graphentheorie,
• Grundlegende graphentheoretische Algorithmen,
• Flüsse, Schnitte, Zusammenhang, Matchings,
• Kreis- und Schnittraum (Kohomologietheorie),
• Spektrale Graphentheorie, Matrix-Baum-Satz,
• Planare Graphen, Satz von Kuratowski und Wagner,
• Einbettungen in Flächen,
• Färbungen,
• Minorentheorie.</td></tr>
<tr><td>Qualifikationsziele</td><td colspan="3">Die Studierenden kennen die Grundbegriffe der Graphentheorie, können die Struktur von Graphen untersuchen und Methoden der Graphentheorie praktisch nutzen. Ferner erkennen Sie Verbindungen zu Geometrie und Algebra und können daraus Nutzen ziehen. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern.
In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td rowspan="4">Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)</td><td>Titel</td><td>Art der Lehrform</td><td>Status</td><td>SWS</td><td>ECTS</td><td>Studienleistung</td><td>Prüfungsform</td><td>Prüfungsdauer (min)</td><td>Benotungssystem</td><td>Anteil an der Modulnote</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Graphentheorie</td><td>V</td><td>f</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">ja</td><td rowspan="2">K o. mP</td><td rowspan="2">90-180
o. 20-30</td><td rowspan="2">b</td><td rowspan="2">100</td></tr>
<tr><td>Ü</td><td>f</td><td>2</td><td>3</td></tr>
<tr><td colspan="10">In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.</td></tr>
<tr><td>Literatur</td><td colspan="10">Exemplarische Literatur:
• Bela Bollobas: Modern graph theory, Springer, 1998.
• John Adrian Bondy, Uppaluri Siva Ramachandra Murty: Graph theory, Springer, 2008.
• Reinhard Diestel: Graph theory, Springer, 2018.
• Jonathan L. Gross, Jay Yellen, Mark Anderson: Graph theory and its applications, CRC Press, 2019.</td></tr>
<tr><td>Verwendbarkeit</td><td colspan="10">Das Modul gehört zu den Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie und Stochastik. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten Studienschwerpunkt, Vertiefungswissen Mathematik oder Freier Wahlbereich einbringbar.</td></tr>
<tr><td>Teilnahme-voraussetzungen</td><td colspan="10">Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.</td></tr>
<tr><td>Modul-verantwortliche</td><td colspan="10">Elmar Teufl</td></tr>
</table>

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-75-11	**Modultitel:** Markov-Ketten und Anwendungen		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h	Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Deutsch oder Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Inhalte:** Es werden Grundlagen und weiterführende Themen zu Markov-Ketten und verwandten stochastischen Modellen besprochen. Insbesondere wird das Langzeitverhalten von Markov-Ketten untersucht. Weiter werden Anwendungen von Markov-Ketten, etwa Markov-Chain-Monte-Carlo-Simulation, randomisierte Suchalgorithmen, graphische Modelle, Entropierate von Markov-Ketten, besprochen.		
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die Grundbegriffe zur Theorie der Markov-Ketten und verwandter Modelle erlernt. Außerdem sind sie mit Anwendungen der Theorie vertraut und haben das Zusammenwirken von Wahrscheinlichkeitstheorie und Algorithmik erlebt. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Markov-Ketten und Anwendungen	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Pierre Bremaud: Discrete Probability Models and Methods. Springer 2017. • Pierre Bremaud: Markov Chains. Springer 1999. • Olle Häggström: Finite Markov Chains and Algorithmic Applications. Cambridge University Press 2002. • Kevin Murphy: Machine Learning: A Probabilistic Perspective. MIT Press 2012. • James Spall: Introduction to Stochastic Search and Optimization. Wiley 2003.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zum *Studienschwerpunkt Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Gute Kenntnisse aus Lineare Algebra und Stochastik werden vorausgesetzt. Kenntnisse aus dem Modul Wahrscheinlichkeitstheorie sind hilfreich, werden aber nicht vorausgesetzt.
Modul-verantwortliche	Elmar Teufl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-75-12	**Modultitel:** Grundlagen der diskreten Mathematik	**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	9	
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 270 h; Kontaktzeit: 90 h	Selbststudium: 180 h
Moduldauer	1 Semester	
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig	
Fachsemester	1-3	
Unterrichtssprache	Deutsch	
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 4 SWS + Übung 2 SWS	
Modulinhalt	**Inhalte:** • Logik. • Mengen, Relationen, Funktionen. • Halbordnungen. • Kombinatorik. • Zahlentheorie. • Graphentheorie. • Algorithmen und formale Sprachen. • Diskrete Optimierung.	
Qualifikationsziele	Die Studierenden haben die Verwendung von grundlegenden Methoden der diskreten Mathematik erlernt. Sie können diskrete Strukturen analysieren und diskrete Strukturen in verschiedenen Kontexten identifizieren. Sie sind in der Lage, die wesentlichen Aussagen der Vorlesung zu benennen und zu beweisen sowie die dargestellten Zusammenhänge einzuordnen und zu erläutern. In den Übungen haben sie sich einen sicheren, präzisen und selbständigen Umgang mit den Begriffen, Aussagen und Methoden aus der Vorlesung erarbeitet. Sie haben dabei gelernt, die Methoden auf neue Probleme zu übertragen, diese zu analysieren und Lösungsstrategien alleine oder im Team zu entwickeln. Sie sind in der Lage, ihre Lösungen zu präsentieren und ggf. im kritischen Diskurs zu vertreten.	

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Grundlagen der diskreten Mathematik	V	f	4	6	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Ronald Graham, Donald Knuth, Oren Patashnik: Concrete Mathematics. Addison-Wesley 1994. • Kenneth H. Rosen: Discrete Mathematics and Its Application. McGraw-Hill 2019. • Ralph P. Grimaldi: Discrete and Combinatorial Mathematics. Addison-Wesley 2004. • Norman L. Biggs: Discrete Mathematics. Oxford University Press 2002.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Algebra und Geometrie* und *Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	Es gibt keine weiteren Voraussetzungen.
Modul-verantwortliche	Martin Mühle, Martin Zerner, Elmar Teufl

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden

Modulnummer: MAT-75-20	**Modultitel:** Probability Sistances for Sata Science		**Art des Moduls:** Pflichtmodul mit Wahlmöglichkeit
ECTS-Punkte	6		
Arbeitsaufwand - Kontaktzeit - Selbststudium	Arbeitsaufwand: 180 h	Kontaktzeit: 60 h	Selbststudium: 120 h
Moduldauer	1 Semester		
Häufigkeit des Angebots	unregelmäßig		
Fachsemester	1-3		
Unterrichtssprache	Englisch		
Lehr- / Lernformen	Vorlesung 2 SWS + Übung 2 SWS		
Modulinhalt	**Content:** We study different concepts of distances between probability measures aimed at applications in data science. The classes of distances which are studied include optimal transport distances, f-divergences and integral probability metrics. The focus is on fundamental mathematical properties of these distances, like duality, famous inequalities, geometric aspects, and quantisation. Several applications in the area of data science and machine learning are illustrated throughout, for instance related to clustering, autoencoders, GANs, image processing, and compression.		
Qualifikationsziele	Students are familiar with commonly used distances on the space of probability measures, particularly optimal transport distances, divergences, and integral probability metrics. They understand key mathematical results in this area, for instance related to duality, geometric aspects, and quantisation, as well as the interplay between different distances. They have further obtained an understanding of computational aspects and applicability in selected areas of data science. They are able to name and prove the main statements of the lecture as well as categorise and explain the relationships presented. Students will be able to reproduce and critically scrutinise the current state of research in the specialist area addressed. In the exercises, they have developed a confident, precise and independent approach to the concepts, statements and methods from the lecture. They have learned to transfer the methods to new problems, to analyse them and to develop solution strategies alone or in a team. They are able to present their solutions and, if necessary, defend them in critical discourse.		

Voraussetzung für die Vergabe von Leistungspunkten / Benotung (ggf. Gewichtung)

Titel	Art der Lehrform	Status	SWS	ECTS	Studienleistung	Prüfungsform	Prüfungsdauer (min)	Benotungssystem	Anteil an der Modulnote
Probability Sistances for Sata Science	V	f	2	3	ja	K o. mP	90-180 o. 20-30	b	100
	Ü	f	2	3					

In dem Modul ist ein Übungsnachweis als Studienleistung zu erwerben. Für die Teilnahme an der Prüfung muss der Übungsnachweis erworben worden sein. Die Prüfungsform Klausur oder mündliche Prüfung wird von der Prüferin oder dem Prüfer mit Genehmigung des Prüfungsausschusses festgelegt.

Literatur	**Exemplarische Literatur:** • Gabriel Peyre, Marco Cuturi: Computational optimal transport: with ap- plications to data science. Foundations and Trends in Machine Learning 11.5-6 (2019): 355-607. • Alison L. Gibbs, Francis Edward Su: On choosing and bounding probability metrics. International Statistical Review 70.3 (2002): 419-435. • Cedric Villani: Topics in optimal transportation. American Mathematical Society, 2003. • Imre Csiszar, Paul C. Shields: Information theory and statistics: a tutorial. Foundations and Trends in Communications and Information Theory 1.4 (2004). 417-528. • Ily Tolstikhin et al.: Wasserstein auto-encoders. 6th International Conference on Learning Representations (ICLR 2018) • Siegfried Graf, Harald Luschgy: Foundations of quantization for probability distributions. Springer, 2007.
Verwendbarkeit	Das Modul gehört zu den *Studienschwerpunkten Numerische Mathematik und Optimierung* und *Stochastik*. Es ist unter Berücksichtigung des gewählten persönlichen Studienschwerpunktes gemäß der einschränkenden Vorgaben des jeweiligen Abschnittes ggf. in den Abschnitten *Studienschwerpunkt*, *Vertiefungswissen Mathematik* oder *Freier Wahlbereich* einbringbar.
Teilnahme-voraussetzungen	The course is mostly self-contained, but students benefit from basic knowledge in analysis, probability theory, optimisation, and Python.
Modul-verantwortliche	Stephan Eckstein

Erläuterung der Abkürzungen:

Bewertungssystem	: b=benotet, nb=nicht benotet
Prüfungsform	: MA=Masterarbeit, mP=mündliche Einzelprüfung, K=Klausur, R=Referat, H=Hausarbeit, P=Portfolio
Lehrform	: V=Vorlesung, VÜ=Vorlesung mit integrierten Übungen, Ü=Übungen, P=Projekt, S=Seminar, C=Kooloqium, SV=Seminar oder Vorlesung, IC=Inverted Classroom
Status	: o=obligatorisch, f=fakultativ
Sonstiges	: h=Stunden, o.=oder, s.M.=siehe Modulbeschreibung, SWS=Semesterwochenstunden